

Ein genetischer Algorithmus zur kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung bei getakteten Mehrproduktfließlinien

Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Kauffrau Sonja Reidel

Passau, September 2006

Tag der letzten Fachprüfung des Rigorosums: 20.07.2006

Gutachter: Prof. Dr. Hans Ziegler
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre mit
Schwerpunkt Produktion und Logistik
Universität Passau

Prof. Dr. Franz Lehner
Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik II
Universität Passau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Symbolverzeichnis.....	VI

Kapitel 1

Einleitung.....	1
-----------------	---

Kapitel 2

Das Problem der kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei getakteter Mehrproduktfließlinienfertigung.....	3
---	----------

2.1 Beschreibung des betrachteten Planungsproblems VLSP.....	3
2.1.1 Charakterisierung des zu Grunde liegenden Produktionssystems.....	4
2.1.2 Charakterisierung des zu lösenden Planungsproblems	9
2.1.2.1 Problembeschreibung	9
2.1.2.2 Zielsetzung.....	16
2.2 Erläuterung des Produktionsvollzugs.....	17
2.2.1 Beschreibung der verwendeten Symbole.....	18
2.2.2 Bearbeitungsvollzug.....	19
2.2.3 Umrüstungsvollzug.....	21
2.3 Berechnung der Loswechselzeiten und -kosten	23
2.3.1 Loswechselzeiten	23
2.3.1.1 Beschreibung der verwendeten Symbole.....	24
2.3.1.2 Spezifizierungen des Produktionssystems.....	25
2.3.1.3 Kontinuierlicher Transport.....	27
2.3.1.3.1 Kontinuierlicher Transport mit Bandleerlauf.....	27
2.3.1.3.2 Kontinuierlicher Transport ohne Bandleerlauf.....	29
2.3.1.4 Intermittierender Transport.....	39
2.3.1.4.1 Intermittierender Transport mit Bandleerlauf.....	39
2.3.1.4.2 Intermittierender Transport ohne Bandleerlauf.....	40
2.3.1.5 Tabellarische Zusammenfassung der Loswechselzeiten.....	43
2.3.2 Loswechselkosten.....	46

Kapitel 3

Modellierung des VLSP für Mehrproduktfließbandfertigung..... 48

3.1	Modell zur Formulierung des Spezialfalls (VLSPS).....	48
3.1.1	Klassifikation des VLSPS.....	48
3.1.2	Modellformulierung des VLSPS.....	50
3.2	Modell zur Beschreibung des allgemeinen Falls (VLSPA).....	55
3.2.1	Klassifikation des VLSPA.....	55
3.2.2	Modellbeschreibung des VLSPA.....	56
3.3	Gegenüberstellung von VLSPS und VLSPA.....	60
3.3.1	Gegenseitige Überführbarkeit.....	60
3.3.2	VLSPS und VLSPA auf einen Blick.....	61

Kapitel 4

Entwicklung eines Genetischen Algorithmus

zur Lösung des VLSP..... 64

4.1	Beschreibung des Grundkonzepts genetischer Algorithmen.....	64
4.2	Kodierung genetischer Algorithmen.....	67
4.3	Operatoren genetischer Algorithmen.....	69
4.3.1	Selektion.....	69
4.3.2	Kreuzung.....	70
4.3.3	Mutation.....	73
4.4	Genetischer Algorithmus (GA) zur Lösung des VLSP.....	75
4.4.1	Kodierung.....	75
4.4.2	Erzeugung der Ausgangspopulation anhand eines stochastischen Konstruktionsverfahrens (<i>PDZ</i>).....	76
4.4.2.1	Grundkonzept des <i>PDZ</i>	77
4.4.2.2	Verfahrensvarianten des <i>PDZ</i>	79
4.4.2.3	Beschreibung der verwendeten Symbole.....	81
4.4.2.4	Erläuterung der einzelnen Schritte des <i>PDZ</i>	85
4.4.2.5	<i>PDZ</i> als Pseudocode.....	98
4.4.3	Algorithmus der genetischen Operatoren (<i>AGO</i>).....	105
4.4.3.1	Grundkonzept des <i>AGO</i>	105
4.4.3.2	Beschreibung der verwendeten Symbole.....	106
4.4.3.3	Erläuterung der einzelnen Schritte des <i>AGO</i>	109
4.4.3.4	<i>AGO</i> als Pseudocode.....	119
4.4.4	Verfahrensvarianten des GA.....	122

Kapitel 5	
Experimentelle Analyse.....	125
5.1 Analyse der <i>PDZ</i> -Verfahren.....	125
5.1.1 Erzeugung von Testfeldern	125
5.1.1.1 Variation der Parameterausprägungen.....	125
5.1.1.2 Konkretisierung der Parameterausprägungen.....	127
5.1.2 Testläufe der <i>PDZ</i> -Verfahren.....	135
5.1.2.1 Vorläufe zur Bestimmung von NIVEAU 1 und NIVEAU 2 bei dem Losgrößenmodus AB.....	136
5.1.2.2 Ergebnisse und Bewertung der <i>PDZ</i> -Verfahren.....	139
5.2 Analyse der <i>GA</i> -Verfahren.....	159
5.2.1 Konkretisierung der Varianten des <i>GA</i>	159
5.2.2 Ergebnisse und Bewertung der <i>GA</i> -Verfahren.....	160
5.2.3 Evolution im genetischen Algorithmus.....	170
Kapitel 6	
Zusammenfassung.....	177
Literaturverzeichnis.....	179
Anhang.....	194

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Starre und flexible relative räumliche Stationsgrenzen.....	21
Abbildung 2.2:	Loswechsel von einer Produktart mit kleinerem auf eine Produktart mit größerem Auflegeintervall.....	33
Abbildung 2.3:	Loswechsel von einer Produktart mit größerem auf eine Produktart mit kleinerem Auflegeintervall.....	36
Abbildung 4.1:	Aktualisierung der Zeitpunkte / Abschnitte auf dem Ablaufvektor...	79
Abbildung 4.2:	Verfahrensvarianten des Genetischen Algorithmus.....	124
Abbildung 5.1:	Mittelwert der mit dem Verfahren PDZ_{AB}^K ermittelten Zielfunk- tionswerte in Abhängigkeit von der NIVEAU-Konfiguration	137
Abbildung 5.2:	Streuungsmaß der mit dem Verfahren PDZ_{AB}^K ermittelten Ziel- funktionswerte in Abhängigkeit von der NIVEAU-Konfiguration ...	138
Abbildung 5.3:	Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Losgrößenmodi bei Anwendung der Prioritätsregel <i>ZEITKOST</i>	148
Abbildung 5.4:	Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Losgrößenmodi bei Anwendung der Prioritätsregel <i>KOSTZEIT</i>	149
Abbildung 5.5:	Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Losgrößenmodi bei Anwendung der Prioritätsregel <i>ZUFALL</i>	150
Abbildung 5.6:	Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus A.....	151
Abbildung 5.7:	Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus B.....	152
Abbildung 5.8:	Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus AB.....	153
Abbildung 5.9:	Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus C.....	154
Abbildung 5.10:	Abweichung der mit dem Zufallsverfahren ermittelten Zielfunktions- mittelwerte von den mit dem jeweils besten Verfahren ermittel- ten Zielfunktionsmittelwerten in Abhängigkeit des Testfeldes	155
Abbildung 5.11:	Streuungsmaß der mit den PDZ -Verfahren ermittelten Zielfunktionswerte in Abhängigkeit des Testfeldes.....	156
Abbildung 5.12:	Über alle Testfelder durchschnittlich höchster, niedrigster und mittlerer Zielfunktionswert in Abhängigkeit des PDZ -Verfahrens..	157
Abbildung 5.13:	Über alle Testfelder durchschnittliches Streuungsmaß und durchschnittliche Worst-Case-Abweichung der Zielfunktionswerte in Abhängigkeit des PDZ -Verfahrens	158
Abbildung 5.14:	Durchschnittliche mit den Verfahrensvarianten ermittelte Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Parametervariante...	164
Abbildung 5.15:	Abweichungen der mit den Verfahrensvarianten ermittelten durchschnittlichen Zielfunktionswerte von dem Mittelwert der Zielfunktionswerte der jeweils besten Verfahrensvariante in Abhängigkeit von der Parametervariante.....	165

Abbildung 5.16:	Streuungsmaß der mit den Verfahrensvarianten ermittelten Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Parametervariante....	166
Abbildung 5.17:	Über die vier Verfahrensvarianten durchschnittlich höchster, niedrigster und mittlerer Zielfunktionswert in Abhängigkeit von der Parametervariante.....	167
Abbildung 5.18:	Über die vier Verfahrensvarianten durchschnittliches Streuungsmaß und durchschnittliche Worst-Case-Abweichung der Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Parametervariante	168
Abbildung 5.19:	Über die vier Verfahrensvarianten und die drei Erzeugungsgrade durchschnittliche Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Populationsgröße	169
Abbildung 5.20:	Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$	172
Abbildung 5.21:	Entwicklung des durchschnittlichen Niveaus der Fitness in der Population bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$	173
Abbildung 5.22:	Entwicklung der durchschnittlichen Mutationsrate bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$	174
Abbildung 5.23:	Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte bei verschiedenen Populationsgrößen (Testfeld 8).....	175
Abbildung 5.24:	Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte bei verschiedenen Populationsgrößen (Testfeld 4).....	176

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Systemdifferenzierungen.....	26
Tabelle 2.2:	Tabellarische Zusammenfassung der Loswechselzeiten.....	43-45
Tabelle 4.1:	Varianten des PDZ-Verfahrens.....	80
Tabelle 5.1:	Parameterausprägungen.....	133
Tabelle 5.2:	Testfelder der PDZ-Verfahren.....	135
Tabelle 5.3:	NIVEAU-Konfigurationen für den Losgrößenmodus AB.....	136
Tabelle 5.4:	Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 1-7 für die Testfelder 1-8.....	140
Tabelle 5.5:	Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 8-13 für die Testfelder 1-8.....	141
Tabelle 5.6:	Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 1-7 für die Testfelder 9-16.....	142
Tabelle 5.7:	Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 8-13 für die Testfelder 9-16.....	143
Tabelle 5.8:	Verfahrensvarianten des genetischen Algorithmus.....	160
Tabelle 5.9:	Parametervarianten des genetischen Algorithmus.....	160
Tabelle 5.10:	Ergebnistabelle der GA-Verfahren.....	161

Symbolverzeichnis

Die Symbole sind grundsätzlich alphabetisch sortiert, je Buchstabe zuerst die kleinen, dann die großen Symbole, und hinsichtlich der Indizierung erst nach den unten stehenden und dann nach den oben stehenden Indizes. Von dieser Reihenfolge wird zu Gunsten inhaltlich zusammenhängender Symbole aus Gründen der Übersichtlichkeit vereinzelt abgewichen. Die Dimension eines Symbols ist in eckigen Klammern angegeben. Indizes, Vektorpositionen, und Mengen sind dimensionslos. Sofern sich Symbole nur auf die Beschreibung der Algorithmen *PDZ* und/oder *AGO* beziehen, wird hierauf hingewiesen. Zur formalen Beschreibung verwendete Hilfsfunktionen finden sich am Ende des Symbolverzeichnisses.

Dimensionsabkürzungen

GE..... Geldeinheiten
 LE..... Längeneinheiten
 ME..... Mengeneinheiten
 ZE..... Zeiteinheiten

Symbole

a, a' Indizes der Teilaufträge beim VLSPA, $a, a' = 1(1)A_s$, $s \in S$
 a *PDZ/AGO*: Index der Abschnitte des Ablaufvektors E^r , $a \in A_r$, $r \in R$
 a_w wohlunterscheidbare Elemente der Multimenge A , $w = 1(1)W$, [-]
 A Multimenge
 A_{erz} erzeugende Menge der Multimenge A
 A_r *PDZ/AGO*: Menge der Abschnittsindizes des r -ten Ablaufvektors, $A_r \subset \mathbb{N}$,
 $r \in R$
 A_s ganzzahlige Entscheidungsvariable im VLSPA für die Anzahl der Teilaufträge, in die der Auftrag s zerlegt wird. Die Aufträge der fiktiven Produktart 0 können nicht aufgeteilt werden, $A_I = A_E = 1$, [-]
 A_i^m Menge der der Station m bei produktartenindividuell abgestimmter Linie zugeordneten Verrichtungen der Produktart i , $A_i^m \subseteq V^m$, $i = 1(1)I-1$,
 $m = 1(1)M$
 b *PDZ/AGO*: Index der Positionen in den Teilablauffolgen TAF_a^{gf} ,
 $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$, $g = 1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
 c_i Auflegeintervall der Produktart i , $i \in I$, [ZE/ME]
 $\overline{c_i}$ Mittelwert der Taktzeiten über alle Produktarten $i = 1(1)I-1$, [ZE/ME]
 c_{\max} größtes Auflegeintervall über alle Produktarten $i \in I$, $c_{\max} = \max \{c_i | i \in I\}$,
 [ZE/ME]
 c_{ij} Loswechselkosten bei einem Loswechsel von Produktart i auf Produktart j ,
 $i, j = 1(1)I-1$, Ausrüstungskosten bei Produktionsende, $j=0$, $i = 1(1)I-1$, Einrichtungskosten bei Produktionsbeginn, $i=0$, $j = 1(1)I-1$, [GE]

- c_{ij}^m Loswechselkosten in Station m bei einem Loswechsel von Produktart i auf Produktart j , $i, j = 1(1)I-1$, Ausrüstungskosten bei Produktionsende, $j=0$, $i=1(1)I-1$, Einrichtungskosten bei Produktionsbeginn, $i=0, j=1(1)I-1$, $m=1(1)M$, [GE]
- $\overline{c_{ij}}$ durchschnittliche paarweise Loswechselkosten von der Produktart i auf die Produktart j , $i, j \in I$, [GE]
- c_{ij}^t aus der e -Umgebung um die Loswechselzeiten mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählte Werte als Basis zur Bestimmung der Loswechselkosten, $i, j \in I, i \neq j$, [ZE]
- c_a^{gf} PDZ: Summe der Loswechselkosten der Teilablauffolge f in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE]
- $c_a^{g \min}$ PDZ: Minimum der Summe der Loswechselkosten über alle Teilablauffolgen in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE]
- C_{E^r} PDZ/AGO: Loswechselkosten des Ablaufvektors E^r , $r \in R$, [GE]
- $C_{B,r}$ PDZ/AGO: Summe der Lagerungskosten über alle nach dem Erreichen des jeweils nächstmöglichen Termins auf Lager verbleibenden Bestände, $r \in R$, [GE]
- $C_{L,r}$ PDZ/AGO: Summe der Lagerungskosten über alle Produktlose bis zum jeweils nächst möglichen Termin, $r \in R$, [GE]
- d_i^m Stückbearbeitungszeit der Produktart i in der Station m , $i = 1(1)I-1$, $m \in M$, [ZE/ME]; $d_i^m = 0$, $i = 0$
- D ganze Zahl, [-]
- e, e', e'', e Indizes der Positionen auf dem Ablaufvektor E , $e, e', e'', e = 1(1)E$
- e PDZ/AGO: Index der Positionen auf den Vektoren E^r , N^r , F^r , FB^r , $F^{r, neu}$, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- e Im Rahmen der Parameter-Gestaltung zur statistischen Analyse ist e ein Faktor zur Dimensionierung der Umgebung der Loswechselzeiten um die Loswechselzeiten, [-]
- $e_{r,a}^A$ PDZ/AGO: Position des a -ten Abschnittsanfangs auf dem r -ten Ablaufvektor, $a \in A_r$, $r \in R$
- $e_{r,a}^\Omega$ PDZ/AGO: Position e des a -ten Abschnittsendes auf dem r -ten Ablaufvektor, $a \in A_r$, $r \in R$
- E Ablaufvektor; beim VLSPS ist $E \in S^E$, wobei $E_e = s$ genau dann, wenn $x_{se} = 1$; beim VLSPA ist $E \in (S \times \mathbb{N})^E$, wobei $E_e = (s, a)$ genau dann wenn $x_{se}^a = 1$.
- E Länge des Ablaufvektors E ; beim VLSPS entspricht E der Anzahl der Aufträge und ist somit gegeben, $E = |S|$; beim VLSPA entspricht E der Anzahl aller Teilaufträge, die erst durch das Modell zu bestimmen ist, $E = \sum_{s \in S} A_s$, [-]

- E^r PDZ/AGO: r -ter Ablaufvektor der Produktarten, $E^r \in I^{E^r}$, wobei E_e^r die an Position e eingeplante Produktart beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- E^r PDZ/AGO: Länge des r -ten Ablaufvektors, $r \in R$, [-]
- f PDZ/AGO: Index der Teilablauffolgen in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $fit(P^r)$ PDZ/AGO: Fitness des r -ten Individuums, $r \in R$, [-]
- F_e Fertigstellungszeitpunkt des auf e positionierten Auftrags (VLSPS) bzw. Teilauftrags (VLSPA), $e = 1(1)E$, [ZE]
- F_e^{\max} Zeitpunkt der Fertigstellung des Fertigungsloses, zu welchem der auf e positionierte Auftrag (VLSPS) bzw. Teilauftrag (VLSPA) gehört, $e = 1(1)E$, [ZE]
- F_s^{pos} ganzzahlige Entscheidungsvariable im VLSPS, die den Fertigstellungszeitpunkt des Fertigungsloses bestimmt, dem der Auftrag s angehört, $s \in S$, [ZE]
- $F_s^{a,pos}$ ganzzahlige Entscheidungsvariable im VLSPA, die den Fertigstellungszeitpunkt des Fertigungsloses bestimmt, dem der Teilauftrag a des Auftrags s angehört, $a = 1(1)A_s$, $s \in S$, [ZE]
- F^r PDZ/AGO: r -ter Vektor der Fertigstellungszeitpunkte vor Anwendung des Operators TOO, $F^r \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei F_e^r den Fertigstellungszeitpunkt der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- $F^{r,neu}$ PDZ/AGO: r -ter Vektor der Fertigstellungszeitpunkte nach Anwendung des Operators TOO, $F^{r,neu} \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei $F_e^{r,neu}$ den Fertigstellungszeitpunkt der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- F_a^g PDZ: Menge der Teilablauffolgen in der g -ten Gruppe des a -ten Abschnitts, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $F_a^{g \min, K}$ PDZ: Menge derjenigen Teilablauffolgen $TAF^{gf,a} \in F_a^g$, für die gilt: $c_a^{gf} = c_a^{g \min}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $F_a^{g \min, KZ}$ PDZ: Menge derjenigen Teilablauffolgen mit der geringsten Summe der Loswechselzeiten von allen $TAF^{gf,a} \in F_a^{g \min, K}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $F_a^{g \min, Z}$ PDZ: Menge derjenigen Teilablauffolgen $TAF^{gf,a} \in F_a^g$, für die gilt: $t_a^{gf} = t_a^{g \min}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $F_a^{g \min, ZK}$ PDZ: Menge derjenigen Teilablauffolgen mit der geringsten Summe der Loswechselkosten von allen $TAF^{gf,a} \in F_a^{g \min, Z}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$

- FB^r PDZ/AGO: r -ter Vektor der Fertigungsbeginnzeitpunkte, $FB^r \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei FB_e^r den Fertigstellungszeitpunkt der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- g PDZ: Index der aus $I_{r,a}$ zu bildenden Gruppen, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- G_a PDZ: Anzahl der aus $I_{r,a}$ zu bildenden Gruppen, $a \in A_r$, $r \in R$, [-]
- g AGO: Index der Generationen, $g \in G$
- G AGO: Menge der Generationenindizes, $G \subset \mathbb{N}$
- h, i, j Produktartenindizes, $h, i, j = 0(1)I - 1$; die Produktart 0 bildet die fiktive Anfangs- und Endproduktart ab
- $i(s)$ Beschreibung der Produktart i als Funktion in Abhängigkeit von dem Auftrag s , $s \in S$, [-]
- I Menge der Produktarten, $I = \{0, 1, 2, \dots, I-1\}$
- I_a^{copy} PDZ: Kopie der Menge $I_{r,a}$, $a \in A_r$, $r \in R$
- I_a^g PDZ/AGO: Menge derjenigen Produktarten $i \in I_{r,a}$, welche der Gruppe g angehören, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- I_n^{term} PDZ/AGO: Menge derjenigen Produktarten $i \in I$, für die zu t_n^{\min} ein externer Bedarf besteht, $n = 1(1)t$
- I_n^* PDZ: Menge derjenigen Produktarten $i \in I_n^{term}$, für die zu t_n^{\min} ein positiver Nettobedarf besteht, $n = 1(1)t$
- $I_{r,a}$ PDZ/AGO: Menge der Produktarten $i \in I$ des a -ten Abschnitts des r -ten Ablaufvektors, $a \in A_r$, $r \in R$
- I_e^l AGO: Menge derjenigen Produktarten $i \in I_{r,a}$, deren Einplanung an der Position e zu minimalen Lagerkosten führen, $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$
- I_e^m AGO: Menge derjenigen Produktarten $i \in \Delta_e^+$, deren Multiplizität m_i maximal ist, $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$
- I_e^{ml} AGO: Menge derjenigen Produktarten $i \in I_e^m$, deren Einplanung an der Position e zu minimalen Lagerkosten führen, $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$
- k_d^m direkte Umrüstkosten in der Station m , $m=1(1)M$, [GE]
- k_i Stücklagerkostensatz der Produktart i , $i \in I$, [GE/(ME*ZE)]
- \bar{k}_i Mittelwert der Stücklagerkostensätze über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$, [GE/(ZE*ME)]
- k_a^{\max} PDZ: größter vorkommender Stücklagerkostensatz der Produktarten $i \in I_{r,a}$ des a -ten Abschnitts, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE/(ME*ZE)]
- k_a^{\min} PDZ: kleinster vorkommender Stücklagerkostensatz der Produktarten $i \in I_{r,a}$ des a -ten Abschnitts, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE/(ME*ZE)]
- k_i^{rel} PDZ: Relation der Differenz zwischen k_a^{\max} und k_i^l , zu der Differenz zwischen k_a^{\max} und k_a^{\min} in dem a -ten Abschnitt, $a \in A_r$, $r \in R$, [-]
- k_w^m Werkerlohnsatz in der Station m , $m=1(1)M$, [GE/ZE]

- k theoretische Kapazitätsauslastung, [-]
 K *AGO*: Anzahl der zu erzeugenden Individuen in jeder Kindgeneration, [-]
 K_g *AGO*: Menge der erzeugten Individuen in der Generation g , $g \in G$
 L_{ni} *PDZ/AGO*: Lagerbestand der Produktart i nach der n -ten Aktualisierung,
 $i \in I$, $n = 1(1)t$, [ME]
 LG *PDZ*: Menge der Auswahloptionen zur Losgruppierung bei Anwendung des
Modus B, $LG = \{1,2,3\}$
 m Index der Stationen, $m=1(1)M$
 m' Index der letzten Station, welche die letzte Einheit der Vorgängerproduktart
vor einer Bandgeschwindigkeitsumstellung durchläuft, $m' \in M$, [-]
 m_i *AGO*: Häufigkeit, mit welcher Produktart i in einer Multimenge Δ_e^+ vor-
kommt (Multiplizität von i), $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$, [-]
 m_w Multiplizität (oder Zähler), des w -ten Elements a_w in der Multimenge A ,
 $w=1(1)W$, [-]
 $\min_{r'}, \max_{r'}$ Grenzen des die Fitness des Individuums r' in einem $[0;1]$ Intervall wider-
spiegelnden Intervalls $[\min_{r'}; \max_{r'}]$, $r' \in R$, [-]
 M Menge der Stationen, $M = \{1,2,\dots,M\}$
 M Stationenanzahl= $|M|$, [-]
 MAX_V *AGO*: Anzahl der Wiederholungen je Generation bei der Erzeugung eines
gleichen oder eines unzulässigen Individuums (Vielfaches von K), [-]
 n *PDZ/AGO*: Index der Aktualisierungen, $n = 1(1)t$
 N^r *PDZ/AGO*: r -ter Vektor der Losgrößen, $N^r \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei N_e^r die Los-
größe der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r ,
beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
 O_i *PDZ*: hinsichtlich der zeitlichen Kapazität obere Schranke des
Losgrößenintervalls der Produktart i in dem Abschnitt a , $i \in I_{r,a}$, $a \in A_r$,
 $r \in R$, [ME]
 O_i^{rel} *PDZ*: anhand der Position der betrachteten Produktart i in dem Abschnitt a
relativierte obere Grenze des Losgrößenintervalls, $i \in I_{r,a}$, $a \in A_r$, $r \in R$,
[ME]
 P *AGO*: Anzahl der Individuen der Elternpopulation, [-]
 P', P'', P''', r Elemente (Individuen) einer Population
 P^r *PDZ/AGO*: r -tes Individuum, $P^r \in (I \times \mathbb{N})^{E^r}$, wobei P_{e1}^r die an e des
Ablaufvektors der Produktarten positionierte Produktart E_e^r , und P_{e2}^r die
zugehörige Losgröße N_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
 P *PDZ*: Menge der Individuen, $P = \{P^1, P^2, \dots, P^R\}$
 P_{END} *AGO*: Endpopulation nach Vereinigung der letzten erzeugten Kindgenera-
tion mit der Elternpopulation
 P^* *PDZ/AGO*: Menge der hinsichtlich der Fitness besten gefundenen Indivi-
duen, $P^* \subset P$ bzw. $P^* \subset P_{END}$
 P_g *AGO*: Menge derjenigen Individuen, welche zur Erzeugung der g -ten Gene-
ration als potentielle Eltern zur Verfügung stehen, $g \in G$

- P_g^f AGO: Teilmenge von P_g , welche diejenigen Individuen umfaßt, die aufgrund ihrer Fitness-Werte zur Erzeugung der nächsten Generation in Frage kommen, $g \in G$
- P_{gr}^f AGO: aus jeweils vier Elternteilen bestehende Teilmenge zur Erzeugung des Individuums r in der g -ten Generation, $P_{gr}^f \subset P_g^f$, $r > R$, $r \in R$
- P_{gr}^{\max} AGO: Menge derjenigen Individuen aus P_{gr}^f , welche die beste Fitness aufweisen, $r > R$, $r \in R$
- q AGO: Variable, welche die Anzahl der erzeugten und in die Kindgeneration aufgenommenen Individuen zählt, $q=1(1)K$, [-]
- r, r', r'' PDZ/AGO: Indizes der Individuen und Vektoren, $r, r', r'' \in R$
- r_{mut}^{impl} AGO: implizite Mutationsrate, [-]
- reg regulierende Konstante im Rahmen der Ableitung der Loswechselkosten aus den Loswechselzeiten, [GE/ZE]
- $rel(c_i)$ Verhältnis von maximaler zu minimaler Taktzeit über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$, [-]
- $rel(c_{ij})$ Verhältnis von maximalen zu minimalen Loswechselkosten über alle Produktartenwechsel von i auf j , $i, j \in I$, [-]
- $rel(k_i)$ Verhältnis von maximalem zu minimalem Stücklagerkostensatz über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$, [-]
- $rel(t_{ij})$ Verhältnis von maximalen zu minimalen Loswechselzeiten über alle Produktartenwechsel von i auf j , $i, j \in I$, [-]
- $rel(x_s^{ext})$ Verhältnis von maximaler zu minimaler externer Auftragsmenge über alle Aufträge, [-]
- R PDZ/AGO: Menge der Individuenindizes, $R \subset \mathbb{N}$
- R PDZ/AGO: Anzahl der zu erzeugenden Individuen mit dem PDZ, [-]
- s, s' Indizes der Aufträge, $s, s' \in S$
- S Menge aller Auftragsindizes aller Produktarten, $S = \{1, 2, \dots, E\}$
- S_0 Menge der Auftragsindizes der auf die erste und auf die letzte Position des Ablaufvektors zu positionierenden fiktiven Produktart 0, $S_0 = \{1, E\}$
- S^E Menge aller Vektoren der Länge E mit Einträgen aus S
- S_{I-1} Menge der Auftragsindizes aller Produktarten ohne diejenigen Auftragsindizes, hinter denen die fiktive Produktart 0 steht, $S_{I-1} = S \setminus S_0$
- t Zeitpunkt, [ZE]
- t_{ij} Loswechselzeit: Zeit, die mindestens zwischen dem Zeitpunkt des Bandverlassens der letzten Produkteinheit der Vorgängerproduktart i und dem Zeitpunkt des Bandverlassens der ersten Produkteinheit der Produktart j bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j liegt, $i, j \in I$, [ZE]
- $\overline{t_{ij}}$ Mittelwert der Loswechselzeiten über alle Produktartenwechsel von i auf j , $i, j \in I$, [ZE]

- t_{ij}^e Basis zur Berechnung der Loswechselzeit: Zeit, die mindestens zwischen dem Zeitpunkt der Auflegung der letzten Produkteinheit der Vorgängerproduktart i und dem Zeitpunkt der Auflegung der ersten Produkteinheit der Produktart j bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j liegt, $i, j \in I$, [ZE]
- t_{ij}^m Umrüstzeit bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j in der Station m , $m=1(1)M$, $i, j \in I$. Hierzu zählt auch die Einrichtezeit der Station m bei Produktionsbeginn mit der Produktart j , $i=0, j=1(1)I-1$, $m=1(1)M$, und die Ausrichtezeit der Station m bei Produktionsende von der Produktart i , $j=0, i=1(1)I-1, m=1(1)M$, [ZE]
- t_a^{gf} PDZ: Summe der Loswechselzeiten der Teilablauffolge f in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [ZE]
- $t_a^{g \min}$ PDZ: Minimum der Summe der Loswechselzeiten über alle Teilablauffolgen in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [ZE]
- t_e^{next} PDZ/AGO: relativ zu dem Fertigstellungszeitpunkt F_e^r der auf e positionierten Produktart E_e^r nächstmögliche Termin der Produktart E_e^r , $e=1(1)E^r$, $r \in R$, [ZE]
- $t_{E^r,a}$ PDZ/AGO: Summe der Loswechselzeiten des a -ten Abschnitts auf dem r -ten Vektor der Produktarten, $a \in A_r$, $r \in R$, [ZE]
- t_n^{akt} PDZ/AGO: aktueller Zeitpunkt nach der n -ten Aktualisierung, $n = 1(1)t$, [ZE]
- t_n^{\min} PDZ/AGO: relativ zu t_n^{akt} nächst mögliche Termin über alle Aufträge aus der Menge der noch nicht betrachteten Termine, $n = 1(1)t$, [ZE]
- t_s Termin des Auftrags s , $s \in S$, [ZE]
- \bar{t}_s Mittelwert der Anzahl der Termine über alle Produktarten, [-]
- t_{i+} PDZ/AGO: relativ zu dem Zeitpunkt t nächstmögliche Termin t_s der Produktart i , $i=i(s)$, $i(s) \in I$, $s \in S$, [ZE]
- t_{i++} PDZ/AGO: relativ zu dem Termin t_{i+} nächstmögliche Termin t_s der Produktart i , $i=i(s)$, $i(s) \in I$, $s \in S$, [ZE]
- t^m stationsbezogene Umrüstzeit je Heraus- oder Hinzunahme einer Verrichtung bei einer symmetrischen Umrüstmatrix, $m=1(1)M$, [ZE]
- t_v^m Zeitbedarf für das Abrüsten von der Verrichtung v in Station m auf den neutralen Maschinenzustand bei einer asymmetrischen Umrüstmatrix, $v = 1(1)V^m$, $m=1(1)M$, [ZE]
- \hat{t}_v^m Zeitbedarf für das Aufrüsten auf die Verrichtung v in Station m von einem neutralen Maschinenzustand bei einer asymmetrischen Umrüstmatrix, $v = 1(1)V^m$, $m=1(1)M$, [ZE]
- t PDZ/AGO: Anzahl der unterscheidbaren Termine über alle Produktarten, $t = \left\lceil T_1^{next} \right\rceil$, [-]

- T PDZ/AGO : Planungshorizont (Ende des Planungszeitraums), T entspricht dem letzten Termin über alle Produktarten, $T = \max\{t_s | s \in S\}$, [ZE]
- T_n^{next} PDZ/AGO : Menge der unterscheidbaren Termine über alle Aufträge nach der n -ten Aktualisierung, $n = 1(1)t$
- $TAF^{gf,a}$ PDZ : Teilablauffolge f in der Gruppe g des a -ten Abschnitts,
 $TAF^{gf,a} \in I_a^g$, wobei $TAF_b^{gf,a}$ die an b positionierte Produktart beschreibt, $f = 1(1)I_a^g$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $TAF^{g^*,a}$ PDZ : eingeplante Teilablauffolge in der Gruppe g des a -ten Abschnitts,
 $TAF^{g^*,a} \in I_a^g$, wobei $TAF_b^{g^*,a}$ die an b positionierte Produktart beschreibt, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- u PDZ/AGO : Variable, welche die Anzahl der erzeugten unzulässigen Ablaufvektoren zählt, [-]
- v Verrichtungsindex der Menge aller in Station m auszuführenden Verrichtungen über alle Produktarten, $v = 1(1)V^m$, $m=1(1)M$
- v konstante Bandgeschwindigkeit über alle Produktarten, [LE/ZE]
- v_i produktartenindividuelle Bandgeschwindigkeit der Produktart i , $i = 1(1)I-1$, [LE/ZE]
- V^m Anzahl der in Station m ausführbaren Verrichtungen, $m=1(1)M$, [-]
- V^m Menge der in Station m ausführbaren Verrichtungen über alle Produktarten,
 $V^m = \{1,2,\dots,V^m\}$, $m=1(1)M$
- V_MAX PDZ : Anzahl der maximalen Wiederholungen zur Erzeugung eines zulässigen Ablaufvektors (Vielfaches von R), [-]
- w Index der Elemente der Multimenge A
- W Anzahl der unterscheidbaren Elemente in der Multimenge A , d. h. Mächtigkeit der erzeugenden Menge A_{erz} , $W = |A_{erz}|$, [-]
- $W_{gr}(P^{r'})$ AGO : Wahrscheinlichkeit, daß das Individuum $P^{r'} \in P_g^f$ an der Erzeugung des Individuums r beteiligt ist, $P^{r'} \in P_g^f$, $r > R$, $r, r' \in R$, $g \in G$, [-]
- x_i^H PDZ/AGO : Gesamtherstellmenge der Produktart i , $i \in I$, [ME]
- x_{ni} PDZ/AGO : Nettobedarf der Produktart i nach der n -ten Aktualisierung, $i \in I$, $n = 1(1)t$, [ME]
- x_{ni}^H PDZ/AGO : noch ausstehende Gesamtherstellmenge der Produktart i nach der n -ten Aktualisierung, $i \in I$, $n = 1(1)t$, [ME]
- x_s^{ext} PDZ/AGO : externe Auftragsmenge des Auftrags s , $s \in S$, [ME]; für die Aufträge der fiktiven Produktart 0 beträgt die Auftragsmenge 0, $x_s^{ext} = 0$, $s \in S_0$
- $\overline{x_s^{ext}}$ Mittelwert der externen Auftragsmengen über alle Aufträge, [ME]
- x_{i+}^{ext} PDZ/AGO : externer Bedarf der Produktart i zu dem Termin t_{i+} ,
 $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_{i+}$, $i \in I$, [ME]

- $x_{i_{++}}^{ext}$ *PDZ/AGO*: externer Bedarf der Produktart i zu dem Termin $t_{i_{++}}$,
 $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_{i_{++}}$, $i \in I$, [ME]
- x_{se} binäre Entscheidungsvariable beim VLSPS, die den Wert 1 (Wert 0) annimmt, wenn der Auftrag s der Position e zugeordnet wird (nicht zugeordnet wird), $s \in S, e = 1(1)E$, [-]
- x_{se}^a binäre Entscheidungsvariable beim VLSPA, die den Wert 1 (Wert 0) annimmt, wenn der Teilauftrag a des Auftrags s der Position e zugeordnet wird (nicht zugeordnet wird), $a = 1(1)A_s, s \in S, e = 1(1)E$, [-]
- x_s^a ganzzahlige Entscheidungsvariable beim VLSPA für die Mengeneinheiten des Teilauftrags a des Auftrags s , $a = 1(1)A_s, s \in S$, [ME]
- y *AGO*: Laufvariable für die Schleife zur Fitnessberechnung, $y = 0(1) \left| P_g \right| - 1$,
 $g \in G$
- $Z(P^r)$ *PDZ/AGO*: Zielfunktionswert des r -ten Individuums, $r \in R$ [GE]
- Z^{\max} *PDZ/AGO*: Maximum der Zielfunktionswerte der jeweils betrachteten Population [GE]
- Δ_e^+ *AGO*: endliche Multimenge derjenigen Produktarten, welche in der gerade betrachteten Menge von zu kreuzenden Eltern auf die in dem Individuum r auf die Position $e-1$ gesetzte Produktart i folgen, $e=2(1)E^r, r > R, r \in R$
- Δ_e^* *AGO*: Teilmenge derjenigen Produktarten aus der Multimenge Δ_e^+ , welche zur Belegung von e zur Verfügung stehen, d. h. nur solche Produktarten umfaßt, die in dem betrachteten Abschnitt noch nicht positioniert wurden,
 $e=2(1)E^r, r > R, r \in R$

Hilfsfunktionen

- $fitmax(P_g, P)$... gibt aus der Menge P_g die hinsichtlich ihrer Fitness besten P Individuen zurück
- $next(t, i)$ gibt den relativ zu t nächstmöglichen Termin t_s der Produktart i zurück,
 $i = i(s), i(s) \in I, s \in S$
- $nextel(X, x)$ gibt aus der Menge X das relativ zu x nächst größere Element zurück
- $random(X)$ gibt ein mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewähltes Element aus der Menge X zurück
- $random(U; O)$ gibt einen mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählten Wert aus dem Intervall $[U; O]$ zurück
- $rand3(X)$ gibt drei mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählte Elemente aus der Menge X zurück

Kapitel 1

Einleitung

Die Nachfragestruktur eines Produktes bestimmt die Fertigungsform, in welcher das Produkt gefertigt wird. Produkte mit kundenspezifischer geringer Nachfrage werden in Einzel- oder Kleinserienfertigung, Produkte mit kundenspezifischer oder kundenübergreifender mittelstarker Nachfrage in Serien- oder Sortenproduktion und Produkte mit kontinuierlicher starker Nachfrage in Massenproduktion hergestellt. Die Einzelfertigung erfolgt kundenauftragsorientiert ohne kurzfristig absehbare Wiederholung, die Massenproduktion hingegen erfolgt marktorientiert in Vorrats- oder Lagerproduktion. Die Serien- oder Sortenproduktion stellt insofern eine Mischform aus Auftrags- und Marktorientierung dar, als die Fertigung eines Produktes zwar kundenauftragsbezogen, aber mit absehbaren Wiederholungen erfolgt. Spätestens mit Vorliegen des Produktionsprogramms, d. h. mit Kenntnis darüber, welche Produktarten in welchen Mengen in einem kurzfristigen Planungszeitraum gefertigt werden müssen,¹ ist somit die einschlägige Fertigungsform bekannt.

Ausgehend von einem *gegebenem Produktionsprogramm* wird im Rahmen der *Produktionsablauf-* oder *Produktionsvollzugsplanung* festgelegt, wie hinsichtlich vorzugebender Zielsetzungen die vorhandenen Potentialfaktoren eingesetzt, sowie *wann* und *in welchen Teilmengen* die Produktarten gefertigt werden.

In vorliegender Arbeit wird das Problem der *kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung* bei getakteter Mehrproduktfließlinienfertigung untersucht.² Das Problem kann als *Teilproblem* der *Produktionsablaufplanung* für den Fall der *Serien- oder Sortenproduktion* charakterisiert werden. Hinsichtlich des Produktionsvollzugs läßt sich die Serien- oder Sortenproduktion allgemein als Fertigungsform beschreiben, bei welcher mehrere verschiedenartige Erzeugnisse in gemeinsamer Produktion gefertigt werden,³ wobei der Übergang von einer Produktart auf eine andere Kosten verursacht.⁴ Das Produktionssystem der *Fließlinienfertigung*, bei der die zur Bearbeitung der verschiedenen Produkte notwendigen Betriebsmittel entsprechend der Bearbeitungsfolge an den Werkstücken räumlich angeordnet werden, bedingt nicht nur eine gemeinsame Produktion der betrachteten Produktarten, sondern auch, daß die Produktarten in *Reihenfertigung* produziert werden können. Eine *getaktete* Mehrproduktfließlinienfertigung ist darüber hinaus durch einen organisatorisch bedingten Zeitzwang charakterisiert, welcher besagt, daß die jeweils nächste Produkteinheit eines Loses die einzelnen Bearbeitungsstationen in einem bestimmten zeitlichen Intervall, der so genannten Taktzeit oder auch synonym Auflegeintervall, erreicht. Das Produktionssystem der getakteten Fließlinienfertigung wird auch als Fließbandfertigung bezeichnet.⁵

¹ Das Produktionsprogramm beschreibt den mit Kenntnis der einzuplanenden Kundenaufträge gegebenen Auftragsbestand oder einen Teil davon.

² Die Festlegung des Produktionssystems (Werkstatt-, Insel- oder Fließfertigung) erfolgt in der Regel auf Basis der taktischen Produktionsprogrammplanung (Produktgruppen) unter Einbeziehung der mittelfristig zu erwartenden Nachfragestrukturen, vgl. hierzu z. B. Strunk (2001), Produktion (2003).

³ *Gemeinsame Produktion* besagt, daß mindestens ein Produktionsfaktor von sämtlichen Erzeugnissen genutzt wird, vgl. hierzu Adam (1969), S. 25, Kistner/Rogalski (1995), S. 290.

⁴ Vgl. Kilger (1973), S. 383, Gutenberg (1983), S. 203.

⁵ Vgl. z. B. Hahn (1972), S. 19, Hackstein/Felbecker (1981), S. 77. In Abgrenzung zur Fertigung mit organisatorisch bedingtem Zeitzwang wird ein prozeßbedingter Zeitzwang z. B. aufgrund chemischer Prozesse als

Die getaktete Fließlinienfertigung hat an praktischer Relevanz bis heute nicht verloren. Anwendungen der losweisen Mehrproduktfließbandfertigung finden sich überall dort, wo zur Optimierung des Materialflusses das Fertigungssystem der Fließbandfertigung eingesetzt und bedingt durch ausreichend große Mengen die Fertigung in Losen erfolgen kann, wie z. B. im Elektrogerätebau, im Maschinenbau oder auch in der Bekleidungsindustrie.⁶ Dennoch wurde in der Literatur in dem Themenbereich der Fließbandfertigung die Fertigung in Losen bislang stark vernachlässigt. In dieser Arbeit werden die spezifischen Besonderheiten der losweisen Fließbandfertigung hinsichtlich des Bearbeitungs- und des Umrüstungsvollzugs in adäquater Weise berücksichtigt, das Losgrößen- und Reihenfolgeproblem verbal und formal beschrieben, sowie ein problemspezifischer *Genetischer Algorithmus* zur Lösung des Planungsproblems vorgestellt und experimentell untersucht. Der Genetische Algorithmus soll in der Lage sein, für zufällig erzeugte Probleminstanzen nachweisbar gute Lösungen zu finden.

Das behandelte Planungsproblem wird im folgenden als *Variables-Los-Sequenz-Problem* (VLSP) bezeichnet und zusammengefaßt wie folgt beschrieben: Unter Berücksichtigung der durch die Fließbandfertigung bedingten Besonderheiten des Produktionsvollzugs wird ausgehend von einem gegebenen Produktionsprogramm und gegebenen Potentialfaktoren zum einen die Frage „In welchen Teilmengen (Losgrößen⁷) werden die Produkte gefertigt?“ beantwortet, wobei sowohl die Anzahl der Lose als auch die Losgrößen erst durch die Lösung des Problems bestimmt werden. Zum anderen wird die Frage „Wann werden die Produkte gefertigt?“ beantwortet, d. h. es werden die Zeitpunkte und die Reihenfolge der aufzulegenden Produktlose festgelegt. Hinsichtlich zeitlicher Restriktionen muß dabei berücksichtigt werden, daß bei jedem Loswechsel *Loswechselzeiten* aufgrund der erforderlichen Umrüstvorgänge an den Maschinen anfallen, und daß das Produktionsprogramm durch externe Kundenaufträge bestimmt ist, hinter denen einzuhaltende Termine stehen. Die Nachfragestruktur ist hierbei *dynamisch*, d. h., daß sowohl die externen Auftragsmengen als auch der zeitliche Abstand zwischen den Terminen derselben Produktart variieren können. Die *Kostenorientierung* entspricht der verfolgten Zielsetzung, die bei den Produktartenwechseln anfallenden *Loswechselkosten* und die *Lagerungskosten* der Produktlose in dem betrachteten Planungszeitraum zu minimieren. Das VLSP tritt in solchen Fertigungssituationen auf, in denen der Zeitraum für die Vollzugsplanung und der Zeitraum des gegebenen Produktionsprogramms übereinstimmen. Hierbei handelt es sich gewöhnlich um Probleme mit einem *Planungszeitraum* von bis zu *maximal einem Jahr*.⁸

In Kapitel 2 werden das VLSP sowie das zugrunde liegende Produktionssystem der getakteten Mehrproduktfließlinienfertigung näher beschrieben und gezeigt, wie die Berechnung der Loswechselzeiten in Abhängigkeit von fließbandspezifischen Differenzierungen des Produktionssystems erfolgt. Kapitel 3 beinhaltet die formale Modellbeschreibung zweier Ausprägungen des VLSP, die ineinander überführbar sind. In Kapitel 4 werden geeignete, für das konkrete Planungsproblem entwickelte heuristische Lösungsverfahren vorgestellt. Die verschiedenen Lösungsverfahren entstehen durch die Kombination von Varianten eines stochastischen Konstruktionsverfahrens mit genetischen Operatoren zu Varianten eines Genetischen Algorithmus. Kapitel 5 umfaßt die experimentelle Untersuchung der Qualität der in C++ implementierten Lösungsverfahren. Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse ab.

Zwangslauffertigung bezeichnet. *Amen* setzt die getaktete Fließlinienfertigung nicht mit der Fließbandfertigung gleich, sondern versteht das Fließband lediglich als Form des Transportmittels, vgl. Amen (1997), S. 15.

⁶ Vgl. z. B. Produktion (2002a), Produktion (2002b), Vüllers/Fleer (2004).

⁷ Als Los wird eine Menge von Produkteinheiten eines Produkts bezeichnet, welche ohne Unterbrechung durch die Produktion von anderen Produkten bearbeitet wird. Vgl. Müller-Merbach (1962), S. 1. Synonym zu Los wird in der Literatur auch „Serie“ verwendet, vgl. Kilger (1973), S. 383.

⁸ Vgl. auch Kern (1992), S. 73.

Kapitel 2

Das Problem der kostenorientierten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei getakteter Mehrproduktfließlinienfertigung

In Abschnitt 2.1 werden das zu lösende Planungsproblem und das zugrunde liegende Produktionssystem verbal beschrieben, sowie der Produktionsvollzug näher erläutert. In dem dann folgenden Abschnitt 2.2 wird ausführlich beschrieben und formuliert, wie die reihenfolgeabhängigen Loswechselzeiten in Abhängigkeit von fließbandspezifischen Differenzierungen sowie die Loswechselkosten berechnet werden müssen. Die gesonderte Darlegung der Berechnungen dient dem Aufrechterhalten des allgemeingültigen Charakters der als Parameter in das Planungsproblem eingehenden paarweisen Loswechselzeiten und -kosten.

2.1 Beschreibung des betrachteten Planungsproblems VLSP

Das zu lösende Losgrößen- und Reihenfolgeproblem VLSP besteht darin, für ein durch externe Kundenaufträge gegebenes Produktionsprogramm die Anzahl der Lose je Produktart, die jeweilige Losgröße und die Produktlosreihenfolge dergestalt zu bestimmen, daß die aufgrund der Kundentermine zu berücksichtigenden Zulässigkeitsbedingungen erfüllt und die entscheidungsrelevanten Kosten minimiert werden. Als entscheidungsrelevant werden zum einen die Lagerungskosten der Produktlose, und zum anderen diejenigen Kosten angesehen, welche bei jedem Produktloswechsel aufgrund von Umrüstungsvorgängen verursacht werden. Hierbei besteht der Zielkonflikt, daß die Produktarten hinsichtlich der Minimierung der Loswechselkosten in möglichst großen und hinsichtlich der Minimierung der Lagerungskosten in möglichst kleinen Losen gefertigt werden sollten.

Das dem VLSP zugrunde liegende Produktionssystem der getakteten Mehrproduktfließlinienfertigung beschreibt diejenige Produktionssituation, in welcher verschiedene Produktarten auf denselben Maschinen mit derselben Bearbeitungsfolge gefertigt werden müssen, wobei sich die für das Produktionssystem charakteristische Bearbeitung der einzelnen Produkteinheiten mit dem zeitlichen Abstand ihres Auflegeintervalls auf den Produktionsvollzug auswirkt. Hierbei wird von einem bereits abgestimmten Fließband ausgegangen. Das bedeutet, daß im Rahmen der Leistungsabstimmung zuvor bestimmt wird, mit wie vielen Stationen in welchen räumlichen Abmessungen das Fließband ausgestattet ist, welche Verrichtungen welcher Station zugeordnet und mit welchen Auflegeintervallen die Produktarten eingelastet werden.¹

¹ Als integrierbares Teilproblem der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung von getakteten Mehrproduktfließlinien zählt neben der Losgrößen- und Reihenfolge- bzw. Umrüstfolgebestimmung auch die Leistungsabstimmung, da sowohl die Umrüstzeiten und -kosten, welche bei jedem Loswechsel anfallen, als auch die Leistungsabstimmung durch die Betriebsmittelausstattung und die Qualifikation der an den Stationen eingesetzten Arbeitskräfte determiniert werden, vgl. auch Hahn (1972), S. 26. So berücksichtigen z. B. *Kabir/Tabucanon* die Abhängigkeit zwischen Rüstzeiten und Leistungsabstimmung, wobei die Rüstzeiten allerdings nicht reihenfolgeabhängig, sondern rein stationsbezogen sind, vgl. *Kabir/Tabucanon* (1995). Vgl. in diesem Zusammenhang auch die Ansätze von *Pinto/Dannenbring/Khumuwala* (1983) und *Graves/Holmes Redfield* (1988). Ebenfalls eine integrierte Betrachtung von Reihenfolgebestimmung und Leistungsabstimmung existiert in Form der von *Decker* entwickelten nachträglichen Arbeitsgangverschiebung innerhalb der bereits abgestimmten Linie, wobei

2.1.1 Charakterisierung des zu Grunde liegenden Produktionssystems

Das betrachtete Produktionssystem der getakteten Mehrproduktfließlinienfertigung kann als Permutationsfertigung mit organisatorisch bedingtem Zeitzwang charakterisiert werden, wobei die Permutationsfertigung einen Spezialfall der Reihenfertigung darstellt. Die Produktionsform der Permutationsfertigung liegt dann vor, wenn sowohl für alle zu fertigenden Produktarten eine Übereinstimmung in der Reihenfolge der gemeinsam genutzten Betriebsmittel bzw. Maschinen gegeben ist (Kriterium der Reihenfertigung)², als auch die Folge der Aufträge auf allen Maschinen identisch ist.³

Der organisatorisch bedingte Zeitzwang, welcher besagt, daß die einzelnen Produkteinheiten eines Produktloses die jeweils nächste Bearbeitungsstation mit dem zeitlichen Abstand ihrer Taktzeit erreichen, ist in dem Zusammenhang der Reihenfolgeplanung in Abhängigkeit davon, ob der Transport der Produkteinheiten auf dem Fließband kontinuierlich oder intermittierend erfolgt, unterschiedlich zu bewerten. Die kontinuierliche Beförderung besagt, daß das Fließband mit einer bestimmten Bandgeschwindigkeit läuft und die Produkteinheiten entsprechend ihres Auflegeintervalls zur Bearbeitung aufgelegt werden. Der intermittierende Transport ist ein Spezialfall des kontinuierlichen Transports,⁴ bei dem die Produkteinheiten mit dem konstanten zeitlichen Abstand des Auflegeintervalls aufgelegt und von Station zu Station ruckartig weitergereicht werden.

Das Produktionssystem ist durch folgende Annahmen charakterisiert:

- 1) Auf M Maschinen werden I verschiedene Produktarten hergestellt.
- 2) Das Produktionsprogramm ist gegeben. Der Planungszeitraum beträgt bis zu einem Jahr und ist durch eine gegebene Anzahl an Zeiteinheiten determiniert.
- 3) Die Nachfragestruktur ist kundenauftragsbezogen mit im Planungszeitraum sich wiederholender Nachfrage (Serienfertigung). Für jede Produktart können mehrere Kundenaufträge bestehen. Sollten mehrere Kundenaufträge über dieselbe Produktart zu demselben Termin bestehen, werden diese zu einem externen Auftrag zusammengefaßt.⁵ Zu jedem externen Auftrag besteht ein im Planungszeitraum liegender Termin. Die Summe der externen Auftragsmengen einer Produktart zu den einzelnen Terminen entspricht der Gesamtherstellmenge der betrachteten Produktart im Planungszeitraum. Die externen Auftragsmengen einer Produktart können von Auftrag zu Auftrag variieren. Der Abstand zwischen den Terminen der Aufträge einer Produktart ist nicht konstant. Die Aufträge unterschiedlicher Produktarten können denselben Termin haben. Insgesamt steht eine begrenzte Anzahl möglicher Termine zur Verfügung.

jedoch von gemischter (Losgröße 1), nicht von losweiser Auflage ausgegangen wird, vgl. Decker (1993), S. 160-168 (zu dem Unterschied zwischen losweiser und gemischter Auflegeform vgl. Abschnitt 2.1.2.1 v. A.) Aufgrund der ohnehin schon hohen Komplexität des betrachteten Planungsproblems wird die Integration des Reihenfolge- und des Leistungsabstimmungsproblems in der Literatur aufgrund der unterschiedlichen Planungshorizonte und der Komplexität zumeist abgelehnt, vgl. Domschke/Scholl/Voß (1997), S. 250.

² Zur Reihenfertigung vgl. z. B. Hoitsch (1993), S. 499.

³ In der englischsprachigen Literatur wird diese Fertigungsstruktur als „permutation-flow-shop“ bezeichnet. Vgl. z. B. Söhner (1991), S. 37. So wird auch ein Maschinenbelegungsplan, bei dem die Reihenfolge der Aufträge auf allen Maschinen gleich ist, als Permutationsplan bezeichnet, vgl. Neumann/Morlock (1993), S. 500

⁴ Vgl. Ziegler (1990), S. 6, 37.

⁵ Vgl. auch Brüssau (2002), S. 153.

- 4) Die Produktarten werden in Losen gefertigt. Die Fertigung eines Loses einer Produktart entspricht einem Fertigungsauftrag. Ein Fertigungslos kann durch Gruppierung der externen Auftragsmengen oder Teilauftragsmengen verschiedener externer Aufträge, hinter denen dieselbe Produktart steht, erfolgen. Zu einem Fertigungslos können diejenigen externen Aufträge oder Teilaufträge gruppiert werden, deren Fertigung bis zu dem jeweils ersten Termin, dessen Bedürfnisbefriedigung ganz oder zum Teil aus dem betrachteten Los erfolgen muß, abgeschlossen sein kann. Die Anzahl der Lose je Produktart ist unbekannt. Die Losgröße einer Produktart kann von Auflegung zu Auflegung variieren. Ein Fertigungsauftrag einer Produktart kann der Bedürfnisbefriedigung mehrerer externer Aufträge dieser Produktart dienen, und die Bedürfnisbefriedigung eines externen Auftrages kann aus mehreren Fertigungsaufträgen erfolgen.
- 5) Die M Maschinen stellen Bearbeitungsstationen in einer seriellen getakteten Fließlinie (Fließband) dar, d. h., daß die zur Bearbeitung der Produkte notwendigen Betriebsmittel an einem Fließband entsprechend der Bearbeitungsreihenfolge der Werkstücke räumlich angeordnet sind und die Produkteinheiten in den einzelnen Bearbeitungsstationen mit dem zeitlichen Abstand ihres Auflegeintervalls ankommen.⁶ Hierbei handelt es sich um eine Montagelinie, deren Bearbeitungsstationen durch Potentialfaktorkombinationen aus Betriebsmittel und Arbeitskraft gebildet werden.⁷
- 6) Die Maschinenreihenfolge der Bearbeitungen ist für sämtliche Produktlose gleich (Reihenfertigung). Die Produktlose durchlaufen jede Bearbeitungsstation genau einmal, das Überspringen einer Station (bypassing) und das Zurückkehren zu einer Station (backtracking)⁸ sind nicht erlaubt.
- 7) Die einzelnen Bearbeitungsstationen bieten keine Möglichkeit der Zwischenlagerung in Stationspuffern.⁹ Hieraus folgt unter Berücksichtigung von Annahme 5 und 6 zwangsweise, daß nicht nur die Maschinenfolge für alle Produktlose, sondern auch die Produktlosfolge auf allen Maschinen gleich ist, da eine Abweichung von der Produktlosfolge bei Eintreffen in einer betrachteten Station von der gewählten Produktlosfolge bei Verlassen der Station und demzufolge bei Eintreffen in der jeweils nächsten Station nicht realisiert werden kann.¹⁰ Die getaktete Fließfertigung ohne Stationspuffer entspricht somit einer Permutationsfertigung.¹¹
- 8) Die fiktive Produktart 0 stellt den neutralen Rüstzustand der Maschinen dar, welchen die Maschinen vor Fertigungsbeginn und nach Fertigungsende des Produktionsprogramms annehmen müssen.¹² Das Aufrüsten der Maschinen von dem neutralen Zustand auf die erste zu fertigende Produktart wird als Einrüstung, das Abrüsten von der letzten zu fertigenden Produktart als Ausrüstung des Fließbandes bezeichnet.

⁶ In Abschnitt 2.3 wird gezeigt, daß hiervon im Einzelfall unter bestimmten Voraussetzungen dann abgewichen werden kann, wenn Produkteinheiten aufgrund eines Loswechsels Bearbeitungsstationen mit einer nicht ihrem Auflegeintervall entsprechenden Bandgeschwindigkeit durchlaufen.

⁷ Vgl. auch Amen (1997), S. 7 in Verbindung mit S. 16.

⁸ Zu genaueren Erläuterungen vgl. z. B. Aneke/Carrie (1986), S. 471.

⁹ Vgl. hierzu z. B. Ansatz von Young (1967), Sawik (1995). Zu der Bedeutung der Zwischenlagerung in so genannten Stationspuffern vgl. Decker (1993), S. 87-91, und die dort angegebene Literatur.

¹⁰ Vgl. Decker (1993), S. 91-95.

¹¹ Vgl. z. B. Gupta (1986), S. 209 ff.

¹² Vgl. hierzu analog Pinedo (1995), S. 48.

- 9) Die absoluten räumlichen Stationsgrenzen sind äquidistant, geschlossen und über alle Produktarten gleich. Unter absoluten räumlichen Stationsgrenzen werden diejenigen Stationsgrenzen verstanden, die jede Station von den jeweiligen Nachbarstationen auf dem Fließband räumlich abgrenzen. Äquidistant besagt, daß die räumlichen Abmessungen jeweils mit gleichem Abstand über die Länge des Fließbandes verteilt sind. Die Geschlossenheit der Stationsgrenzen besagt, daß für jede Produktart die Bearbeitung in einer Station innerhalb der Stationsgrenzen abgeschlossen sein muß, und somit weder das Fortsetzen der in der betrachteten Station zu verrichtenden Bearbeitung in der Folgestation, noch der Bearbeitungsbeginn der in der Folgestation vorzunehmenden Verrichtungen bereits vor Erreichen der Folgestation in sogenannten Überlappungsbereichen möglich ist.¹³
- 10) Die Leistungsabstimmung der Fließlinie ist gegeben und kostenorientiert erfolgt. Die Auflegeintervalle (Taktzeiten) der Produktarten sind produktartenindividuell abgestimmt.¹⁴
- 11) Die Stationsbearbeitungszeiten für die Produktarten sind durch die Leistungsabstimmung gegeben, von der Produktlosreihenfolge unabhängig¹⁵ und über den Planungszeitraum konstant.¹⁶ Leerzeiten innerhalb einer Produktlosfertigung, die auf Taktausgleichverluste im Rahmen der Leistungsabstimmung¹⁷ zurückzuführen sind, werden nicht bewertet.
- 12) Die Beförderung der Produkteinheiten auf dem Fließband kann alternativ kontinuierlich oder intermittierend erfolgen, wobei die gewählte Alternative dann jeweils für das gesamte Produktionsprogramm Anwendung findet. In Abhängigkeit von der Art der Beförderung können weitere Differenzierungen hinsichtlich des Umrüstungsvollzugs getroffen werden. Sofern der Transport kontinuierlich erfolgt, werden die Rückwegezeiten der Werker in den einzelnen Stationen nach Beendigung der Bearbeitung eines Werkstücks als vernachlässigbar gering angesehen.¹⁸
- 13) Die bei einem Produktloswechsel zu berücksichtigende Zeit wird als Loswechselzeit bezeichnet und beschreibt jeweils die zwischen dem Bandverlassen der letzten Einheit der Vorgängerproduktart und dem Zeitpunkt des Bandverlassens der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart liegende Zeit. Diese spezifische Definition der Loswechselzeit wird hier gewählt, um die Besonderheiten des Loswechsels bei getakteter Mehrproduktfließlinienfertigung adäquat abbilden zu können. Die Berechnung der Loswechselzeiten erfolgt differenziert für das gemäß Annahme 12) spezifizierbare Produktionssystem (siehe Abschnitt 2.3 v. A.). Die Loswechselzeiten berechnen sich in funktionaler Abhängigkeit von den für die Werkzeugumrüstung der Betriebsmittel notwendigen Umrüstzeiten, den Be-

¹³ In der Fließfertigung wird zwischen geschlossenen und halb- oder beidseitig offenen Stationen mit und ohne Überlappungsbereich differenziert, vgl. hierzu Thomopoulos (1967), S. B-61. Vgl. auch Ziegler (1990), S. 11, Lochmann (1999), S. 8-14.

¹⁴ Zur kostenorientierten Leistungsabstimmung vgl. Steffen (1977), Rosenberg/Ziegler (1992), Amen (1997).

¹⁵ Vgl. auch Proust/Gupta/Deschamps (1991), S. 480.

¹⁶ Eine adäquate Berücksichtigung von Lerneffekten würde sich in der getakteten Fließfertigung mit kostenorientierter Zielsetzung aus folgendem Grund als sehr problematisch erweisen: Die Berücksichtigung von Lerneffekten, d. h. von im Zeitablauf abnehmenden Bearbeitungsdauern für die einzelnen Verrichtungen, müßte in Abhängigkeit von dem Schwierigkeitsgrad der einzelnen Verrichtungen differenziert vorgenommen werden, da Verrichtungen mit hohem Schwierigkeitsgrad üblicherweise ein höheres Lernpotential aufweisen als Verrichtungen mit niedrigem Schwierigkeitsgrad. Da sich die Stationslohnsätze jeweils nach der schwierigsten der gemäß Leistungsabstimmung vorgenommenen Verrichtungszuordnungen zu der betrachteten Station bemessen, wäre anzunehmen, daß gerade die die Stationslohnsätze determinierenden Verrichtungen das größte Lernpotential aufweisen und bei Auftreten von Lerneffekten im Endeffekt in einer Station wieder Kapazitäten zur Verfügung stehen, welche eine erneute Leistungsabstimmung erfordern könnten, die jedoch wiederum zu einer Veränderung der Stationslohnsätze führen kann.

¹⁷ Vgl. hierzu z. B. Koether (1986), S. 22 f.

¹⁸ Vgl. auch Pinedo/Chao (1999), S. 121. Zu der Berücksichtigung der Rückwegezeiten vgl. Ziegler (1990), S. 17 f., 20.

arbeitszeiten der letzten Einheit der Vorgängerproduktart und der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart, sowie der Unterschiedlichkeit der Auflegeintervalle der aufeinanderfolgenden Produktarten. Die Loswechselzeiten sind von der Produktlosfolge (Reihenfolge) abhängig und asymmetrisch, d. h., daß der Loswechsel von einer Produktart i auf eine Produktart j mehr oder weniger Zeit in Anspruch nehmen kann als der Loswechsel von j auf i .

- 14) Die Umrüstzeiten erfüllen für jede Station die Dreiecksungleichung, d. h., daß die Summe der Umrüstzeiten in einer Station von Produktart h auf Produktart i und von i auf Produktart j in jedem Fall mindestens der Umrüstzeit von h auf j entsprechen muß.¹⁹
- 15) Die bei jedem Produktloswechsel erforderlichen Umrüstungen erfolgen los- und nicht zeitpunktbezogen,²⁰ d. h. daß die Loswechsel jederzeit während der Arbeitsschichten vorgenommen werden können, ohne daß auf Schichtwechsel oder andere zeitliche Vorgaben Rücksicht genommen werden muß.²¹
- 16) Zu einem gegebenen Zeitpunkt kann in jeder Station alternativ ein Bearbeitungsvorgang oder ein Rüstvorgang durchgeführt werden.
- 17) Der Stationslohnsatz (Werkerlohnsatz einer Station) richtet sich jeweils nach der über alle Produktarten höchsten Anforderung in der betrachteten Station.²² Sollten in einer Station mehrere Arbeitskräfte beschäftigt sein, erfassen die für die Bewertung verwendeten Werkerlohnsätze bereits die entsprechende Vervielfachung in der betrachteten Station.²³
- 18) Die bei den Loswechseln notwendigen Umrüstungsvorgänge können in jeder Station von der/den dort beschäftigten Arbeitskraft/-kräften durchgeführt werden.
- 19) Bei jedem Produktloswechsel fallen Loswechselkosten an, die sich aus zwei Komponenten zusammensetzen: zum einen aus den durch den Einsatz von Werkzeugen, Material, wie z. B. Schmierstoffe oder Reinigungsmittel, oder auch durch Prüfkosten induzierten Rüstkosten,²⁴ und zum anderen aus den Arbeitskosten, d. h. aus den mit den Stationslohn-

¹⁹ Diese Annahme wird unter Bezugnahme der Reihenfolgeabhängigkeit auf die technologische Ähnlichkeit der aufeinanderfolgenden Produktarten in der Literatur häufig getroffen. Vgl. hierzu Srikar/Ghosh (1986), S. 1462, sowie die dort angegebene Literatur. *Srikar/Ghosh* fordern die strengere Bedingung, daß die beschriebene Summe der Umrüstzeiten von h auf i plus i auf j in jedem Fall größer als die benötigte Umrüstzeit von h auf j ist, vgl. *Srikar/Ghosh* (1986), a.a.O.

²⁰ Vgl. auch Völkel (1990), S. 57.

²¹ Gemäß Annahme 2) ist der Planungszeitraum durch eine gegebene Anzahl Zeiteinheiten determiniert ohne differenzierte Betrachtung von Schichten, Sonn- und Feiertagen. Somit wird auch im Rahmen der Loswechsel auf die Berücksichtigung von Schichtintervallen bzw. Schichtwechseln verzichtet. Eine derartige Restriktion berücksichtigt explizit Dinkelbach (1964), S. 58. Konkludent gehen hiervon allerdings alle diskreten Ansätze aus, die ein Teilperiodenintervall von der Dauer einer Schicht unterstellen (vgl. auch Haase/Göpfert (1996), S. 1515), da in diesen Modelle eine Teilperiode entweder zur Bearbeitung einer Produktart, zur Umrüstung oder gar nicht genutzt, und ein Umrüstvorgang ggf. am Periodenanfang vorgenommen wird. Vgl. hierzu Fleischmann (1994), S. 396.

²² Vgl. auch Haase/Göpfert (1996), S. 1515, Böhrs (1980), S. 285. Da die auf dem betrachteten Fließband gefertigten Produktarten sämtliche Bearbeitungsstationen und diese in derselben Reihenfolge durchlaufen, kann in vorliegendem Fall unterstellt werden, daß die Zuordnung der Bewertungsergebnisse der einzelnen Arbeitsgänge zu den entsprechenden Lohngruppen (vgl. hierzu z. B. Knebel/Zander (1989), S. 106-110) auf der Basis einer über alle Produktarten stationsbezogenen Gesamtarbeitsbewertung erfolgt (vgl. hierzu auch Böhrs (1980), S. 39). Demnach bemißt sich der anzusetzende Stationswerkerlohnsatz nach dem höchsten Schwierigkeitsgrad der in der Station durchführbaren Verrichtungen.

²³ Die Entlohnung der Werker in der Fließbandfertigung erfolgt in der Regel leistungsabhängig (Akkordlohn), wobei der Leistungsgrad durch die Leistungsabstimmungen der einzelnen Produktarten determiniert wird. Hieraus ergibt sich, daß die Werkerlohnsätze nicht nur stationsabhängig, sondern auch produktartenabhängig variieren können. Vgl. Ziegler (1990), S. 73 f. Von dieser Möglichkeit wird hier abgesehen.

²⁴ Vgl. auch Zäpfel (1982), S. 187.

sätzen bewerteten Umrüstzeiten.²⁵ Beide Komponenten sind als direkte Umrüstkosten zu charakterisieren, da sie entfallen würden, wenn die Umrüstung nicht durchgeführt würde.²⁶ Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, die monetäre Bewertung von Umrüstzeiten über einen Opportunitätskostenansatz für die während der Umrüstzeit nicht zur Produkterstellung genutzten Betriebsmittel in Form von entgangenen Deckungsbeiträgen vorzunehmen.²⁷ Dies wird jedoch im allgemeinen als problematisch angesehen,²⁸ da in diesem Fall die alternative Verwendung der Betriebsmittel in der Bearbeitung zusätzlicher, nicht dem betrachteten Produktionsprogramm zugehöriger fiktiver Aufträge gesehen werden muß.²⁹ Aufgrund der Willkür³⁰ eines solchen Ansatzes, wird hierauf verzichtet.³¹ Aus der funktionalen Abhängigkeit der Arbeitskosten der Umrüstungen von den Umrüstzeiten leitet sich ab, daß dieser Teil der Loswechselkosten ebenso wie die Umrüstzeiten reihenfolgeabhängig und asymmetrisch ist. Die Arbeitskosten der Umrüstungen stehen in jeder Station zwar in proportionalem Verhältnis zu den zeitlichen Bezugsbasen der betreffenden Station, aufgrund der Möglichkeit von Station zu Station unterschiedlicher Stationslohnsätze steht die Summe der Arbeitskosten der Umrüstungen jedoch nicht in einem proportionalen Verhältnis zu der Summe der Umrüstzeiten über alle Stationen. Darüber hinaus hat die funktionale Abhängigkeit der Summe der Umrüstkosten über alle Stationen von der Summe der Umrüstzeiten über alle Stationen auch nicht notwendigerweise (streng) monotonen Charakter. Die Arbeitskosten der Umrüstungen werden im folgenden als reihenfolgeabhängige Umrüstkosten bezeichnet. Die für den Einsatz von Werkzeugen etc. anfallenden Kosten der Umrüstungen werden als stationsbezogen und von der Reihenfolge unabhängig angenommen und im folgenden als reihenfolgeunabhängige Umrüstkosten bezeichnet. Als Summe aus reihenfolgeabhängigen und reihenfolgeunabhängigen Umrüstkosten sind die Loswechselkosten somit reihenfolgeabhängig und asymmetrisch.

- 20) Der Zeitpunkt des Bandverlassens einer Produkteinheit ist identisch mit dem Zeitpunkt der Fertigstellung der Produkteinheit.
- 21) Die Materialversorgung in den einzelnen Stationen ist nicht Gegenstand des vorliegenden Planungsproblems und ist demnach unabhängig von dessen Lösung immer gewährleistet.³²

²⁵ Vgl. auch Kilger (1973), S. 100, Haase/Göpfert, (1996), S. 1515.

²⁶ Als direkte Kosten oder Einzelkosten sind in der Kostenrechnung nach *Schmalenbach* klassischer Weise und bis heute solche Kosten definiert, die einem Bezugsobjekt direkt zugerechnet werden können, vgl. Friedl (2004), S. 42. Aufgrund des unmittelbaren direkten Kostencharakters sind Einzelkosten auch immer variabel, d. h. variieren in Abhängigkeit von dem Bezugsobjekt (zur Definition von variablen Kosten vgl. Kilger (1987), S. 35). Hiervon abzugrenzen sind Gemeinkosten, die über eine Schlüsselung einem Bezugsobjekt zugerechnet werden, z. B. Abschreibungen einer Maschine, die über einen Maschinenstundensatz einem Produkt zugerechnet werden, vgl. hierzu Fandel et al. (1999), S. 30.

²⁷ Vgl. Tempelmeier (1999), S. 139f, Zäpfel (1982), S. 187, Stefenelli (2000), S. 26.

²⁸ Vgl. Derstroff (1995), S. 23, Zäpfel (1982), S. 187.

²⁹ Vgl. Seelbach (1975), S. 35 f.

³⁰ Vgl. Derstroff (1995), S. 48. Zu der Problematik der monetären Bewertung von Reihenfolgen vgl. auch Söhner (1991), S. 23-25.

³¹ *Zäpfel* schlägt zur Berechnung indirekter Umrüstkosten einen näherungsweisen praxisorientierten Ansatz vor, der einen Mischsatz aus Maschinenstundensatz und Lohnkosten abbildet. vgl. *Zäpfel*, (1982), S. 187. Da zum einen die Arbeitskosten aufgrund des direkten Kostencharakters jedoch bereits über die direkten Umrüstkosten erfaßt werden, und zum anderen für das betrachtete Planungsproblem die Maschinenkosten unabhängig von der Lösung des Problems sind, d. h. keine Entscheidungsrelevanz besitzen (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.1.2.1c v. A.), ist ein solcher Opportunitätskostenansatz hier ebenfalls abzulehnen.

³² Zu dem Zusammenhang zwischen Materialbedarfsrechnung und Losgrößenplanung vgl. Tempelmeier (1999), S. 138f. Die Problematik der Komponentenversorgung der einzelnen Bearbeitungsstationen einer Fließlinie beschreiben *Bollapragada/Akella* (1992). Das Problem der kapazitierten Losgrößenbestimmung der die Fließlinie versorgenden Bauteile betrachtet z. B. *Muckstadt* (1986).

- 22) Mit Ausnahme der fiktiven Anfangs- und Endproduktart 0 unterliegt die Reihenfolge der zu fertigenden Produktlose keinen Vorrangrestriktionen.
- 23) Fehlmengen sind nicht zulässig.
- 24) Die Fertigung eines Loses kann nicht unterbrochen werden, und jedes Los wird nach kompletter Fertigstellung auf dem Fließband in das Endproduktlager weitergereicht (geschlossene Produktion).
- 25) Die Bewertung auftretender Lagerbestände erfolgt anhand von produktartenindividuellen Stücklagerkostensätzen je Zeiteinheit, welche als entgangene Zinserträge für das gebundene Kapital verstanden werden (Opportunitätskosten).³³ Vor Fertigungsbeginn des betrachteten Produktionsprogramms sind die Lagerbestände der Produktarten gleich Null. Werkstattbestände werden nicht berücksichtigt.³⁴
- 26) Sämtliche Modellparameter sind deterministische und diskrete Größen.

2.1.2 Charakterisierung des zu lösenden Planungsproblems

Im folgenden wird das VLSP in Anlehnung an die für das zu Grunde gelegte Produktionssystem getroffenen Annahmen charakterisiert. In Abschnitt 2.1.2.1 wird das Problem selbst näher erläutert und in einem Exkurs von den aus der Literatur bekannten Losgrößen- und Reihenfolgeproblemen abgegrenzt. In Abschnitt 2.1.2.2 wird die zu verfolgende Zielsetzung beschrieben.

2.1.2.1 Problembeschreibung

a) Das VLSP ist einstufig (vgl. Annahmen 5, 6, 7)

Da gemäß Annahme 7) die Bearbeitungsstationen keine Möglichkeit zur Zwischenlagerung bieten und gemäß Annahme 6) Stationen nicht übersprungen oder zweimal durchlaufen werden dürfen, sind nicht nur die Maschinenreihenfolgen sämtlicher Produktlose identisch, sondern ist auch die Losgröße eines Produktloses in allen Stationen gleich groß. Demzufolge können die Bearbeitungsstationen der betrachteten Fließlinie ohne Stationspuffer zu einer Fertigungsstufe zusammengefaßt werden.³⁵

³³Neben den Opportunitätskosten umfassen die Lagerungskosten auch Kosten für Einlagerung, Versicherungen und Pauschalaufschläge (Schwund, Diebstahl, Verderb), sowie Kosten der Lagerverwaltung und des Lagerraums, vgl. Zäpfel (1982), S. 188 f., wobei sich die Kategorisierungen in der Literatur unterscheiden, vgl. z. B. Hoitsch (1993), S. 391 f. Da die Opportunitätskosten jedoch den Hauptteil der Lagerungskosten ausmachen (vgl. auch Schneeweiß (1981), S. 69), ist die hier vorgenommene Definition der Lagerungskosten zur Beschreibung und Lösung vergleichbarer Planungsprobleme verbreitet. Vgl. z. B. Meyer/Hansen (1996), S. 154. Ebenso werden auch von Haase/Göpfert in ihrer praktischen Anwendung die Lagerbestände bewertet, vgl. Haase/Göpfert (1996), S. 1515.

³⁴ Sofern die Bewertung der Lagerbestände mit Opportunitätskosten erfolgt und keine anderweitigen Restriktionen zu berücksichtigen sind (z. B. Lagerkapazitäten), macht es hinsichtlich der Lagerkosten keinen Unterschied, ob das Material (die Produkte) in der Werkstatt oder im Endproduktlager „das Kapitel binden“. Demzufolge haben hier in Kombination mit Annahme 4) die Werkstattbestände keine Entscheidungsrelevanz. Würden Werkstattbestände berücksichtigt, müßte über eine entsprechende Gestaltung der Lagerkostenfunktion sichergestellt werden, daß es für die Lagerkosten nicht relevant sein darf, ob zwei aufeinanderfolgende Aufträge oder Teilaufträge derselben Produktart wie ein zusammengefaßtes Los behandelt werden oder nicht. Vgl. hierzu analog Brüssau (2002), S. 163f.

³⁵ Vgl. Hahn (1972), S. 134, Hahn (1998), S. 7.

b) Das VLSP legt eine losweise Fertigung zu Grunde (vgl. Annahme 4)

Das Planungsproblem basiert auf der Einlastung der Produktarten in Produktlosen (losweise Auflegeform) und beschreibt somit die in der Literatur geprägten, synonym verwendeten Begriffe des Sortenschaltungs-³⁶, Sortenwechsel-³⁷ oder Sortenreihenfolgeproblems³⁸, welches in den wechselbedingten Leistungsausfällen der Potentialfaktoren besteht.³⁹ In der Literatur wird die Sortenproduktion von der Serienproduktion häufig noch unterschieden, wobei die genaue Abgrenzung einer Sorte nicht einheitlich ist.⁴⁰ Das gemeinsame Kriterium der verschiedenen Definitionsvorschläge⁴¹ besteht in der Charakterisierung der Sortenproduktion als Herstellung von „Varianten eines Grundproduktes“,⁴² wobei unter Varianten eines Grundproduktes Produkte verstanden werden, die aus denselben Rohstoffen hergestellt werden und sich z. B. bezüglich der zu ihrer Herstellung verwendeten Herstellungstechnik und/oder ihrer Konstruktion nur geringfügig unterscheiden.⁴³ Entscheidend für die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sind - unabhängig von begrifflichen Feinheiten - die in Kapitel 1 beschriebene gemeinsame Fertigung der verschiedenen Produktarten und die damit verbundene Verursachung von Loswechselzeiten und -kosten. Die Begriffe der Serien- und der Sortenfertigung werden daher in vorliegender Arbeit synonym verwendet.

In dem begrifflichen Zusammenhang der Fertigung von „Varianten eines Grundproduktes“ ist von der betrachteten Produktionssituation jedoch die sogenannte „Variantenfließfertigung“ abzugrenzen. Bei der Variantenfließfertigung erfolgt die Einlastung der Produktarten in gemischter Auflegeform, d. h., daß die Varianten des Grundproduktes beliebig wechselnd aufgelegt werden und zwischen den Produktarten keine Umrüstvorgänge notwendig bzw. vernachlässigbar sind.⁴⁴ Bei der gemischten Auflegeform besteht das Reihenfolgeproblem darin, daß Leerzeiten in solchen Stationen entstehen, denen im Rahmen der Leistungsabstimmung für eine Variante ein kleinerer zeitlicher Arbeitsvorrat zugewiesen wurde als für eine andere, da im Gegensatz zur losweisen Fertigung die Ermittlung eines für alle Produktarten einheitlichen Durchschnittsauflegeintervalls erforderlich ist.⁴⁵ Im Gegenzug besteht allerdings die Möglichkeit, mit Hilfe verschiedener Glättungsverfahren die quantitativen Kapazitäten der einzelnen Stationen kurzfristig im Rahmen der Reihenfolgeplanung durch den Einsatz von sogenannten Springern zu modifizieren.⁴⁶

Die Variantenfließfertigung wird auch als Grenzfall der Losfertigung mit der „Losgröße 1“ bezeichnet. Eine Übertragung der Problemstellung ist jedoch für eine adäquate Behandlung des Problems aufgrund der beschriebenen, unterschiedlich gelagerten Problematik nicht sinnvoll. (So wird z. B. in einem Ansatz zur Reihenfolgeplanung bei Mehrprodukt-Linienfertigung von *Felbecker* angegeben, daß der Produktwechsel gemischt oder losweise erfolgen

³⁶ Vgl. Müller-Merbach (1962), S. 26.

³⁷ Vgl. Dinkelbach (1964), S. 13.

³⁸ Vgl. Adam (1969), S. 117.

³⁹ Vgl. Gutenberg (1983), S. 203.

⁴⁰ *Steffen* definiert eine Sorte als „Massenerzeugnisart“, vgl. *Steffen* (1996), Spalte 26. *Kilger* bezeichnet die Sortenproduktion als Spezialfall der Serienfertigung, in welchem sich „[die Erzeugnisse] nur relativ wenig voneinander unterscheiden und in großen Mengen erstellt werden“, vgl. *Kilger* (1973), S. 383.

⁴¹ Vgl. auch *Adam* (1969), S. 26-28.

⁴² Vgl. auch *Gutenberg* (1983), S. 109 f., *Domschke/Scholl/Voß* (1997), S. 6.

⁴³ Vgl. *Kistner/Rogalski* (1995), S. 290.

⁴⁴ Vgl. z. B. *Felbecker* (1980), S. 3, *Ziegler* (1990), S. 7, *Mollemeier* (1997), S. 6, *Domschke/Scholl/Voß* (1997), S. 184 f. Im Englischen wird in der Regel die Variantenfließfertigung als mixed-model-assembly-line und die Losfließfertigung als multi-model-assembly-line bezeichnet, vgl. *Domschke/Scholl/Voß* (1997), S. 185. (Ausnahme: z. B. *Kim/Hyun/Kim* (1996), S. 1131).

⁴⁵ Vgl. *Koether* (1986), S. 22-24, *Hackstein/Felbecker* (1981), S. 77.

⁴⁶ Hierdurch entstehen jedoch zusätzliche Kosten, da der Springerlohnsatz eines flexibel einsetzbaren Springers aufgrund der höheren Qualifikation anzunehmenderweise über dem Werkerlohnsatz liegt, vgl. *Ziegler* (1990), S.10.

kann, wobei die reihenfolgeabhängigen Umrüstzeiten jedoch vernachlässigt und die reihenfolgeunabhängigen in die Bearbeitungszeiten integriert werden.⁴⁷ Da faktisch keine losweise Auflegung betrachtet wird,⁴⁸ werden auch keine Lagerkosten berechnet.⁴⁹ Die Übertragung des Problems für die losweise Fertigung erscheint also wenig zweckmäßig.)

c) Das VLSP ist kapazitiert und kurzfristig (vgl. Annahmen 2, 3)

Die Beschränkung des Planungszeitraums auf bis zu einem Jahr charakterisiert das betrachtete Planungsproblem als kurzfristiges Planungsproblem.⁵⁰ Der theoretische Auslastungsgrad der zeitlichen Kapazität ist durch den Planungszeitraum und durch das Produktionsprogramm gegeben und kann nicht Gegenstand des vorliegenden Entscheidungsproblems sein. Die realisierte Auslastung der Linie läßt sich aufgrund der reihenfolgeabhängigen Loswechselzeiten erst nach der Lösung des Planungsproblems bestimmen.⁵¹ Es wird also angenommen, daß die zeitliche Auslastung der Linie einer gegebenen Problem Instanz so bemessen ist, daß zulässige Ablaufpläne erzeugt werden können.⁵²

d) Das VLSP ist dynamisch (vgl. Annahmen 3, 4)

Aufgrund der im Planungszeitraum schwankenden Bedarfsmengen ist das VLSP ein dynamisches Planungsproblem.⁵³ Bei der Behandlung dynamischer Losgrößen- und Reihenfolgeprobleme wird der Planungszeitraum im allgemeinen in Perioden gleicher Länge unterteilt, und die Einlastung der Produktlose erfolgt anhand der Entscheidung, ob eine Produktart in einer Periode hergestellt werden soll oder nicht.⁵⁴ Beim VLSP wird auf eine solche ex ante Unterteilung des Planungszeitraums in Perioden gleicher Länge verzichtet. Anstelle der Frage, ob eine Produktart in einer Periode hergestellt wird oder nicht, muß beim VLSP entschieden werden, welche Produktart jeweils nach der Fertigstellung der zuvor aufgelegten Produktart unter Berücksichtigung asymmetrischer Loswechselkosten und -zeiten aufgelegt

⁴⁷ Vgl. Felbecker (1980), S. 30, 71.

⁴⁸ Auch Koether ordnet den Ansatz von Felbecker denjenigen zu, welche von einer gemischten Auflage ausgehen, vgl. hierzu Koether (1986), S. 20.

⁴⁹ Überhaupt lehnt Felbecker eine kostenorientierte Betrachtung ab. Vgl. in diesem Zusammenhang Felbecker (1980), S. 72-76. In Abgrenzung zu der hier betrachteten Produktionssituation betrachtet Felbecker zudem explizit keine Linienfertigung mit Zeitzwang, vgl. Felbecker (1980), S. 30, 50.

⁵⁰ Vgl. z. B. Heinen (1991), S. 24, Kern (1992), S. 73, Bronner (2001), S. 8.

⁵¹ Vgl. auch Haase/Göpfert (1996), S. 1515.

⁵² Vgl. auch Drexl/Kimms/Jordan (1998), S. 549. Der zeitliche Auslastungsgrad einer Linie (mit Stationspuffern) in Folge von Umrüstungen wird von Schilling/Brandes untersucht. Schilling/Brandes berücksichtigen hierbei zwar explizit die Taktzeitunterschiede der aufzulegenden Produkteinheiten, unterstellen jedoch einen für alle Produktarten einheitlichen Zyklus, vgl. Schilling/Brandes (1985). Völkel hat den zeitlichen Auslastungsgrad infolge von Umrüstungen dahingehend modifiziert, daß die Wechsel innerhalb des im Laufe des Planungszeitraums immer wiederholten Produktionszyklus in einer bereits vorher zu bestimmenden Reihenfolge erfolgen, vgl. Völkel (1990), S. 69-72.

⁵³ Losgrößen- und Reihenfolgeprobleme mit unendlichem Planungshorizont und statischer (meist zyklischer) Bedarfsstruktur und somit konstanten Lagerabgangsraten, in der englischsprachigen Literatur als ELSP (Economic Lot Scheduling Problem) bezeichnet, werden bei Salveson (1955/56), Rogers (1958), Magee/Boodman (1967), Naddor (1961), Müller-Merbach (1962), Eilon (1962), Maxwell (1962) betrachtet. Ein Überblick über das ELSP und seine Erweiterungen findet sich bei Elmaghraby (1978). Eine „Sonderrolle“ kam seinerzeit dem Ansatz Maxwells zu, der – aufgrund des unendlichen Planungshorizonts und konstanter Lagerabgangsraten zwar immer noch zu den statischen Problemen zugehörig – als „Bindeglied zwischen den Modellen, die mit dem Begriff des Produktionszyklus und der Losgrößenformel arbeiten und [...] denen, die aufgrund ihrer Periodeneinteilung die Begriffe Zyklus und Losgrößenformel völlig verworfen haben [...]“ zu sehen ist, vgl. Dinkelbach (1964), S. 55. Neuere Varianten des ELSP finden sich bei Dobson (1992), Zipkin (1991).

⁵⁴ Die Menge in der Literatur behandelten dynamischen Losgrößen- und Reihenfolgeprobleme ist sehr umfangreich und vielfach diskutiert. Auf eine ausführliche Behandlung dieser Probleme kann hier verzichtet werden. Die verschiedenen Ansätze werden in diesem Abschnitt kurz in einem Exkurs vorgestellt und von dem VLSP abgegrenzt.

wird. Der Verzicht auf die ex ante Einteilung des Planungszeitraums in Teilperioden ist strukturell vorteilhaft, da bei der Erfassung der Zugehörigkeit bzw. der Nicht-Zugehörigkeit jedes Produktloses zu den Teilperioden die Anzahl der redundanten Entscheidungsvariablen ganz erheblich ist.⁵⁵

e) Das VLSP wird in zwei Ausprägungen untersucht: Gruppierung von externen Aufträgen und Zerlegung der externen Aufträge in Teilaufträge (vgl. Annahme 4)

Gemäß Annahme 4) kann ein Fertigungslos durch Gruppierung externer Aufträge oder Teilaufträge, hinter denen dieselbe Produktart steht, erfolgen. Der erste Fall entspricht dem im folgenden als *Spezialfall* des VLSP bezeichneten Problem, bei dem ein Fertigungslos durch die Gruppierung oder Nicht-Gruppierung zweier oder mehrerer externer Kundenaufträge über dieselbe Produktart gebildet wird. Der zweite Fall entspricht dem im folgenden als *allgemeiner Fall* des VLSP bezeichneten Problem, bei dem die externen Kundenaufträge zunächst in Teilaufträge zerlegt werden, und durch Gruppierung der Teilaufträge jeweils ein Fertigungslos entsteht. Die zusätzliche Variabilität des allgemeinen Falls gegenüber der des Spezialfalls besteht also darin, daß die Losgrößenentscheidungen nicht an mehr oder weniger gruppierte externe Auftragsmengen gebunden sind, sondern auch eine Teilmenge des zu einem späteren externen Auftrages bestehenden Bedarfs zu einem Zeitpunkt gefertigt werden kann, zu dem die zeitlich begrenzte Kapazität das Gruppieren der kompletten externen Auftragsmengen der betrachteten Kundenaufträge nicht zuläßt. Im Rahmen der formalen Beschreibung in Kapitel 3 wird gezeigt, daß die Modelle zur formalen Beschreibung des Spezialfalls (VLSPS) und des allgemeinen Falles (VLSPA) ineinander überführbar sind.

f) Das VSLP wird als simultanes Problem behandelt (vgl. Annahme 4)

Die Betrachtung des Losgrößen- und des Reihenfolgeproblems kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Weisen erfolgen, entweder sequentiell oder simultan. Im Falle der sequentiellen Vorgehensweise⁵⁶ wird erst das eine der beiden Teilprobleme gelöst und daraufhin, ausgehend von den Ergebnisdaten aus der Lösung des ersten Teilproblems, die Lösung für das zweite Teilproblem ermittelt. In der Regel wird bei der sequentiellen Vorgehensweise zuerst das Reihenfolgeproblem gelöst, da für eine exakte Lösung des Problems der optimalen Losgrößen im Falle der Berücksichtigung von Reihenfolgen bekannt sein muß, welche der möglichen reihenfolgeabhängigen Umrüstzeiten und -kosten einschlägig sind.⁵⁷ Hierbei generiert die Lösung des Reihenfolgeproblems einen gleichförmigen Produktionszyklus,⁵⁸ indem unterstellt wird, daß jede Produktart nur einmal im Planungszeitraum aufgelegt wird. Dieses Reihenfolgeproblem kann als Rundreiseproblem (Travelling-Salesman-Problem=TSP) formuliert werden, wobei die Produktarten den Knoten und die reihenfolgeabhängigen Umrüstzeiten

⁵⁵ Vgl. auch Drexl/Kimms/Jordan (1998), S. 548.

⁵⁶ Vgl. auch im folgenden Strobel (1964), S. 245-248.

⁵⁷ Vgl. z. B. Young (1967), S. 72 f. Von dieser Methodik abweichend schlagen Dilts/Ramsing ein erst das Losgrößenproblem lösendes Verfahren vor, wobei die zur Lösung des Losgrößenproblems notwendigen reihenfolgeabhängigen Rüstkosten geschätzt werden, und nach Lösung des Losgrößenproblems das Reihenfolgeproblem erneut gelöst wird, vgl. Dilts/Ramsing (1989).

⁵⁸ Ein gleichförmiger Zyklus ist dadurch charakterisiert, daß nach jeder Auflegung einer Produktart erst alle anderen dem betrachteten Produktionsprogramm angehörigen Produktarten genau einmal aufgelegt werden müssen, bevor die einmal aufgelegte Produktart erneut aufgelegt werden kann. Vgl. Strobel (1964), S. 247. Strobel schreibt weiter, daß die zyklische Auflegeform nicht notwendigerweise gleichförmig sein muß, eine hiervon abweichende Zyklusform unterstellt jedoch, daß die Losgrößen je Produktart im Zeitablauf konstant sind, was einen deutlichen Nachteil gegenüber einem gleichförmigen Zyklus darstellt, zumal auch bei Nichteinhaltung der Gleichförmigkeit ohne exakte simultan-analytische Vorgehensweise nicht alle möglichen Zyklen erfaßt werden (Strobel (1964), S. 247 f.).

oder Umrüstkosten, je nach verfolgter Zielsetzung, den Bewertungen der Pfeile entsprechen. Die Rundreise durch alle Knoten wird durch Hinzufügen einer fiktiven Produktart erreicht, deren auslaufende Pfeile die Einrüstung der jeweiligen Produktart und deren einlaufende Pfeile die Ausrüstung der jeweiligen Produktart abbilden. Der nach Lösung des Reihenfolgeproblems generierte Produktionszyklus über alle Produktlose wird dann zur Lösung des Losgrößenproblems wie eine Produktart behandelt. Übertragen auf die Struktur des TSP bedeutet dies nichts anderes als die Festlegung, wie häufig die einmal erzeugte Rundreise durchlaufen werden muß. Die jeweilige Dauer eines Durchlaufs hängt von den reihenfolgeabhängigen Umrüstzeiten und den „an den Knoten“ anfallenden Bearbeitungszeiten ab, die von der Losgröße bestimmt werden. Demnach kann das Zyklusintervall durch Veränderungen der Losgrößen variieren.⁵⁹ Diese Vorgehensweise entspricht der Festlegung dynamischer Losgrößen für den (übertragenen) Einproduktfall.

Im Falle der simultanen Vorgehensweise hingegen wird der Variablencharakter der variablen Größen beider Teilprobleme während des Lösungsprozesses nicht frühzeitig aufgehoben. Da eine adäquate Behandlung des Planungsproblems erst durch diese Integration der Reihenfolgeplanung in die Losgrößenplanung in einem Simultanmodell gegeben ist,⁶⁰ wird das zu lösende Planungsproblem als Simultanmodell formuliert. Im Rahmen der formalen Modellbeschreibung wird in Kapitel 3 gezeigt, wie die beiden Ausprägungen des VLSP bei simultaner Betrachtung als verallgemeinerte Zuordnungsprobleme abgebildet werden können.

Exkurs: Kapazitierte, dynamische Losgrößen- und Reihenfolgeplanungsprobleme und Abgrenzung zum VLSP

Die in der Literatur betrachteten dynamischen Ansätze zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung werden grundsätzlich in zwei Gruppen gegliedert: die erste Gruppe umfaßt solche Ansätze, welche den Planungszeitraum in relativ große Teilintervalle gliedern und häufig auf eine Reihenfolgebestimmung innerhalb der Teilperioden verzichten. In der englischsprachigen Literatur werden diese Probleme als CLSP (Capacitated-economic-lot-sizing-problem) bezeichnet.⁶¹ Die zweite Gruppe beschreibt diejenigen Ansätze, welche die Teilperioden derart kurz stecken,⁶² daß in jeder Teilperiode nur ein Vorgang (Bearbeitung, Umrüstung, Stillstand) stattfindet und somit konkludent eine Reihenfolgefestlegung erfolgt. In der englischsprachigen Literatur werden diese Probleme als DLSP (Discrete-lotsizing-and-scheduling-problem) bezeichnet.⁶³ Auch wenn beide Gruppen Planungsprobleme mit einem Planungszeitraum von bis zu einem Jahr behandeln, wird die erste Gruppe in der Literatur auch als Gruppe der mittelfristigen und die zweite Gruppe als Gruppe der kurzfristigen Ansätze bezeichnet,⁶⁴ wobei in diesem Kontext als kurzfristig solche Planungsprobleme, die einen Planungszeitraum ≤ 3 Monate, und als mittelfristig solche Planungsprobleme angesehen werden, die einen

⁵⁹ Vgl. hierzu auch Strobel (1964), S. 247.

⁶⁰ Vgl. bereits Salveson (1955/56), S. 247, Strobel (1964), S. 244, Haase (1996), S. 51.

⁶¹ Vgl. z. B. Maes/Van Wassenhove (1988), S. 991, Hindi (1996), S. 151 f., Barany/Van Roy/Wolsey (1984), S. 1255, Derstroff (1995), S. 26, 31 f., vgl. auch Fleischmann (1990), S. 339, Fleischmann (1994), S. 395. Ein Abriss über die Entwicklung des CLSP in der Literatur bis 1992 findet sich bei Diaby et al. (1992), S. 1329 f.

⁶² Bereits der frühe Ansatz von Adam beschreibt anhand der Unterteilung des Planungshorizonts in entsprechend kurze Intervalle genau, zu welchem Zeitpunkt im Produktionsverlauf welche Produktart in Bearbeitung geht, allerdings wird die Relevanz der Umrüstvorgänge vernachlässigt, vgl. Adam (1963). Die Berücksichtigung des Problems der Sortenschaltung erfolgt erstmalig bei Dinkelbach und später bei Adam, vgl. Dinkelbach (1964), Adam (1969).

⁶³ Vgl. z. B. Haase/Göpfert (1996), S. 1515. Das DLSP geht zurück auf einen Ansatz von Ladson/Terjung, vgl. Ladson/Terjung (1971).

⁶⁴ In Anlehnung an Haase/Göpfert, vgl. Haase/Göpfert (1996), S. 1515.

Planungszeitraum > 3 Monate und ≤ 1 Jahr zu Grunde legen.⁶⁵ Aus beiden Problemgruppen haben sich Erweiterungen und Überleitungen entwickelt.

Erweiterungen des CLSP, welche Reihenfolgebeziehungen berücksichtigen, finden sich bei *Trigeiro/Thomas/McClain*, *Derstroff*, *Helber*, *Küpper/Helber*, *Diaby et al.*⁶⁶ Eine Überleitung von den CLSP zu den DLSP, stellt das CSLP (single-level-continuous-setup-lot-sizing-problem) dar.⁶⁷ Bei ansonsten gleichen Annahmen wie beim CLSP darf je Teilperiode nur eine Produktart hergestellt werden, und der Rüstzustand des Betriebsmittels wird von Teilperiode zu Teilperiode gespeichert. D. h., daß Umrüstungsvorgänge immer nur zu Beginn einer ununterbrochenen Serie von Produktionsperioden für eine Produktart erforderlich sind (batch sequencing). Die Teilperioden können beim CSLP jeweils aus Nutzungs- und Leerzeit bestehen. Aus genau diesem Grund, die nicht genutzte Zeit in der letzten der aufeinanderfolgenden, dieselbe Produktart herstellenden Perioden möglichst gering zu halten, werden die Periodenlängen beim CSLP deutlich kürzer gewählt als beim CLSP.⁶⁸ Nach *Derstroff* entspricht das CSLP dem ersten simultanen Ansatz, da die Reihenfolge bei Periodenwechsel entscheidend ist.⁶⁹ Die Berücksichtigung von Umrüstzeiten - allerdings als Fixum je Umrüstvorgang - findet sich bei *Gopalakrishnan/Miller/Schmidt*.⁷⁰ Die Abbildung sequenzabhängiger Rüstkosten zeigen *Karmarkar/Schrage*.⁷¹

Das auf *Ladson/Terung* zurückgehende DLSP unterscheidet sich vom CSLP dadurch, daß die einzelnen Perioden entweder vollkommen zur Fertigung einer Produktart oder zur Umrüstung von einer Produktart auf eine andere oder gar nicht genutzt werden ("All or nothing production").⁷² Der Vorteil des DLSP besteht darin, daß angefangene Periodenkapazitäten voll genutzt werden. Der Vorteilhaftigkeit der Vermeidung von Leerzeiten innerhalb einer Teilperiode steht bei dem DLSP entgegen, daß die Teilperioden sehr kurz gesteckt werden müssen, um für alle Produktarten gewährleisten zu können, daß die Losgröße eines Produktes mit dessen Bearbeitungszeit (im Falle der Fließbandfertigung der Taktzeit) multipliziert immer ein ganzzahliges Vielfaches der Periodenlänge sein muß.⁷³

Eine Erweiterung des DLSP stellen das auf *Haase*⁷⁴ zurückgehende PLSP (proportional-lot-sizing-and-scheduling) und das ebenfalls von *Haase*⁷⁵ vorgestellte CLSD (capacitated lot-sizing with sequence dependent setup-costs) dar. Das PLSP läßt in jeder Teilperiode neben der Fertigung auch maximal einen Umrüstvorgang zu, dieser muß jedoch anders als beim CSLP nicht notwendigerweise am Periodenanfang stattfinden. Eine Umrüstzeiten berücksichtigende Verallgemeinerung des PLSP findet sich bei *Haase*⁷⁶ und bei *Drexel/Haase*⁷⁷, wobei auf die

⁶⁵ Nach *REFA* kann ein kurzfristiger Planungszeitraum als „kleiner 3 Monate“ oder als „kleiner 1 Jahr“ und ein mittelfristiger Zeitraum als „größer 3 Monate“ oder als „1-2 Jahre“ definiert werden, vgl. *REFA*(1991), S. 26.

⁶⁶ Vgl. *Trigeiro/Thomas/McClain* (1989), *Derstroff* (1995), S. 48, *Helber* (1994), S. 31-34, *Küpper/Helber* (1995), S. 159-164, *Diaby et al.* (1992), S. 1331 f.

⁶⁷ Vgl. z. B. *Salomon et al.* (1991), 801 f.

⁶⁸ So bezeichnen *Salomon et al.* das CLSP in der Abgrenzung zum DLSP und zum CSLP als „großperiodig“, vgl. *Salomon et al.* (1991), S. 802. Vgl. auch *Derstroff* (1995), S. 50.

⁶⁹ Vgl. *Derstroff* (1995), S. 49-53.

⁷⁰ Vgl. *Gopalakrishnan/Miller/Schmidt* (1995).

⁷¹ Vgl. *Karmarkar/Schrage* (1985), S. 329 f.

⁷² Vgl. z. B. *Derstroff* (1995), S. 50.

⁷³ In allgemeiner Form wird das DLSP von *Fleischmann* beschrieben, vgl. *Fleischmann* (1990). *Catrysse et al.* berücksichtigen produktartenindividuelle aber nicht sequenzabhängige Rüstkosten, vgl. *Catrysse et al.* (1993). Reihenfolgeabhängige Rüstkosten werden bei *Schrage* und von *Fleischmann* berücksichtigt, *Schrage* (1982), *Fleischmann* (1994).

⁷⁴ Vgl. *Haase* (1994), S. 26 f. Ein Vergleich des PLSP in Abgrenzung zum DLSP und zum CSLP findet sich bei *Drexel/Haase* (1996).

⁷⁵ Vgl. *Haase* (1996), S. 53.

⁷⁶ Vgl. *Haase* (1994), S. 31-33.

⁷⁷ Vgl. *Drexel/Haase* (1995), S. 80-82.

Erfassung der Reihenfolgeabhängigkeit wieder verzichtet wird. Das CLSD stellt eine Erweiterung des PLSP dar, bei der die Anzahl der Umrüstvorgänge je Teilperiode nicht auf eins und somit die Anzahl der je Teilperiode gefertigten Produktarten nicht auf zwei beschränkt ist. Umrüstzeiten werden nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung sowohl von reihenfolgeabhängigen Umrüstzeiten als auch -kosten erfolgt in dem von *Salomon et al.*⁷⁸ vorgestellten DLSPSD (Discrete-lotsizing-and-scheduling-problem with sequence-dependent set-ups).⁷⁹ Eine weitere Modifikation des DLSP stellt das BSP (Batch Sequencing-Problem) dar, bei welchem aufeinanderfolgende Aufträge eines Produkts gruppiert, d. h. zu Losen zusammengefaßt werden. Für die resultierenden Lose wird dann das Reihenfolgeproblem gelöst.⁸⁰ Ein früherer Ansatz des BSP findet sich bei *Bruno/Downey*⁸¹. *Jordan*,⁸² *Drexl/Jordan*⁸³ und *Drexl/Kimms/Jordan*⁸⁴ haben das BSP weiterentwickelt, bis hin zu einem sich von der „klassischen diskreten Struktur“, den Planungshorizont in kurze Zeitintervalle zu unterteilen, vollkommen gelösten Modell zur simultanen Bestimmung der optimalen Gruppierung und Reihenfolge. Ebenso wie beim DLSP handelt es sich bei dem BSP um einen für kurzfristige Planungsaufgaben konzipierten Ansatz.⁸⁵ Der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen liegt nicht in der untersuchten Problemstellung, sondern in der Definition der Entscheidungsvariablen.⁸⁶

Bezug nehmend auf die erläuterten Planungsansätze verbindet das VLSP eine kostenorientierte Reihenfolge- und Losgrößenbestimmung durch adäquate Erfassung beider Kostenelemente in der Zielfunktion. Ohne Berücksichtigung der Besonderheiten des Produktionsvollzugs des dem VLSP zu Grunde liegenden Produktionssystems der getakteten Fließlinienfertigung, ist das VLSP strukturell am ehesten mit dem BSP zu vergleichen, da beim BSP ebenso wie beim VLSP keine ex ante Einteilung des Planungszeitraums in Teilperioden erfolgt, sondern die einzelnen Aufträge der Produktarten auf einem Vektor angeordnet und zu Losen gruppiert werden. Die Auftragsgruppierung beim BSP entspricht der zuvor beschriebenen speziellen Ausprägung des VLSP. Auch beim BSP werden die Lagerkosten für fertiggestellte Aufträge in adäquater Weise berücksichtigt. Dies ist bei den aus der Literatur bekannten Ansätzen nicht immer gegeben, da auch bei denjenigen Ansätzen, welche den Planungszeitraum ex ante in relativ weite Teilperioden stecken, die Lagerbestände der während einer Teilperiode gefertigten Lose unabhängig von ihrem Fertigstellungszeitpunkt vor Erreichen des Teilperiodenendes lediglich in dem nach Bedarfsabzug für die betrachtete Periode verbleibenden Umfang am Periodenende t für den Zeitraum bis zum Erreichen des nächsten Zeitpunktes $t+1$ berücksichtigt werden.⁸⁷ Diese im Rahmen der die Teilperioden sehr kurz steckenden Ansätze vertretbare Erfassung und Bewertung der Lagerbestände verfälscht die tatsächlichen Lagerkosten bei längeren Teilperioden.⁸⁸ Die Bewertung des am Periodenende

⁷⁸ Vgl. Salomon et al. (1997).

⁷⁹ Auch *Haase/Göpfert* zeigen anhand eines praktischen Beispiels die Notwendigkeit der Berücksichtigung reihenfolgeabhängiger Umrüstzeiten, vgl. *Haase/Göpfert* (1996).

⁸⁰ Vgl. hierzu *Brüggemann* (1995), S. 218. Dieses Prinzip wird in der 2-Phasen-Methodik von *Jordan* verdeutlicht, vgl. z. B. *Jordan* (1998), S. 747-751.

⁸¹ Vgl. *Bruno/Downey* (1978), S. 393 ff.

⁸² Vgl. *Jordan* (1996), (1998).

⁸³ Vgl. *Jordan/Drexl* (1998), die im wesentlichen eine Zusammenfassung von *Jordan* (1996) liefern.

⁸⁴ Vgl. *Drexl/Kimms/Jordan* (1998).

⁸⁵ Vgl. *Jordan* (1996), S. 4.

⁸⁶ Vgl. *Jordan/Drexl* (1998), S. 701-705, *Salomon et al.* (1997), S. 495 f.

⁸⁷ Vgl. z. B. *Maes/Van Wassenhove* (1988), S. 991, *Trigeiro/Thomas/McClain* (1989), S. 355, *Diaby et al.* (1992), S. 1331, *Hindi* (1996), S. 151, *Gopalakrishnan/Miller/Schmidt* (1995), S. 1977, *Helber* (1994), S. 32, *Küpper/Helber* (1995), S. 161 f., *Haase*, (1994), S. 27, *Haase*, (1996), S. 53, vgl. auch den fallspezifischen Ansatz in *Van Wassenhove/Vanderhenst* (1983), S. 133 ff.

⁸⁸ Dieser Auffassung sind *Kim/Mabert* allerdings auch für Ansätze, welche die Teilperioden sehr kurz stecken. Die Berechnung der Lagerkosten beziehen sie aus diesem Grund auf durchschnittliche statt auf die jeweils zum Periodenende verbleibenden Lagerbestände, vgl. *Kim/Mabert* (1995), S. 2008 f.

bis zu dem nächsten Bedarfszeitpunkt verbleibenden Lagerbestandes einer jeden Produktart ist im Rahmen der Berechnung der Lagerkosten zwar notwendig aber nicht hinreichend.

Ende Exkurs.

2.1.2.2 Zielsetzung

Im allgemeinen werden in der Produktionsvollzugs- oder Ablaufplanung eine zeit- oder eine kostenorientierte Zielsetzung verfolgt. Die am häufigsten betrachteten zeitorientierten Zielsetzungen in der Ablaufplanung sind die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit⁸⁹ (Summe der Durchlaufzeiten aller Fertigungsaufträge) und die Minimierung der Zykluszeit (maximale Durchlaufzeit aller Fertigungsaufträge).⁹⁰ Sind die Bearbeitungszeiten von der Reihenfolge unabhängig und über den Planungszeitraum konstant, dann entspricht die Zielsetzung „Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit“ einer „Minimierung der Wartezeiten (bezogen auf die Aufträge)“ und die Zielsetzung „Minimierung der Zykluszeit“ einer „Minimierung der Leerzeiten (bezogen auf die Potentialfaktoren)“.⁹¹ Die kostenorientierte Zielsetzung besteht in der Minimierung der entscheidungsrelevanten Kosten. Im allgemeinen zählen zu den entscheidungsrelevanten Kosten der Produktionsdurchführung Einrichtekosten (Rüst- und Anlaufkosten), Leerkosten, Zwischen- und Endlagerkosten und Anpassungskosten, die durch das Über- und Unterschreiten von einzuhaltenden Terminen entstehen.⁹²

Für das VLSP entspricht einer zeitorientierten Zielsetzung die Minimierung der gemäß Annahme 13) beschriebenen Loswechselzeiten, unter Abzug der darin enthaltenen Bearbeitungszeiten. Bei Verfolgung einer kostenorientierten Zielsetzung sind zum einen die in Annahme 19) beschriebenen Loswechselkosten, und zum anderen die in Annahme 25) beschriebenen Lagerungskosten der Produkteinheiten als entscheidungsrelevant zu betrachten. Eine Bewertung derjenigen Leerzeiten der Betriebsmittel, welche nicht auf die Umrüstungen, sondern auf gegebenenfalls nicht ausgelastete Kapazitäten entfallen, hat aufgrund des gegebenen Produktionsprogramms keine Entscheidungsrelevanz.⁹³ Anlaufkosten werden aufgrund konstanter

⁸⁹ Vgl. Ziegler (1990), S. 61.

⁹⁰ Zu diesen und weiteren zeitorientierten Zielsetzungen vgl. Mollemeier (1997), S. 33 f., Seelbach (1975), S. 32-39, Dorninger et al. (1990), S. 311-312, Domschke/Scholl/Voß (1997), S. 26-28, Troßman (1996), Spalte 13. Ziegler zeigt auf, daß die Gesamtdurchlaufzeit in dem Fertigungssystem der Variantenfließfertigung für eine gegebene Auslegung der Fließlinie und gegebenem Auflegeintervall von der Reihenfolge der Produkteinheiten unabhängig ist, vgl. Ziegler (1990), S. 61-63. Diese für die Variantenfließfertigung zutreffenden Ausführungen sind nicht auf die losweise Auflegeform übertragbar.

⁹¹ In zeitorientierten Problemen, welche eine „Minimierung der Durchlaufzeiten“ anstreben, wird die Reihenfolgeabhängigkeit häufig über eine separate Erfassung der produktartenindividuellen Aufrüst-, Bearbeitungs-, und Abrüstzeiten erfaßt (deutsche Übersetzung in Anlehnung an Kratschmer (1987), S. 152), indem bei jedem Produktwechsel zwischendurch auf den neutralen Maschinenzustand (Produktart 0) abgerüstet und erst dann auf die nächste Produktart aufgerüstet wird. Vgl. Sule (1982), S. 518, Sule/Huang (1983), S. 724, Proust et al. (1988), S. 457, Proust/Gupta/Deschamps (1991), S. 482. Da bei dieser Vorgehensweise die benötigte Zeit für das Abrüsten von einer Produktart ebenso unabhängig von der auf den neutralen Maschinenzustand folgenden Produktart ist, wie die für das Aufrüsten benötigte Zeit von der dem neutralen Maschinenzustand vorangegangenen Produktart, ist die Summe über alle produktartenindividuellen Umrüstzeiten unabhängig von der Reihenfolge immer gleich. Vgl. hierzu auch Proust/Gupta/Deschamps (1991), S. 480, 484, Pinedo (1995), S. 48. Die Verfolgung der Zielsetzung Minimierung der Zykluszeit bei separater Erfassung der Auf- und Abrüstzeiten kann somit erst - analog zur Vernachlässigung von Rüstzeiten oder zu deren Integration in die Bearbeitungszeiten - in der mehrstufigen Fertigung überhaupt sinnvoll sein, vgl. Proust/Gupta/Deschamps (1991), S. 480.

⁹² Vgl. Zäpfel (1982), S. 186. Zudem können auch die variablen Produktionskosten entscheidungsrelevant sein, wenn sie sich im Zeitablauf ändern, wie beispielsweise bei der Berücksichtigung von Saisonrabatten. Vgl. hierzu Domschke/Scholl/Voß (1997), S. 71 f., Derstroff (1995), S. 23.

⁹³ Vgl. hierzu Argumentation zu Annahme 19) in Abschnitt 2.1.1 v. A.

Losgrößenunabhängiger Taktzeiten (Annahme 11) nicht berücksichtigt.⁹⁴ Anpassungskosten i. S. von Terminüberschreitungskosten treten nicht auf, da Fehlmengen nicht zulässig sind (Annahme 23). Anpassungskosten in Form von Terminunterschreitungskosten werden über die dadurch induzierten Lagerkosten erfaßt.

Eine zeitorientierte und eine kostenorientierte Zielsetzung führen dann zu denselben Ergebnissen, wenn die entscheidungsrelevanten Kosten in direkt proportionalem Verhältnis zu den zeitlichen Bezugsbasen stehen. Bei den Loswechselkosten liegt zum einen kein direkt proportionales Verhältnis zu den zeitlichen Bezugsbasen vor, weil die reihenfolgeabhängigen Umrüstkosten (Bestandteil der Loswechselkosten) zwar in einer funktionalen, aufgrund der Möglichkeit unterschiedlicher Stationslohnsätze jedoch nicht notwendigerweise (streng) monotonen (und somit auch nicht proportionalen) Abhängigkeit von den Umrüstzeiten (Bestandteil der Loswechselzeiten) stehen.⁹⁵ Zum anderen können durch eine adäquate Berücksichtigung der Auflegeintervalle aufeinanderfolgender Produktarten Loswechselzeiten reduziert werden, deren Reduzierung sich nicht auf die im Rahmen der Berechnung der Loswechselkosten relevanten Leerzeiten auswirkt. So kann beispielsweise in einer Station – sofern die Spezifizierung des Produktionssystems dies zuläßt – in Abhängigkeit von den Auflegeintervallen der aufeinanderfolgenden Produktarten mit der Bearbeitung der Folgeproduktart begonnen werden, während zeitgleich in einer anderen Station noch umgerüstet wird. Für eine konkrete Produktlosfolge ändern sich weder die Umrüstzeiten in den Stationen noch die reihenfolgeabhängigen Umrüstkosten relativ zu der Situation, daß mit der Bearbeitung erst begonnen wird, wenn in allen Stationen die Umrüstungen abgeschlossen sind. Die bei einer zeitorientierten Zielsetzung zu minimierenden Loswechselzeiten nach Abzug der darin enthaltenen Bearbeitungszeiten hingegen würden in diesem Beispiel reduziert werden. Bei den Lagerkosten liegt ebenfalls kein direkt proportionales Verhältnis zu den zeitlichen Bezugsbasen, d. h. zu den Lagerzeiträumen für die nach Losfertigstellung einzulagernden Fertigungslose, vor, da die Stücklagerkostensätze produktartenindividuell festgelegt werden und somit von Produktart zu Produktart variieren können.

Die Verfolgung einer zeitorientierten und einer kostenorientierten Zielsetzung können demnach zu verschiedenen Ablaufplänen führen. Aus wirtschaftlichen Gründen⁹⁶ wird bei der Lösung des VLSP eine Kostenorientierung angestrebt, die Zielsetzung lautet „*Minimierung der entscheidungsrelevanten Kosten*“.

2.2 Erläuterung des Produktionsvollzugs

Im folgenden Abschnitt 2.2.1 werden zunächst die verwendeten Symbole beschrieben. In den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 werden der Bearbeitungs- und der Umrüstungsvollzug in dem betrachteten System der getakteten Fließlinienfertigung erläutert und anhand von formalen Beschreibungen und von Abbildungen veranschaulicht.

⁹⁴ Neben der Berücksichtigung der Umrüstvorgänge zwischen zwei Produktlosen könnten auch Anlaufkosten, welche zu Beginn der Fertigung eines Loses aufgrund von Einstellungskorrekturen an den Maschinen und erhöhten Ausschusses auftreten, berücksichtigt werden. Vgl. hierzu z. B. Adam (1969), S. 53.

⁹⁵ Daß schon allein aufgrund der unterschiedlichen Stationslohnsätze eine zeit- und eine kostenorientierte Zielsetzung hinsichtlich der Reihenfolgeplanung zu unterschiedlichen Ablaufplänen führen können, zeigt ein Beispiel im Anhang v. A.

⁹⁶ Vgl. in diesem Zusammenhang auch Mollemer (1997), S. 32

2.2.1 Beschreibung der verwendeten Symbole

Die Beschreibung der Symbole wird grundsätzlich in folgender Reihenfolge vorgenommen: Indizes, Parameter, Variablen/Vektoren, Definitionsbereiche, Mengen, Hilfsfunktionen, Sonstiges. Die Dimension ist jeweils in eckigen Klammern angegeben (Indizes und Mengen/Vektoren sind dimensionslos).

Indizes

i, jProduktartenindizes, $i, j = 0(1)I-1$; die Produktart 0 bildet die fiktive Anfangs- und Endproduktart ab
 mIndex der Stationen, $m=1(1)M$
 vIndex aller in Station m auszuführenden Verrichtungen über alle Produktarten, $v = 1(1)V^m$, $m=1(1)M$

Parameter

c_iAuflegeintervall der Produktart i , $i \in I$, [ZE/ME]
 c_{\max} größtes Auflegeintervall über alle Produktarten $i \in I$, $c_{\max} = \max\{c_i | i \in I\}$, [ZE/ME]
 d_i^m Stückbearbeitungszeit der Produktart i in der Station m , $i = 1(1)I-1$, $m=1(1)M$, [ZE/ME]; $d_i^m = 0$, $i = 0$
 M Stationenanzahl= $|M|$, [-]
 t_{ij}^mUmrüstzeit bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j in der Station m , $m=1(1)M$, $i, j \in I$. Hierzu zählt auch die Einrüstungszeit der Station m bei Produktionsbeginn mit der Produktart j , $i=0$, $j=1(1)I-1$, $m=1(1)M$, und die Ausrüstungszeit der Station m bei Produktionsende von der Produktart i , $j=0$, $i=1(1)I-1$, $m=1(1)M$, [ZE]
 t^m stationsbezogene Umrüstzeit je Heraus- oder Hinzunahme einer Verrichtung bei einer symmetrischen Umrüstmatrix, $m=1(1)M$, [ZE]
 t_v^m Zeitbedarf für das Abrüsten von der Verrichtung v in Station m auf den neutralen Maschinenzustand bei einer asymmetrischen Umrüstmatrix, $v = 1(1)V^m$, $m=1(1)M$, [ZE]
 \hat{t}_v^m Zeitbedarf für das Aufrüsten auf die Verrichtung v in Station m von einem neutralen Maschinenzustand bei einer asymmetrischen Umrüstmatrix, $v = 1(1)V^m$, $m=1(1)M$, [ZE]
 v konstante Bandgeschwindigkeit über alle Produktarten, [LE/ZE]
 v_i produktartenindividuelle Bandgeschwindigkeit der Produktart i , $i = 1(1)I-1$, [LE/ZE]
 V^m Anzahl der in Station m ausführbaren Verrichtungen, $m=1(1)M$, [-]

Definitionsbereiche

$$\begin{aligned}
I, M, v &\geq 0, \\
V^m, t^m &\geq 0, \quad m=1(1)M \\
c_i &\geq 0, \quad i=0(1)I-1 \\
v_i &\geq 0, \quad i=1(1)I-1 \\
t_v^m, \hat{t}_v^m &\geq 0, \quad v = 1(1)V^m, m=1(1)M \\
d_i^m &\geq 0, \quad m=1(1)M, i=0(1)I-1 \\
t_{ij}^m &\geq 0, \quad m=1(1)M, i, j \in I
\end{aligned}$$

Mengen

A_i^m Menge der der Station m bei produktartenindividuell abgestimmter Linie zugeordneten Verrichtungen der Produktart i , $A_i^m \subseteq V^m$, $i = 1(1)I-1$,
 $m=1(1)M$
 I Menge der Produktarten, $I = \{0, 1, 2, \dots, I-1\}$
 M Menge der Stationen, $M = \{1, 2, \dots, M\}$
 V^m Menge der in Station m ausführbaren Verrichtungen über alle Produktarten,
 $V^m = \{1, 2, \dots, V^m\}$, $m=1(1)M$

2.2.2 Bearbeitungsvollzug

In Abschnitt 2.1.1 ist erläutert, daß die getaktete Fließbandfertigung ohne Stationspuffer einer Permutationsfertigung entspricht. Ohne Stationspuffer und aufgrund der Taktung und der Geschlossenheit der Stationen (Annahme 9) ergibt sich darüber hinaus, daß in keiner Station die Bearbeitungszeit einer Produktart das Auflegeintervall dieser Produktart übersteigen darf, um eine Arbeitsüberlastung der Werker⁹⁷ zu vermeiden. Dieser Zusammenhang wird als Taktzeitbindung bezeichnet.⁹⁸ Um unnötige Leerzeiten zu vermeiden, entspricht das Auflegeintervall jeder Produktart dem Maximum über alle Stationsbearbeitungszeiten der betrachteten Produktart.⁹⁹

⁹⁷ Vgl. hierzu Ziegler (1990), S. 12.

⁹⁸ Vgl. Amen (1997), S.33. Zwar weist Amen auch darauf hin, daß bei losweiser Fertigung und kontinuierlichem Transport die Taktzeitbindung theoretisch nicht unbedingt erforderlich ist, da eine Arbeitsüberlastung in einer Station wieder ausgeglichen werden könnte, wenn auf die betrachtete Produktart eine Produktart mit relativ zu ihrem Auflegeintervall Arbeitsunterlastung in der betrachteten Station folgen würde. Amen räumt allerdings ein, daß diese Überlegung nur bei sehr kleinen Losgrößen relevant ist und faktisch keine Bedeutung hat. Vgl. Amen (1997), S. 56. In dem hier betrachteten Fall liegt Taktzeitbindung jedoch unabhängig von der Losgröße immer vor, da die Stationen geschlossen sind und somit eine Weiterbearbeitung in der Folgestation nicht möglich ist.

⁹⁹ Diese Festlegung erfolgt bereits im Rahmen der Leistungsabstimmung und ist darum nicht unter das hier betrachtete Planungsproblem zu fassen.

Bezeichnet c_i das Auflegeintervall der Produktart i und d_i^m die Stückbearbeitungszeit von i in der Station m , dann läßt sich dieser Zusammenhang formal beschreiben als:

$$c_i = \max \left\{ d_i^m \mid m \in M \right\} \quad i \in I \quad (2.1)$$

Aus $d_0^m = 0$ und (2.1) folgt unmittelbar, daß $c_0 = 0$.

Erfolgt der Transport auf dem Fließband *kontinuierlich*, sind von den in Annahme 9) beschriebenen absoluten räumlichen Stationsgrenzen die *relativen räumlichen Stationsgrenzen* zu unterscheiden. Die relativen räumlichen Stationsgrenzen beschreiben diejenigen räumlichen Grenzen, in denen sich eine Produkteinheit während der Zeit eines Auflegeintervalls in der betrachteten Station bewegt. Da die räumlichen Abmessungen der Stationen über das Fließband äquidistant sind, gelten die folgenden Aussagen für den Fall des kontinuierlichen Transports jeweils für alle Stationen: Besteht die Möglichkeit, bei einem Produktloswechsel die Anpassung an die produktartenindividuellen Auflegeintervalle dergestalt über eine entsprechende Angleichung der Bandgeschwindigkeit vorzunehmen, daß für jede Produktart die Zeit, die eine Produkteinheit für das Durchlaufen einer Station benötigt, die Verweildauer in einer Station, genau dem Auflegeintervall der betrachteten Produktart entspricht, dann stimmen die absoluten und die relativen räumlichen Stationsgrenzen für alle Produktarten überein und berechnen sich als Produkt von produktartenindividuellem Auflegeintervall und Bandgeschwindigkeit.¹⁰⁰ Sind die absoluten und die relativen räumlichen Stationsgrenzen identisch, werden die relativen räumlichen Stationsgrenzen im folgenden als starr bezeichnet.

Besteht nicht die Möglichkeit, den produktartenindividuellen Auflegeintervallen über eine entsprechende Angleichung der Bandgeschwindigkeit gerecht zu werden, sondern erfolgt der Transport mit konstanter Bandgeschwindigkeit über alle Produktarten, so können das Auflegeintervall einer Produktart kürzer als die Verweildauer in einer Station und die relativen räumlichen Stationsgrenzen entsprechend kleiner als die absoluten räumlichen Stationsgrenzen sein.¹⁰¹ Die absoluten räumlichen Stationsgrenzen bemessen sich nach der Produktart mit dem größten Auflegeintervall, d. h., die Verweildauer in jeder Station entspricht nur bei der Produktart mit dem größten Arbeitsvorrat über alle Produktarten ihrem Auflegeintervall.¹⁰² Eine Anpassung an die produktartenindividuellen Auflegeintervalle erfolgt bei konstanter Bandgeschwindigkeit durch entsprechende räumliche Abmessung der aufzulegenden Einheiten. Sind die absoluten und die relativen räumlichen Stationsgrenzen nicht identisch, werden die relativen räumlichen Stationsgrenzen im folgenden als flexibel bezeichnet.

¹⁰⁰ Im Sinne einer konsistenten Behandlung der Dimensionen müsste das Produkt aus Auflegeintervall und Bandgeschwindigkeit hier mit der Dimension Mengeneinheiten [ME] multipliziert werden. Da das Problem der Dimensionskorrektur im Rahmen der in diesem Kapitel folgenden Berechnungen immer wieder auftreten würde, werden sowohl für das Auflegeintervall als auch für die Stückbearbeitungsdauer die Dimension Zeiteinheiten [ZE] zu Grunde gelegt, vgl. hierzu S. 25 v. A.

¹⁰¹ Aufgrund der Geschlossenheit der Stationen kann die dritte Variante, daß das Auflegeintervall länger als die Verweildauer in einer Station ist, nicht vorliegen.

¹⁰² Dies kann auch auf mehrere Produktarten zutreffen.

Erfolgt der Transport auf dem Fließband *intermittierend*, sind die relativen räumlichen Stationsgrenzen starr, da das ruckartige Weiterreichen der Produkteinheiten von Station zu Station mit dem zeitlichen Intervall ihres Auflegeintervalls impliziert, daß die Verweildauer in der Station immer genau dem Auflegeintervall entspricht, wobei die (in jeder Station gleiche) für das Weiterreichen erforderliche Zeit jeweils in der Bearbeitungszeit und somit in dem Auflegeintervall integriert ist. Theoretisch ist auch ein ruckartiger Transport mit kleinerem Auflegeintervall als der Verweildauer in der Station denkbar, wenn die Verweildauer einem ganzzahligen Vielfachen des Auflegeintervalls entspricht. Diese Situation kann dann auftreten, wenn die räumlichen Abstände der Stationen so groß bemessen sind, daß mit nur einem ruckartigen Weiterreichen die jeweils nächste Station nicht erreicht werden kann. Von dieser Möglichkeit wird hier jedoch abgesehen und der intermittierende Transport wie beschrieben definiert. Abbildung 2.1 veranschaulicht den Bearbeitungsablauf bei starren und bei flexiblen relativen räumlichen Stationsgrenzen.

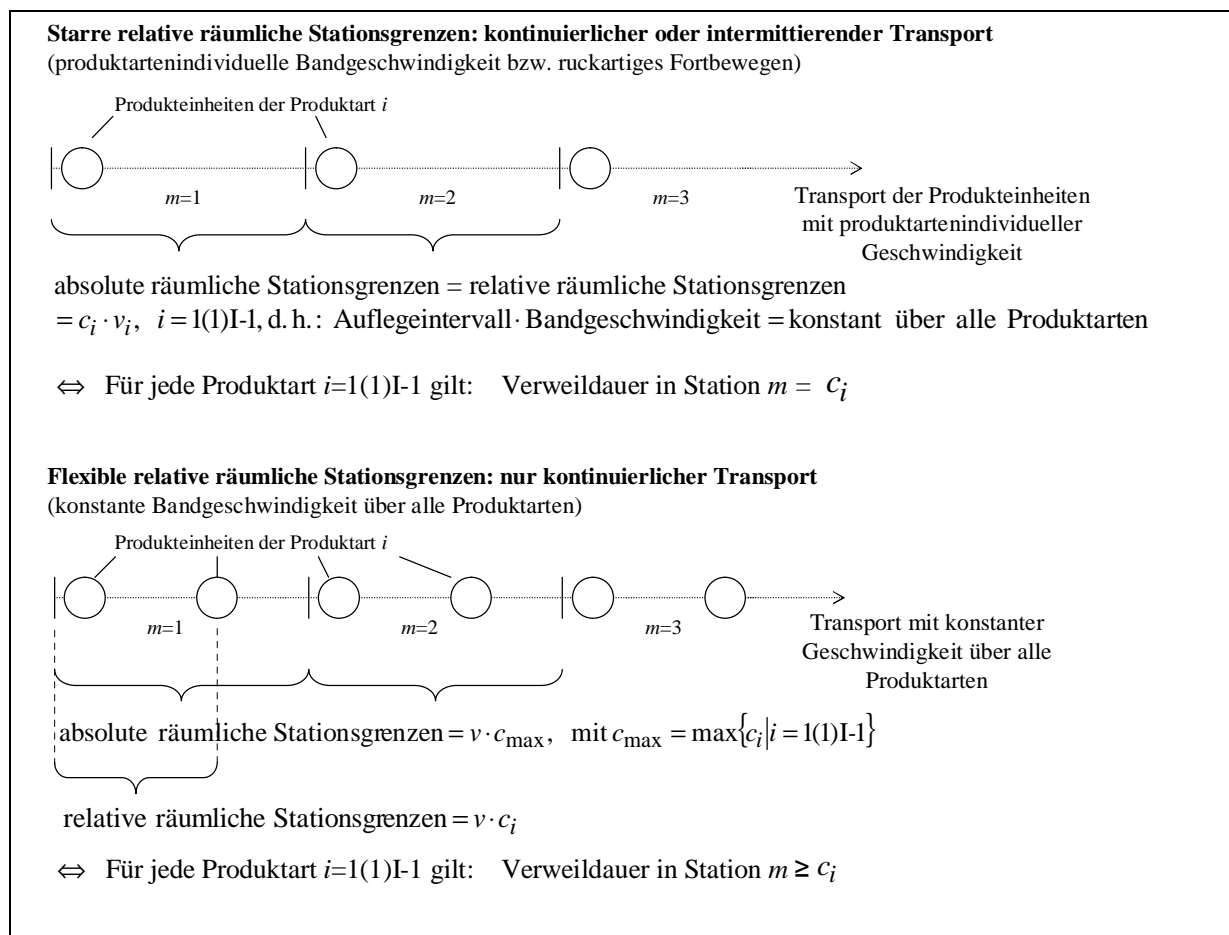


Abbildung 2.1: Starre und flexible relative räumliche Stationsgrenzen

2.2.3 Umrüstungsvollzug

Gemäß Annahme 13) werden als Loswechselzeiten diejenigen Zeiten bezeichnet, die jeweils zwischen dem Bandverlassen der letzten Einheit der Vorgängerproduktart und dem Bandverlassen der ersten Einheit der jeweiligen Nachfolgerproduktart liegen. Diese Loswechselzeiten setzen sich aus Umrüstzeiten und aus durch die Umrüstungsvorgänge induzierten Leerzeiten zusammen. Die Umrüstzeiten berechnen sich in Abhängigkeit davon, welche Verrichtungen

zur Bearbeitung zweier aufeinanderfolgender Produktarten durchgeführt werden müssen.¹⁰³ Demzufolge werden die Umrüstzeiten durch den Grad der Ähnlichkeit der für aufeinanderfolgende Produkte in den Stationen auszuführenden Verrichtungen bestimmt. Die Umrüstungen werden für die in den einzelnen Stationen vorhandenen Werkzeugvorrichtungen (z. B. Werkzeughalter, Spindelvorrichtungen, Schnittschablonen)¹⁰⁴ vorgenommen, d. h. die Umrüstzeit in einer Station ergibt sich als Summe der für die Werkzeugwechsel in dieser Station benötigten Zeiten.¹⁰⁵ Hierbei kann entweder angenommen werden, daß für die Menge der aufgrund einer abweichenden Verrichtung durchzuführenden Werkzeugwechsel, im folgenden auch als Verrichtungswechsel bezeichnet, ein stationsbezogener Zeitsatz anzusetzen ist, der unabhängig davon ist, ob auf die betrachtete Verrichtung auf- oder von der betrachteten Verrichtung abgerüstet werden muß. In diesem Fall liegt eine symmetrische reihenfolgeabhängige Umrüstmatrix vor. Oder es wird angenommen, daß die in jeder Station benötigte Zeit zum Aufrüsten auf eine Verrichtung von der zum Abrüsten von dieser Verrichtung benötigten Zeit abweichen kann. In diesem Fall sind die Umrüstzeiten nicht nur reihenfolgeabhängig sondern zudem asymmetrisch.

Leerzeiten können zum einen dadurch entstehen, daß die Umrüstzeiten von einer bestimmten Produktart auf eine andere nicht in allen Stationen gleich lang sind, und zum anderen durch zu berücksichtigende Taktzeitunterschiede aufeinanderfolgender Produktarten. Die aufgrund von Taktzeitunterschieden induzierten Leerzeiten können z. T. bereits für die Umrüstvorgänge an den Maschinen, d. h. als Umrüstzeit, genutzt werden. Wie die Umrüstzeiten und die Leerzeiten auf die Berechnung der Loswechselzeiten wirken, wird im einzelnen in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Zunächst wird gezeigt, wie die zuvor beschriebenen Umrüstmatrizen auf der Grundlage der erforderlichen Verrichtungsmengen der aufeinanderfolgenden Produktarten in Abhängigkeit davon, ob eine symmetrische oder eine asymmetrische Struktur vorliegt, berechnet werden müssen.

a) Symmetrische Umrüstmatrix

Fällt für jeden Verrichtungswechsel ein stationsbezogener Zeitsatz an, der unabhängig davon ist, ob die betrachtete Verrichtung aufgrund des Loswechsel nicht mehr oder erst dadurch benötigt wird, liegt eine symmetrische Struktur der Umrüstmatrix vor. Es wird ein Loswechsel von einer Produktart i auf eine Produktart j betrachtet. Entscheidend für die Berechnung der Umrüstzeit sind die Elemente der Komplementmenge zu der Schnittmenge aus den Verrichtungsmengen von i und j innerhalb der sich als Vereinigungsmenge der beiden Verrichtungsmengen ergebenden Grundmenge. Hierbei spielt es keine Rolle, ob sich eine Verrichtung in der beschriebenen Komplementmenge befindet, weil sie für die Bearbeitung von j nicht mehr benötigt wird aber für die Bearbeitung von i benötigt wurde, oder aber weil sie für die Bearbeitung von j benötigt wird aber für die Bearbeitung von i nicht benötigt wurde.¹⁰⁶ Beschreibt

¹⁰³ Vgl. hierzu Kabir/Tabucanon (1995), S. 194 f. Demnach hängen die stationsbezogenen reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten nicht von der Anzahl der insgesamt in der betrachteten Fließlinie gefertigten Produktarten, sondern von dem Grad der Übereinstimmung der zugeordneten Verrichtungen ab.

¹⁰⁴ Vgl. White/Wilson (1977), S. 195 f.

¹⁰⁵ Vgl. White/Wilson (1977), S. 198, Lockett/Muhlemann (1972), S. 896. Ebenfalls mittels detaillierter Betrachtung der für die Ausführung der Arbeitsgänge zweier aufeinanderfolgender Produktlose jeweils notwendigen Werkzeuge, die dann entsprechend montiert bzw. demontiert werden müssen, ermitteln Haase/Göpfert die anzusetzenden Rüstzeiten. Vgl. hierzu Haase/Göpfert (1996), S. 1513 f. Vgl. auch Srikar/Ghosh (1986).

¹⁰⁶ Bezüglich der Rüstzeiten entspricht diese symmetrische Abbildung in allgemeinerer Form den von White/Wilson (vgl. White/Wilson (1977)) und Lockett/Muhlemann (vgl. Lockett/Muhlemann (1972)) verfolgten Ansätzen.

A_i^m die Menge der in Station m für die Bearbeitung der Produktart i durchzuführenden Verrichtungen (A_j^m respektive für die Produktart j), sowie t^m die benötigte Zeit für das Ab- oder Aufrüsten einer Verrichtung in Station m , dann lassen sich die symmetrischen Umrüstzeiten t_{ij}^m bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j in der Station m wie folgt berechnen:

$$t_{ij}^m = \left| \{A_i^m \mathbf{U} A_j^m\} \setminus \{A_i^m \mathbf{I} A_j^m\} \right| \cdot t^m, \quad m \in M, \quad i, j \in I \quad (2.2)$$

b) Asymmetrische Umrüstmatrix

Fällt für jeden Verrichtungswechsel ein verrichtungsbezogener Zeitsatz an, der abhängig davon ist, ob die betrachtete Verrichtung aufgrund des Loswechsel nicht mehr oder erst dadurch benötigt wird, liegt eine asymmetrische Struktur der Umrüstmatrix vor. Demnach ist es bei einem Loswechsel von i auf j nicht nur relevant, wie groß die Menge der unterschiedlichen Verrichtungen ist. Es werden verrichtungsspezifische Zeiten zu Grunde gelegt, die jeweils für das Aufrüsten auf eine bzw. das Abrüsten von einer Verrichtung anfallen. Diese Zeiten werden als Verrichtungsauf- bzw. Verrichtungsabrüstzeiten bezeichnet. Das Aufrüsten auf eine Verrichtung erfolgt, wenn die Verrichtung nicht Element der Verrichtungsmenge der Produktart i , aber Element der Verrichtungsmenge der Produktart j ist. Das Abrüsten von einer Verrichtung ist erforderlich, wenn die Verrichtung Element der Verrichtungsmenge der Produktart i , aber nicht Element der Verrichtungsmenge der Produktart j ist. Die gesamte Umrüstzeit in Station m bei einem Loswechsel von i auf j ergibt sich als Summe aller Verrichtungsauf- und der Verrichtungsabrüstzeiten. Beschreibt t_v^m den Zeitbedarf für das Abrüsten von der Verrichtung v und \hat{t}_v^m den Zeitbedarf für das Aufrüsten auf die Verrichtung v in Station m , läßt sich Berechnung der asymmetrischen Umrüstzeiten t_{ij}^m wie folgt beschreiben:

$$t_{ij}^m = \sum_{v \in A_i^m \setminus A_j^m} t_v^m + \sum_{v \in A_j^m \setminus A_i^m} \hat{t}_v^m, \quad m \in M, \quad i, j \in I \quad (2.3)$$

2.3 Berechnung der Loswechselzeiten und -kosten

2.3.1 Loswechselzeiten

Die Berechnungen der Loswechselzeiten basieren auf einer asymmetrischen Umrüstmatrix. Neben den asymmetrischen Umrüstzeiten müssen für die Berechnung der Loswechselzeiten die durch die Umrüstungen induzierten Leerzeiten berücksichtigt werden. Die durch einen Loswechsel verursachten Leerzeiten werden von der Unterschiedlichkeit der Umrüstzeiten der betrachteten Produktarten in den einzelnen Stationen und von deren Taktzeitunterschied bestimmt.¹⁰⁷

¹⁰⁷ Aufgrund der Berücksichtigung der Leerzeiten könnte eine Asymmetrie der Loswechselzeiten auch dann vorliegen, wenn die Umrüstzeiten symmetrisch wären. Auf Basis der getroffenen Annahmen wären jedoch bei einer symmetrischen Umrüstmatrix der Umrüstzeiten die Loswechselkosten auch symmetrisch, vgl. hierzu Abschnitt 2.3.2 v. A.

Die bei einem Loswechsel von einer Produktart i auf eine Produktart j benötigte Loswechselzeit beschreibt die zwischen Bandverlassen der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i und dem Zeitpunkt des Bandverlassens der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart j liegende Zeit. Die Berechnung dieser Zeit erfolgt jeweils auf Basis der Überlegung „Wann kann schnellstmöglich die erste Einheit der Nachfolgerproduktart aufgelegt werden“, d. h. indem jeweils der frühestmögliche Zeitpunkt der Einlastung der Nachfolgerproduktart¹⁰⁸ unter Berücksichtigung der je nach konkretisiertem Produktionssystem vorgegebenen Rahmenbedingungen bestimmt wird. Ausgehend von der zwischen dem Auflegezeitpunkt der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart j (Zeitpunkt der Einlastung von j) und dem Zeitpunkt der Auflegung der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i liegenden Zeit erfolgt dann die Berechnung der Loswechselzeit. Neben den eventuellen Taktzeitunterschieden der aufeinanderfolgenden Produktarten ist hierbei ebenfalls zu berücksichtigen, daß die letzte Einheit der Vorgängerproduktart in den einzelnen Stationen noch fertig bearbeitet werden muß, bevor mit dem Umrüstungsvorgang in der jeweils betrachteten Station begonnen werden kann. Der frühestmögliche Einlastungszeitpunkt der jeweiligen Nachfolgerproduktart berechnet sich demnach jeweils als Maximum über alle Stationen der noch benötigten Zeit der letzten Einheit der Vorgängerproduktart.¹⁰⁹ Diese „noch benötigte Zeit der Vorgängerproduktart“ fällt in Abhängigkeit von den in den folgenden Abschnitten dargestellten Differenzierungen unterschiedlich aus.

2.3.1.1 Beschreibung der verwendeten Symbole

Zu den bereits definierten Symbolen werden die in diesem Abschnitt als Variablen zu definierenden Loswechselzeiten, sowie die im Rahmen der Berechnung der Loswechselzeiten verwendeten Mengen beschrieben. Anschließend wird erläutert, inwiefern aus rechnerischen Gründen eine Anpassung der Dimensionen der verwendeten Größen im Rahmen der Berechnung der Loswechselzeiten vorgenommen werden muß.

Variablen

- m' letzte Station, welche die letzte Einheit der Vorgängerproduktart vor einer Bandgeschwindigkeitsumstellung durchläuft, $m' \in M$, [-]
- m^* diejenige Station, welche im Falle einer zulässigen Bandgeschwindigkeitsumstellung während des laufenden Fertigungsprozesses t_{ij}^e bestimmt, $m^* \in M$, $i, j \in I$, [-]
- t_{ij} Loswechselzeit: Zeit, die mindestens zwischen dem Zeitpunkt des Bandverlassens der letzten Produkteinheit der Vorgängerproduktart i und dem Zeitpunkt des Bandverlassens der ersten Produkteinheit der Produktart j bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j liegt, $i, j \in I$, [ZE]
- t_{ij}^e Basis zur Berechnung der Loswechselzeit: Zeit, die mindestens zwischen dem Zeitpunkt der Auflegung der letzten Produkteinheit der Vorgängerproduktart i und dem Zeitpunkt der Auflegung der ersten Produkteinheit der Produktart j bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j liegt, $i, j \in I$, [ZE]

¹⁰⁸ Vgl. auch Gupta (1986), S. 210.

¹⁰⁹ Graves/Holmes Redfield erachten in diesem Zusammenhang eine sich nur auf die über alle Stationen längste Rüstzeit beziehende Maximumbildung als maßgeblich, vgl. Graves/Holmes Redfield (1988), S. 47. Daß hier noch andere Faktoren berücksichtigt werden müssen, wird im folgenden analysiert.

Definitionsbereiche

$$t_{ij}^e, t_{ij} \geq 0, \quad i, j \in I$$

Dimensionen

Die Loswechselzeiten t_{ij} und die zugehörigen Basisberechnungen t_{ij}^e werden in Zeiteinheiten [ZE] angegeben. Die Berechnung der Loswechselzeiten erfolgt jedoch unter anderem in Abhängigkeit von den Taktzeiten c_i und den Stückbearbeitungszeiten d_i^m , die jeweils in der Dimension [ZE/ME] angegeben sind. Im Rahmen der Berechnung der Loswechselzeiten wird für diese Größen einheitlich die Dimension Zeiteinheiten [ZE] zu Grunde gelegt.

2.3.1.2 Spezifizierungen des Produktionssystems

Das betrachtete Produktionssystem wird nach verschiedenen Kriterien differenziert:

- nach der Art der Beförderung: kontinuierlich oder intermittierend
- nach der Beschaffenheit der relativen räumlichen Stationsgrenzen: starr oder flexibel
- nach der Notwendigkeit eines Bandleerlaufs: notwendig oder nicht notwendig
- nach dem Zeitpunkt des Umrüstungsbeginns: nach Bandverlassen der Vorgängerproduktart oder frühestmöglich¹¹⁰,

wobei nicht jede Kombination aus den verschiedenen Kriterienausprägungen sinnvoll oder umsetzbar ist.

Sind die relativen räumlichen Stationsgrenzen *starr* und erfolgt der Transport *kontinuierlich*, muß die Anpassung an die produktartenindividuellen Auflegeintervalle über eine entsprechende Veränderung der Bandgeschwindigkeit realisiert werden, da die räumliche Abmessung einer Station, wie schon gezeigt, immer dem Produkt aus Auflegeintervall und Bandgeschwindigkeit entspricht und über alle Produktarten konstant ist. Erfolgt der Transport *intermittierend*, entspricht die Anpassung an die produktartenindividuellen Auflegeintervalle einer entsprechenden Veränderung des Intervalls, mit dem die Produkteinheiten aufgelegt und dann ruckartig weitergereicht werden.

Sind die relativen räumlichen Stationsgrenzen *flexibel*, erfolgt der Transport ausschließlich *kontinuierlich*, wobei die Anpassung an die Auflegeintervalle über eine entsprechende Veränderung der räumlichen Abstände der Produkteinheiten bei konstanter Bandgeschwindigkeit realisiert werden kann. Bei intermittierendem Transport impliziert das ruckartige Weiterreichen der Produkteinheiten von Station zu Station mit dem zeitlichen Intervall ihres Auflegeintervalls, daß die relativen räumlichen Stationsgrenzen starr sind. Von dem bei intermittierendem Transport theoretisch denkbaren Fall, daß die Verweildauer in der Station einem ganzzahligen Vielfachen des Auflegeintervalls entspricht, wird - wie im Rahmen der Beschreibung des Bearbeitungsvollzugs erläutert - abgesehen.

Besteht bei einem Loswechsel die Erfordernis, den Loswechsel *mit Bandleerlauf* vorzunehmen, d. h. daß sich niemals Einheiten verschiedener Produktarten gleichzeitig zur Bearbeitung in unterschiedlichen Stationen auf dem Fließband befinden dürfen, ist es hinsichtlich der Berechnung der Loswechselzeiten unerheblich, ob die relativen räumlichen Stationsgrenzen starr

¹¹⁰ Zu dem Beginn der Rüstvorgänge jeweils unmittelbar nach Bearbeitungsende der letzten Einheit der Vorgängerproduktart vgl. z. B. Sule/Huang (1983), S. 724, Eggers (1996), S. 14 –19, Kistner/Rogalski (1995), S. 290.

oder flexibel sind, da eine Anpassung an die unterschiedlichen Auflegeintervalle in dem einen Fall über eine entsprechende Veränderung der Bandgeschwindigkeit, wie bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen erforderlich, und in dem anderen Fall über eine entsprechende Veränderung der räumlichen Abstände der Produkteinheiten bei konstanter Bandgeschwindigkeit, wie bei flexiblen relativen räumlichen Stationsgrenzen möglich, realisiert werden kann.

Ist hingegen ein Loswechsel *ohne Bandleerlauf* möglich, werden die verschiedenen Berechnungen in Abhängigkeit davon aufgezeigt, ob die relativen räumlichen Stationsgrenzen starr oder flexibel sind, wobei sich die Berechnungen der Loswechselzeiten bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen und Anpassung an die produktartenindividuellen Auflegeintervalle über eine entsprechende Anpassung der Bandgeschwindigkeit als komplizierter erweisen als bei flexiblen relativen Stationsgrenzen und konstanter Bandgeschwindigkeit.

Tabelle 2.1 zeigt die betrachteten Systemdifferenzierungen mit der jeweiligen Nummer des Abschnitts, in welchem das System betrachtet wird.

		Transportart		intermittierend	
		Bandleerlauf			
Relative räumliche Stationsgrenzen	Zeitpunkt des Umrüstungsbeginns	mit Bandleerlauf	ohne Bandleerlauf	mit Bandleerlauf	ohne Bandleerlauf
	starr	nach Bandverlassen der Vorgängerproduktart	2.3.1.3.1 a)	widersprüchlich	2.3.1.4.1 a)
frühestmöglich		2.3.1.3.1 b)	2.3.1.3.2 a)	2.3.1.4.1 b)	2.3.1.4.2
flexibel	nach Bandverlassen der Vorgängerproduktart	2.3.1.3.1 a)	widersprüchlich	gemäß Definition intermittierender Transport nicht möglich	
	frühestmöglich	2.3.1.3.1 b)	2.3.1.3.2.b)		

Tabelle 2.1: Systemdifferenzierungen

Für alle betrachteten Produktionssysteme gilt einheitlich, daß bei Beginn der Aufrüstung auf die zuerst zu fertigende Produktart das Band noch nicht, und nach Beendigung der Bearbeitung der letzten Produkteinheit der zuletzt aufgelegten Produktart das Band nicht mehr läuft. Folglich entspricht der Zeitpunkt der Auflegung der letzten Einheit der Vorgängerproduktart in dem Fall, daß es sich hierbei um die Produktart 0 handelt, dem Zeitpunkt des Beginns der Einrüstung und der Zeitpunkt der Auflegung der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart in dem Fall, daß es sich hierbei um die Produktart 0 handelt, dem Zeitpunkt des Abschlusses der Ausrüstung des Fließbandes.

Unmittelbare Folge zweier Fertigungslose derselben Produktart

Folgen zwei Fertigungslose derselben Produktart unmittelbar aufeinander, fallen keine Umrüstzeiten an. Diese Annahme ist rein logisch sinnvoll, da die Menge der notwendigen Ver richtungswechsel bei der „Umrüstung einer Produktart auf sich selbst“ leer ist und demnach $t_{ii}^m = 0$, $m \in M$, $i \in I$. Da in jeder Station die Bearbeitung der jeweils letzten Einheit des vorhergehenden Fertigungsauftrags gewährleistet sein muß, bevor mit der Bearbeitung der ersten Einheit des nachfolgenden Loses begonnen werden kann, entsprechen wegen

$c_i = \max \left\{ d_i^m \mid m \in M \right\}$, $i \in I$, in jedem der im folgenden betrachteten Produktionssysteme die Loswechselzeiten t_{ij} einem Auflegeintervall der Produktart i :

$$t_{ii} = c_i, \quad i \in I \quad (2.4)$$

2.3.1.3 Kontinuierlicher Transport

2.3.1.3.1 Kontinuierlicher Transport mit Bandleerlauf

Wie eingangs beschrieben, ist es hinsichtlich der Berechnung der Loswechselzeiten bei kontinuierlichen Transport mit Bandleerlauf unerheblich, ob die relativen räumlichen Stationsgrenzen starr oder flexibel sind. Die Anpassung an verschiedene Auflegeintervalle kann entsprechend der Erfordernis bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen über eine Veränderung der Bandgeschwindigkeit oder entsprechend der Möglichkeit bei flexiblen relativen räumlichen Stationsgrenzen über eine Veränderung der räumlichen Abstände der Produkteinheiten bei konstanter Bandgeschwindigkeit realisiert werden, da die produktartenindividuell abgestimmten Auflegeintervalle in beiden Fällen die Information über Bandgeschwindigkeit und räumliche Abstände implizieren. Die Berechnung der Loswechselzeiten wird danach unterschieden, ob jeweils mit der Umrüstung auf die Nachfolgerproduktart zu dem frühestmöglichen Zeitpunkt oder erst nach dem Bandverlassen der letzten Einheit der Vorgängerproduktart begonnen wird.¹¹¹

a) Umrüstungsbeginn in jeder Station nach Bandverlassen der Vorgängerproduktart

In jeder Station muß mit dem Umrüsten auf eine Nachfolgerproduktart j solange gewartet werden, bis die letzte Einheit der Vorgängerproduktart i das Band verlassen hat. Die zwischen dem Zeitpunkt der Auflegung der letzten Produkteinheit von i und dem frühesten Zeitpunkt der Auflegung der ersten Einheit von j liegende Zeit t_{ij}^e setzt sich folglich zum einen aus dem Banddurchlaufen der letzten Produkteinheit von i und zum anderen aus dem für die betrachtete Produktfolge von i auf j über alle Stationen zu bildenden Maximum der Umrüstzeiten zusammen. Zudem wird berücksichtigt, daß die erste Einheit der Nachfolgerproduktart j jede Station m auch erst erreichen muß. Taktzeitunterschieden der aufeinanderfolgenden Produktarten kann problemlos mittels entsprechender Bandgeschwindigkeitsveränderung Rechnung getragen werden, da sich aufgrund des Loswechsels mit Bandleerlauf niemals Einheiten unterschiedlicher Produktarten gleichzeitig auf dem Band in Bearbeitung befinden können.

Die Zeit t_{ij}^e berechnet sich jeweils wie folgt:

$$t_{ij}^e = M \cdot c_i + \max \left\{ t_{ij}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\} \quad i, j \in I, \quad i \neq j \quad (2.5.1)$$

Das Produkt $M \cdot c_i$ beschreibt die Zeit, welche die letzte Einheit von i für das Banddurchlaufen relativ zu ihrem Auflegezeitpunkt benötigt. Von der Umrüstzeit t_{ij}^m wird in jeder Station m diejenige Zeit abgezogen, welche die erste Einheit von j benötigt, um bis zu m zu gelangen,

¹¹¹ Vgl. auch Kabir/Tabucanon (1995), S. 194 f.

da diese Zeit für den Umrüstungsvorgang in m genutzt werden kann. Die benötigte Zeit der ersten Einheit von j für das Erreichen von m berechnet sich als Produkt aus der Taktzeit von j und der Anzahl der vor m liegenden Stationen, $c_j(m-1)$, da bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen die für das Durchlaufen einer jeden Station benötigte Zeit genau einem Auflegeintervall der betrachteten Produktart entspricht. Der Maximumausdruck kann aufgrund der Nicht-Negativität von t_{ij}^m , c_j und m und wegen $m=1$ nie negativ werden.

Ausgehend von t_{ij}^e berechnet sich die Loswechselzeit t_{ij} , indem berücksichtigt wird, daß die erste Einheit von der Nachfolgerproduktart j die M Stationen auch noch durchlaufen muß, die letzte Einheit der Vorgängerproduktart i dies aber bereits getan hat:

$$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i) \quad i, j \in I, \quad i \neq j \quad (2.5.2)$$

Bei Einsetzen von (2.5.1) in (2.5.2) entspricht $t_{ij} = M \cdot c_j + \max \left\{ t_{ij}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\}$, $i, j \in I, \quad i \neq j$. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf das Einsetzen im folgenden verzichtet.

b) Umrüstungsbeginn in jeder Station zu dem frühestmöglichen Zeitpunkt

In diesem Fall kann in jeder Station die Zeit, welche in dem zuvor abgebildeten Fall zum Leerlaufen des Bandes vor Umrüstungsbeginn gewartet werden muß, bereits zum Umrüsten genutzt werden.¹¹² Da weiterhin angenommen wird, daß sich nicht verschiedene Produktarten gleichzeitig in Bearbeitung auf dem Fließband befinden dürfen, muß berücksichtigt werden, daß die erste Einheit der Nachfolgerproduktart frühestens dann aufgelegt werden darf, wenn die Bearbeitung der letzten Einheit der Vorgängerproduktart in der letzten Station abgeschlossen ist. Die erforderliche Anpassung an das produktartenindividuelle Auflegeintervall über eine entsprechende Veränderung der Bandgeschwindigkeit ist wiederum problemlos. Da nun aber die Möglichkeit besteht, sofort nach Bearbeitungsende in jeder Station m mit dem Umrüstvorgang zu beginnen, ist nicht nur entscheidend, wieviel Zeit die erste Einheit von j bis zum Erreichen von m , sondern auch, wieviel Zeit hierfür die letzte Einheit von i benötigt. Durch die Bandgeschwindigkeitsveränderung nach Bearbeitungsende der letzten Einheit der Vorgängerproduktart in der letzten Station erreicht die erste Einheit von j entsprechend ihrer Taktzeit die betrachtete Station schneller, $c_j < c_i$, gleich schnell, $c_j = c_i$, oder langsamer, $c_i < c_j$, als die letzte Einheit von i .

Die Zeit t_{ij}^e berechnet sich jeweils wie folgt:

$$\begin{aligned} t_{ij}^e &= \max \left\{ M \cdot c_i, \max \left\{ c_i(m-1) + t_{ij}^m + d_i^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\} \right\} \\ &= \max \left\{ M \cdot c_i, \max \left\{ t_{ij}^m + d_i^m - (c_j - c_i)(m-1) \mid m \in M \right\} \right\} \quad i, j \in I, \quad i \neq j \end{aligned} \quad (2.6.1)$$

Der äußere Maximumausdruck stellt sicher, daß die Produktart i das Band verlassen hat, bevor die erste Einheit von j aufgelegt werden kann. Der innere Klammerausdruck ermittelt den frühestmöglichen Einlastungszeitpunkt von j unter Berücksichtigung der Auflegeintervalle

¹¹² Vgl. auch Kistner/Rogalski (1995), S. 290.

von i und j . Für jede Station m muß sichergestellt sein: die erste Einheit von j darf relativ zu dem Zeitpunkt des Eintreffens der letzten Einheit von i erst dann eintreffen, wenn die Bearbeitung von i in m , d_i^m , und die Umrüstung von i auf j , t_{ij}^m , abgeschlossen sind. Die zwischen dem Zeitpunkt des Eintreffens der letzten Produkteinheit von i in Station m und ihrem Auflegezeitpunkt liegende Zeit, $c_i(m-1)$, wird mit der entsprechenden Zeit der ersten Einheit von j , $c_j(m-1)$, verrechnet. In dem Fall, daß das Auflegeintervall von j größer als das von i ist, $c_i < c_j$, kann die durch das relativ zu i langsamere Erreichen von j in jeder Station m gewonnene Zeit, $(c_j - c_i) \cdot (m-1)$, mit der für die Umrüstung und die Bearbeitung der letzten Einheit von i noch benötigten Zeit verrechnet werden. Im gegenteiligen Fall, $c_j < c_i$, muß die durch das relativ zu i schnellere Erreichen von j in jeder Station m entstehende Differenz zu der für die Umrüstung und die Bearbeitung der letzten Einheit von i noch benötigten Zeit addiert werden. Im dritten Fall, $c_j = c_i$, muß in jeder Station m nur gewährleistet sein, daß die Bearbeitung von i und die Umrüstung von i auf j abgeschlossen sind, da die Zeiten bis zum Erreichen von m bei i und j gleich lang sind.

Ausgehend von t_{ij}^e berechnet sich die Loswechselzeit t_{ij} wiederum indem berücksichtigt wird, daß die erste Einheit von der Nachfolgerproduktart j die M Stationen noch durchlaufen muß, die letzte Einheit der Vorgängerproduktart i dies aber bereits getan hat:

$$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i) \quad i, j \in I, \quad i \neq j \quad (2.6.2)$$

2.3.1.3.2 Kontinuierlicher Transport ohne Bandleerlauf

Dürfen sich Einheiten verschiedener Produktarten gleichzeitig in unterschiedlichen Stationen zur Bearbeitung auf dem Fließband befinden, kann der Loswechsel ohne Bandleerlauf erfolgen. Hier ist nun zu unterscheiden, ob die relativen räumlichen Stationslängen starr oder flexibel sind.

a) Kontinuierlicher Transport ohne Bandleerlauf bei flexiblen relativen räumlichen Stationsgrenzen

Bei flexiblen relativen räumlichen Stationsgrenzen wird die Anpassung an die Taktzeitunterschiede der aufeinanderfolgenden Produktarten mittels entsprechender Veränderung der räumlichen Abstände bei der Auflegung der Produkteinheiten vorgenommen, wobei die Bandgeschwindigkeit konstant bleibt. Eventuelle Taktzeitunterschiede aufeinanderfolgender Produktarten sind für die Bestimmung des frühestmöglichen Auflegezeitpunkts der Nachfolgerproduktart j nicht maßgeblich, da das Eintreffen einer jeden Produkteinheit in der Station m relativ zu dem Auflegezeitpunkt unabhängig von dem jeweiligen Auflegeintervall immer gleich lang dauert. Hieraus ergibt sich allerdings, daß die Berechnung der für die Einrüstung des Fließbandes, d. h. der Aufrüstung von der fiktiven Produktart 0, und für die Ausrüstung, d. h. der Abrüstung auf die fiktive Produktart 0, zu berücksichtigenden Zeiten gesondert erfolgen muß, da kein Bezug zu dem „Zeitpunkt des Eintreffens der Vorgängerproduktart bzw. Nachfolgerproduktart 0 in der Station m “ hergestellt werden kann.

Für jede Station m gilt wiederum: die erste Einheit von j darf relativ zu dem Zeitpunkt des Eintreffens der letzten Einheit von i erst dann eintreffen, wenn die Stückbearbeitungszeit von i , d_i^m , und die Umrüstungszeit von i auf j , t_{ij}^m , abgeschlossen sind.

Die Zeit t_{ij}^e berechnet sich jeweils wie folgt:

$$t_{ij}^e = \max \left\{ d_i^m + t_{ij}^m \mid m \in M \right\} \quad i, j = 1(1)I-1, \quad i \neq j \quad (2.7.1)$$

Relativ zu ihrem jeweiligen Auflegezeitpunkt erreichen die erste Einheit der Nachfolgerproduktart und die letzte Einheit der Vorgängerproduktart aufgrund der konstanten Bandgeschwindigkeit den Zeitpunkt des Bandverlassens gleich schnell. Demnach entsprechen die Loswechselzeiten t_{ij} den Zeiten t_{ij}^e :

$$t_{ij} = t_{ij}^e, \quad i = 1(1)I-1, \quad j = 1(1)I-1, \quad i \neq j \quad (2.7.2)$$

Da die Produktart 0 keine Bearbeitungszeit hat, $d_0^m = 0$, $m \in M$, muß bei der Berechnung des frühestmöglichen Einlastungszeitpunktes der auf die fiktive Anfangsproduktart 0 folgenden Produktart j in jeder Station m nur sichergestellt werden, daß vor Eintreffen der ersten Einheit von j der Umrüstvorgang von 0 auf j abgeschlossen ist, wobei die Zeit, welche die erste Einheit von j zum Erreichen von m benötigt, wiederum mit der Umrüstzeit verrechnet werden kann.

$$t_{0j}^e = \max \left\{ t_{0j}^m - \frac{(m-1)}{M} \cdot \frac{L}{v} \mid m \in M \right\}, \quad j = 1(1)I-1 \quad (2.8.1)$$

Die Bandlänge L dividiert durch die konstante Bandgeschwindigkeit v ergibt die von einer Produkteinheit benötigte Zeit, um das Band zu durchlaufen. Multipliziert mit dem Anteil $(m-1)/M$ wird also für jede Station $m \in M$ beschrieben, wie lange die gerade betrachtete Produkteinheit bis zum Erreichen der Station m benötigt. Wenn das Durchlaufen einer Station genau einem Auflegeintervall einer Produktart i entspricht, dann sind $\frac{(m-1)}{M} \cdot \frac{L}{v}$ und $(m-1) \cdot c_i$ identisch. Da $t_{ij}^m \geq 0$, kann wegen $m=1$ der Maximumausdruck nie negativ werden.

Bei der Berechnung der Zeit, welche zwischen dem Zeitpunkt des Beginns der Einrüstung des Fließbandes und dem Zeitpunkt des Bandverlassens der ersten Einheit der zuerst aufgelegten Produktart j liegt, t_{0j} , muß zu der gemäß (2.8.1) berechneten Zeit t_{0j}^e diejenige Zeit hinzugerechnet werden, welche die Einheit für das Durchlaufen des Bandes benötigt, d. h. $\frac{L}{v}$.

t_{0j} berechnet sich demnach wie folgt:

$$t_{0j} = t_{0j}^e + \frac{L}{v}, \quad j = 1(1)I-1 \quad (2.8.2)$$

Analog wird die zwischen der Auflegung der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i und der „Einlastung“ der fiktiven Endproduktart 0 liegende Zeit wie folgt berechnet:

$$t_{i0}^e = \max \left\{ \frac{(m-1)}{M} \cdot \frac{L}{v} + d_i^m + t_{i0}^m \mid m \in M \right\}, \quad i = 1(1)I-1 \quad (2.9.1)$$

Bei der Berechnung der Zeit, welche zwischen dem Zeitpunkt des Bandverlassens der letzten Einheit der zuletzt aufgelegten Produktart i und dem Zeitpunkt des Abschlusses der Ausrüstung des Fließbandes liegt, t_{i0} , muß von der gemäß (2.9.1) berechneten Zeit t_{i0}^e diejenige Zeit abgezogen werden, welche die Einheit für das Durchlaufen des Bandes benötigt, d. h. wiederum $\frac{L}{v} \cdot t_{i0}$ berechnet sich demnach wie folgt:

$$t_{i0} = t_{i0}^e - \frac{L}{v}, \quad i = 1(1)I-1 \quad (2.9.2)$$

Bei der Ausrüstung ist es im Extremfall möglich, daß t_{i0} einen negativen Wert annimmt, d. h., daß die Ausrüstung des Bandes abgeschlossen ist, bevor die letzte Einheit von i das Band verlassen hat. Dies tritt nur dann ein, wenn in der letzten Station M die nach Bearbeitungs-ende zum Durchlaufen der Station benötigte Zeit größer als die Ausrüstzeit in M ist, und auch in allen anderen Stationen die Umrüstvorgänge bereits vor Bandverlassen der Einheit abgeschlossen sind, d. h., wenn gilt: $t_{i0}^m < \frac{M - (m-1)}{M} \cdot \frac{L}{v} - d_i^m, \quad m \in M$.

b) Kontinuierlicher Transport ohne Bandleerlauf bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen

In dem Produktionssystem, das durch kontinuierlichen Transport und starre relative räumliche Stationsgrenzen charakterisiert ist, erfolgt die Anpassung an die produktartenindividuellen Auflegeintervalle mittels entsprechender Regulierung der Bandgeschwindigkeit. Anders als in den im Abschnitt 2.3.1.3.1 betrachteten Produktionssituationen mit Bandleerlauf wird nun unterstellt, daß sich Einheiten verschiedener Produktarten gleichzeitig in unterschiedlichen Stationen zur Bearbeitung auf dem Fließband befinden können.

Zunächst muß für eine konkrete Produktlosfolge untersucht werden, ob eine Bandgeschwindigkeitsumstellung während des laufenden Bearbeitungs- bzw. Umrüstungsvollzugs überhaupt zulässig ist, da die Bandgeschwindigkeitsumstellung analog zu den zuvor beschriebenen Situationen nur dann zulässig sein kann, wenn die Bearbeitung der Vorgängerproduktart und die Umrüstung auf die Nachfolgerproduktart in jeder Station abgeschlossen sind, bevor die erste Einheit der Nachfolgerproduktart in der betrachteten Station eintrifft. Hierzu wird ermittelt, wie viele Produkteinheiten in welchen Stationen von einer Anpassung der Bandgeschwindigkeit bei einem Loswechsel betroffen sind, und für den Fall, daß verschiedene Zeitpunkte einen Bandgeschwindigkeitswechsel während des laufenden Fertigungsprozesses zulassen, hieraus der frühestmögliche gewählt.

Diese Form der Berechnung ist nur dann erforderlich, wenn die Auflegeintervalle aufeinanderfolgender Produktarten unterschiedlich sind. Sind die Auflegeintervalle aufeinanderfolgender Produktarten hingegen gleich, muß keine Veränderung der Bandgeschwindigkeit vorgenommen werden.

Loswechsel bei Produktarten mit gleichem Auflegeintervall

Ohne die Notwendigkeit, die Bandgeschwindigkeit zu ändern, erfolgt die Berechnung der Loswechselzeiten analog zu der zuvor betrachteten Produktionssituation des kontinuierlichen Transports, ohne Bandleerlauf und flexibler relativer räumlicher Stationsgrenzen, da lediglich berücksichtigt werden muß, daß in jeder Station sowohl die Bearbeitung der Vorgängerproduktart i als auch die Umrüstung von i auf die Nachfolgerproduktart j vor Eintreffen der ersten Einheit von j abgeschlossen sind.

Die Zeit t_{ij}^e und die Loswechselzeit t_{ij} berechnet sich jeweils wie folgt:

$$t_{ij}^e = \max \left\{ d_i^m + t_{ij}^m \mid m \in M \right\} \quad i, j = 1(1)I-1, \quad i \neq j \quad (2.10.1)$$

$$t_{ij} = t_{ij}^e, \quad i = 1(1)I-1, \quad j = 1(1)I-1, \quad i \neq j \quad (2.10.2)$$

Da in dieser Produktionssituation die Verweildauer in Station m für jede Produktart i bzw. j dem Auflegeintervall von i bzw. j entspricht, sind $\frac{(m-1) \cdot L}{M} \cdot \frac{L}{v}$ und $c_i(m-1)$ bzw. $c_j(m-1)$ identisch.

$$\begin{aligned} t_{0j}^e &= \max \left\{ t_{0j}^m - \frac{(m-1) \cdot L}{M} \cdot \frac{L}{v} \mid m \in M \right\} \\ &= \max \left\{ t_{0j}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\} \quad j = 1(1)I-1 \end{aligned} \quad (2.11.1)$$

$$t_{0j} = t_{0j}^e + \frac{L}{v}, \quad j = 1(1)I-1 \quad (2.11.2)$$

$$\begin{aligned} t_{i0}^e &= \max \left\{ \frac{(m-1) \cdot L}{M} \cdot \frac{L}{v} + d_i^m + t_{i0}^m \mid m \in M \right\} \\ &= \max \left\{ c_i(m-1) + d_i^m + t_{i0}^m \mid m \in M \right\} \quad i = 1(1)I-1 \end{aligned} \quad (2.12.1)$$

$$t_{i0} = t_{i0}^e - \frac{L}{v}, \quad i = 1(1)I-1 \quad (2.12.2)$$

Loswechsel von einer Produktart mit kleinerem auf eine Produktart mit größerem Auflegeintervall

Folgt auf eine Produktart i eine Produktart j mit relativ zu i größerem Auflegeintervall, muß die auf das Auflegeintervall der Produktart i abgestimmte Bandgeschwindigkeit v_i auf die auf das Auflegeintervall von j abgestimmte Bandgeschwindigkeit v_j reduziert werden, und zwar in dem Moment der Einlastung von j .

Für die Bestimmung des Einlastungszeitpunktes von j wird berücksichtigt, daß die letzte Einheit der Vorgängerproduktart i diejenigen Stationen, in welchen sie vor der Bandgeschwindigkeitsumstellung bearbeitet wird, schneller als die erste Einheit der Nachfolgerproduktart j erreicht und durchläuft. Bezeichnet m' die letzte Station, welche die letzte Einheit der Vorgängerproduktart i vor der Bandgeschwindigkeitsreduzierung, d. h. vor der Einlastung von j ,

durchläuft, muss für die bereits aus den zuvor betrachteten Produktionssituationen bekannte Verrechnung der Umrüstzeiten hier bedacht werden, daß die Taktzeitdifferenz nur aus den Stationen $m \leq m'$ verrechnet werden kann. Zunächst werden die möglichen Zeitpunkte der Auflegung der Nachfolgerproduktart j in Abhängigkeit von Station m' bestimmt.

Die folgende Abbildung 2.2 veranschaulicht anhand eines konkreten Beispiels, daß die letzte Einheit von i zum Erreichen jeder Station $m \leq m'$ weniger Zeit benötigt als die erste Einheit von j , und daß jede Station $m > m'$ relativ zu dem Zeitpunkt des Erreichens der Station $m = m'+1$ von beiden Einheiten gleich schnell erreicht wird. Die Abbildung zeigt eine Linie mit fünf Stationen, $M=5$, auf der von einer Produktart i mit einer Taktzeit von $c_i = 5$ [ZE/ME] auf eine Produktart j mit einer Taktzeit von $c_j = 10$ [ZE/ME] gewechselt wird, wobei eine Bandgeschwindigkeitsreduzierung von $v_i = 4$ [LE/ZE] auf $v_j = 2$ [LE/ZE] in dem Moment vorgenommen wird, in dem die letzte Einheit von i die vierte Station erreicht, d. h. $m' = 3$:

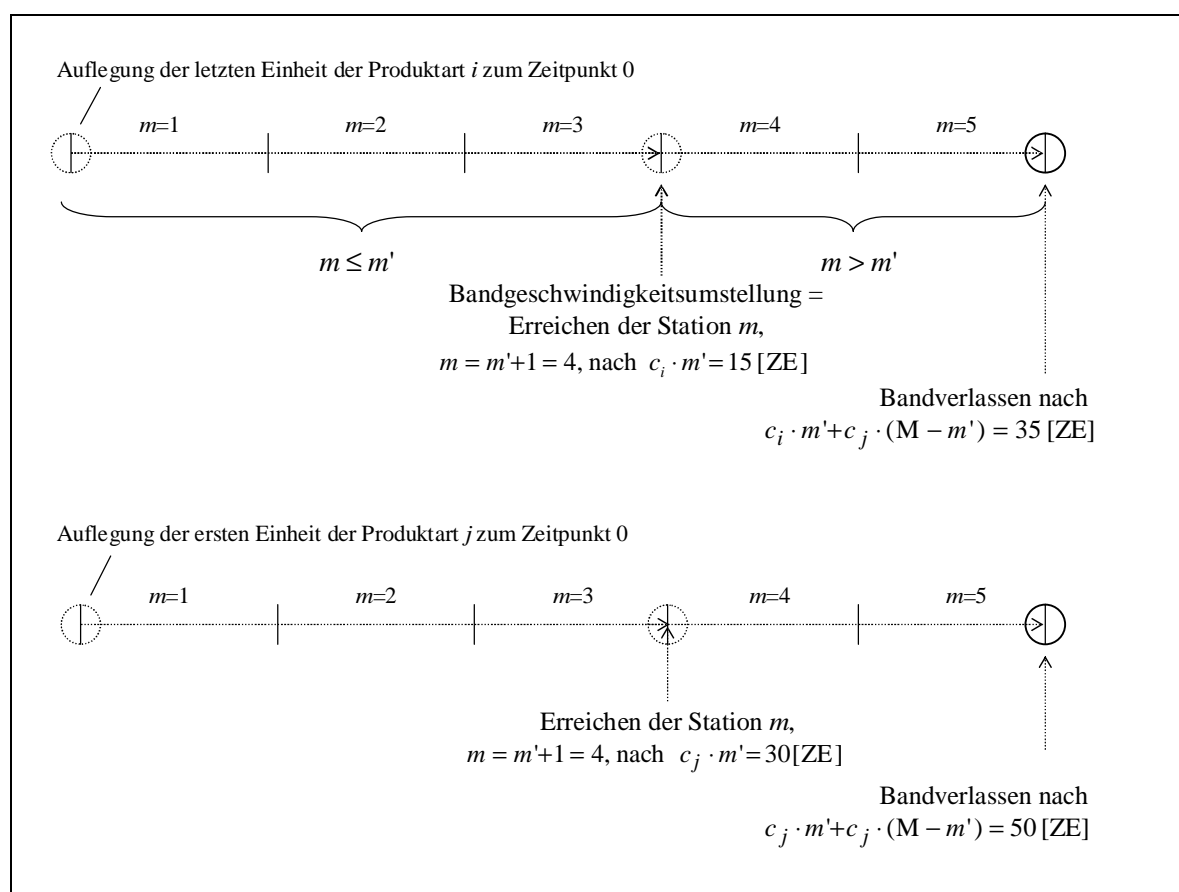


Abbildung 2.2: Loswechsel von einer Produktart mit kleinerem auf eine Produktart mit größerem Auflegeintervall

In Abhängigkeit von m' soll $t_{ij}^e(m')$ die zwischen dem Auflegezeitpunkt der letzten Einheit von i und dem Auflegezeitpunkt der ersten Einheit von j liegende Zeit beschreiben, die sich dann ergibt, wenn die Bandgeschwindigkeit genau in dem Moment umgestellt wird, in dem die letzte Einheit von i die Station m' durchlaufen hat bzw. $m'+1$ erreicht.

Für jedes m' sind die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ wie folgt zu berechnen:

$$t_{ij}^e(m') = c_i \cdot m', \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i < c_j \quad (2.13)$$

Nun ist zu prüfen, ob eine oder mehrere Stationen m' existieren, die sowohl die Bearbeitung der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i als auch die Umrüstung von i auf j in jeder Station vor Eintreffen der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart j gewährleisten. Damit m' zulässig ist, müssen jeweils die folgenden Ungleichungen erfüllt sein:

$$c_i(m-1) + d_i^m + t_{ij}^m - c_j(m-1) \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \leq m',$$

und

$$d_i^m + t_{ij}^m + c_i \cdot m' - c_j \cdot m' \leq t_{ij}^e(m'), \quad m > m',$$

$$i, j \in I, \quad c_i < c_j \quad (2.14)$$

In jeder Station $m \in M$ muß gewährleistet sein, daß vor dem Eintreffen der ersten Einheit von j die letzte Einheit von i fertig bearbeitet, d_i^m , sowie die Umrüstung von i auf j abgeschlossen ist, t_{ij}^m , und:

- in der ersten Ungleichung: das Erreichen jeder Station $m \leq m'$ für die letzte Einheit von i schneller als für die erste Einheit von j geht.
- in der zweiten Ungleichung: das Erreichen jeder Station $m > m'$ von den unterschiedlichen Auflegeintervallen bis zu der Station m' beeinflußt wird; da relativ zu dem Zeitpunkt des Erreichens der Station $m'+1$ die beiden Einheiten aufgrund der angepaßten Bandgeschwindigkeit zum Erreichen jeder Station $m > m'$ gleich lang benötigen, $(m-m') \cdot c_j$, muß diese Zeit in der Ungleichung nicht erfaßt werden.

Die Taktzeitunterschiede zusammenfassend wird (2.14) wie folgt umformuliert:

$$d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot (m-1) \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \leq m',$$

und

$$d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot m' \leq t_{ij}^e(m'), \quad m > m',$$

$$i, j \in I, \quad c_i < c_j \quad (2.15.1)$$

Die beiden Ungleichungen zu einer Ungleichung zusammenfassend wird (2.15.1) wie folgt umformuliert:

$$d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M,$$

$$i, j \in I, \quad c_i < c_j \quad (2.15.2)$$

Existieren ein oder mehrere m' , welche die Bedingungen (2.15.2) für alle $m \in M$ erfüllen, bestimmt hiervon wegen (2.13) das kleinste m' die Zeit t_{ij}^e :

$$\begin{aligned}
 t_{ij}^e &= t_{ij}^e(m^*), \\
 m^* &= \min \left\{ m \mid d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \right\}, \\
 i, j &\in I, \quad c_i < c_j
 \end{aligned} \tag{2.16.1}$$

Für die Berechnung der Loswechselzeiten t_{ij} muß ausgehend von den gemäß (2.16.1) bestimmten t_{ij}^e berücksichtigt werden, daß die erste Einheit von der Produktart j alle Stationen mit der relativ zu der Bandgeschwindigkeit v_i langsameren Bandgeschwindigkeit v_j durchläuft, d. h. $\frac{L}{v_j}$ benötigt. Die letzte Einheit von der Produktart i hingegen durchläuft das Band bis zu der Station m^* noch mit der schnelleren Bandgeschwindigkeit v_i , und die hinter m^* liegenden Stationen mit der Bandgeschwindigkeit v_j , d. h. benötigt insgesamt $\frac{L}{v_i} \cdot \frac{m^*}{M} + \frac{L}{v_j} \cdot \frac{(M-m^*)}{M}$ Zeiteinheiten dafür.

Die Loswechselzeiten t_{ij} berechnen sich demnach wie folgt:

$$\begin{aligned}
 t_{ij} &= t_{ij}^e + \frac{L}{v_j} - \left(\frac{L}{v_i} \cdot \frac{m^*}{M} + \frac{L}{v_j} \cdot \frac{M-m^*}{M} \right) \\
 &= t_{ij}^e + \frac{L}{v_j} \left(1 - \frac{M-m^*}{M} \right) - \frac{L}{v_i} \cdot \frac{m^*}{M} \\
 &= t_{ij}^e + \left(\frac{L}{v_j} - \frac{L}{v_i} \right) \cdot \frac{m^*}{M}, \quad i, j \in I, \quad c_i < c_j, \quad v_i > v_j
 \end{aligned} \tag{2.16.2}$$

Existiert kein m' , welches die Bedingungen (2.15.1) für alle $m \in M$ erfüllt, erfolgt die Ermittlung der t_{ij}^e und der t_{ij} analog zu dem Fall mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn in den einzelnen Stationen zum jeweils frühestmöglichen Zeitpunkt (vgl. (2.6.1) und (2.6.2) in Abschnitt 2.3.1.3.1).

Loswechsel von einer Produktart mit größerem auf eine Produktart mit kleinerem Auflegeintervall

Folgt auf eine Produktart i eine Produktart j mit relativ zu i kleinerem Auflegeintervall, kann die Bandgeschwindigkeit entsprechend des kleineren Auflegeintervalls erhöht werden, sobald die letzte Einheit der Vorgängerproduktart i die Bearbeitung in der letzten Station beendet hat. Aus Vereinfachungsgründen wird jedoch angenommen, daß die Umstellung der Bandgeschwindigkeit erst nach dem vollständigen Durchlaufen der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i der letzten Station erfolgen kann. Mit der Einlastung der Nachfolgerproduktart j kann jedoch schon früher begonnen werden, sofern die immer zu beachtenden Zulässigkeitsbedingungen in jeder Station erfüllt sind. Werden von der Nachfolgerproduktart j bereits vor der Bandgeschwindigkeitsumstellung Einheiten aufgelegt, müssen die zeitlichen Abstände zwischen den Einheiten so bemessen werden, als ob von Anfang an mit der schnelleren Band-

geschwindigkeit gefahren worden wäre, damit es nach der Bandgeschwindigkeitsumstellung nicht zu Arbeitsüberlastungen in den Stationen kommen kann. In diesem Fall beschreibt m' die letzte Station, welche die erste Einheit der Nachfolgerproduktart j vor der Bandgeschwindigkeitsumstellung durchläuft. Für die Bestimmung des Einlastungszeitpunktes der Nachfolgerproduktart j muß also berücksichtigt werden, daß die erste Einheit von j diejenigen zu dem Zeitpunkt der Bandgeschwindigkeitsveränderung noch vor ihr liegenden Stationen schneller als die letzte Einheit der Vorgängerproduktart erreicht und durchläuft.

Analog zu dem zuvor betrachteten Fall des Produktwechsels von einer Produktart mit kleinerem auf eine Produktart mit größerem Auflegeintervall, werden in dem hier betrachteten Fall des Produktwechsels von einer Produktart mit größerem auf eine Produktart mit kleinerem Auflegeintervall zunächst die möglichen Zeitpunkte der Auflegung der Nachfolgerproduktart j in Abhängigkeit von den Stationen m' bestimmt.

Die folgende Abbildung 2.3 veranschaulicht anhand eines konkreten Beispiels, daß die letzte Einheit von i zum Erreichen jeder Station $m \leq m'$ genauso viel Zeit benötigt wie die erste Einheit von j , und daß jede Station $m > m'$ relativ zu dem Zeitpunkt des Erreichens der Station $m'+1$ von der ersten Einheit der Produktart j schneller erreicht wird als von der letzten Einheit der Produktart i . Die Abbildung zeigt eine Linie mit fünf Stationen, $M=5$, auf der von einer Produktart i mit einer Taktzeit von $c_i = 10$ [ZE/ME] auf eine Produktart j mit einer Taktzeit von $c_j = 5$ [ZE/ME] gewechselt wird, wobei eine Erhöhung der Bandgeschwindigkeit von $v_i = 2$ [LE/ZE] auf $v_j = 4$ [LE/ZE] in dem Moment vorgenommen wird, in dem die erste Einheit von j die vierte Station erreicht, d. h. $m' = 3$:

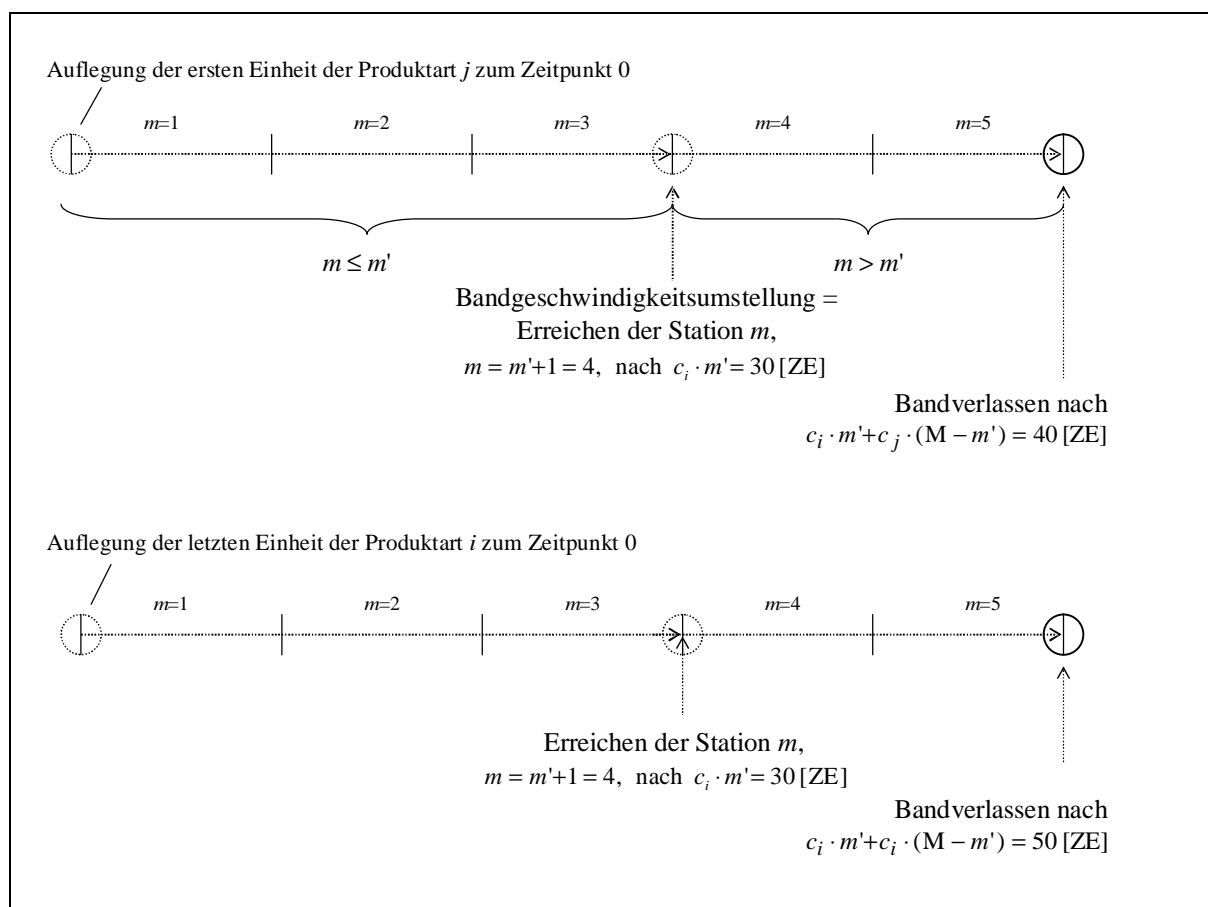


Abbildung 2.3: Loswechsel von einer Produktart mit größerem auf eine Produktart mit kleinerem Auflegeintervall

In Abhängigkeit von m' soll $t_{ij}^e(m')$ die zwischen dem Auflegezeitpunkt der letzten Einheit von i und dem Auflegezeitpunkt der ersten Einheit von j liegende Zeit beschreiben, die sich dann ergibt, wenn die Bandgeschwindigkeit genau in dem Moment umgestellt wird, in dem die erste Einheit von j die Station m' durchlaufen hat bzw. $m'+1$ erreicht.

Für jedes m' sind die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ wie folgt zu berechnen:

$$t_{ij}^e(m') = c_i \cdot (M - m'), \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i > c_j \quad (2.17)$$

Der relative Abstand des Einlastungszeitpunktes der Nachfolgerproduktart j zu dem Auflegezeitpunkt der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i umfaßt den Zeitraum, welchen die letzte Einheit zum Durchlaufen aller Stationen benötigt, d. h. $M \cdot c_i$, abzüglich desjenigen Zeitraums, welchen sich die erste Einheit von j schon mit der dem Auflegeintervall von i entsprechenden Bandgeschwindigkeit auf dem Band in Bearbeitung befindet, $m' \cdot c_i$.

Nun ist wiederum zu prüfen, ob eine oder mehrere Stationen m' existieren, die sowohl die Bearbeitung der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i als auch die Umrüstung von i auf j in jeder Station vor Eintreffen der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart j gewährleisten. Damit m' zulässig ist, müssen jeweils die folgenden Ungleichungen erfüllt sein:

$$d_i^m + t_{ij}^m \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \leq m',$$

und

$$c_i \cdot (m-1) + d_i^m + t_{ij}^m - c_j \cdot (m-1) - c_i \cdot m' + c_j \cdot m' \leq t_{ij}^e(m'), \quad m > m',$$

$$i, j \in I, \quad c_i > c_j \quad (2.18)$$

In jeder Stationen $m \in M$ muß gewährleistet sein, daß vor dem Eintreffen der ersten Einheit von j die letzte Einheit von i fertig bearbeitet, d_i^m , sowie die Umrüstung von i auf j abgeschlossen ist, t_{ij}^m , und:

- in der ersten Ungleichung: es ist keine weitere Berücksichtigung erforderlich, da die betrachteten Produkteinheiten jede Station $m \leq m'$ vor der Bandgeschwindigkeitsumstellung gleich schnell erreichen.
- in der zweiten Ungleichung: es muß berücksichtigt werden, daß die letzte Einheit der Vorgängerproduktart i relativ zu dem Zeitpunkt des Erreichens der Station $m'+1$ bis zum Erreichen jeder Station $m > m'$ länger als die erste Einheit von j benötigt. Zum besseren Verständnis sind die einzelnen Summanden in (2.18) auseinandergezogen. Es werden die Zeiten, welche die Produkteinheiten jeweils bis zu dem Erreichen der Station m benötigen, wenn sie durchgängig bis m mit einer ihrem Auflegeintervall entsprechenden Bandgeschwindigkeit transportiert werden, $c_i(m-1)$ bzw. $c_j(m-1)$, in dem Umfang der bis zu der Station m' berechneten Unterschiede korrigiert, $c_i \cdot m'$ bzw. $c_j \cdot m'$, da die Produkteinheiten bis zu allen Stationen $m \leq m'$ mit derselben Bandgeschwindigkeit befördert werden und somit relativ zu ihrem Auflegezeitpunkt dieselbe Zeit zum Erreichen von m' benötigen, $c_i \cdot m'$.

Die Taktzeitunterschiede zusammenfassend wird (2.18) wie folgt umformuliert:

$$\begin{aligned}
 d_i^m + t_{ij}^m &\leq t_{ij}^e(m'), \quad m \leq m', \\
 \text{und} \\
 d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot (m-1-m') &\leq t_{ij}^e(m'), \quad m > m', \\
 i, j \in I, \quad c_i > c_j
 \end{aligned} \tag{2.19.1}$$

Die beiden Ungleichungen zu einer Ungleichung zusammenfassend wird (2.19.1) wie folgt umformuliert:

$$\begin{aligned}
 d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m-1-m')\} &\leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M, \\
 i, j \in I, \quad c_i > c_j
 \end{aligned} \tag{2.19.2}$$

Existieren ein oder mehrere m' , welche die Bedingungen (2.19.2) für alle $m \in M$ erfüllen, bestimmt hiervon (wegen 2.17) das größte m' die Zeit t_{ij}^e :

$$\begin{aligned}
 t_{ij}^e &= t_{ij}^e(m^*), \\
 m^* &= \max \left\{ m \mid d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m-1-m')\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \right\} \\
 i, j \in I, \quad c_i > c_j
 \end{aligned} \tag{2.20.1}$$

Für die Berechnung der Loswechselzeiten t_{ij} muß ausgehend von den gemäß (2.20.1) bestimmten t_{ij}^e berücksichtigt werden, daß die erste Einheit von der Produktart j das Band bis zu der Station m^* noch mit der langsameren Bandgeschwindigkeit v_i , und die hinter m^* liegenden Stationen mit der schnelleren Bandgeschwindigkeit v_j durchläuft, d. h. insgesamt $\frac{L}{v_i} \cdot \frac{m^*}{M} + \frac{L}{v_j} \cdot \frac{(M-m^*)}{M}$ benötigt. Die letzte Einheit von der Produktart i hingegen durchläuft alle Stationen mit der relativ zu der Bandgeschwindigkeit v_j langsameren Bandgeschwindigkeit v_i , d. h. benötigt $\frac{L}{v_i}$ Zeit dafür.

Die Loswechselzeiten t_{ij} berechnen sich demnach wie folgt:

$$\begin{aligned}
 t_{ij} &= t_{ij}^e + \left(\frac{L}{v_i} \cdot \frac{m^*}{M} + \frac{L}{v_j} \cdot \frac{M-m^*}{M} \right) - \frac{L}{v_i} \\
 &= t_{ij}^e + \frac{L}{v_i} \cdot \left(\frac{m^*}{M} - 1 \right) + \frac{L}{v_j} \cdot \left(1 - \frac{m^*}{M} \right) \\
 &= t_{ij}^e - \left(\frac{L}{v_i} - \frac{L}{v_j} \right) \cdot \left(1 - \frac{m^*}{M} \right)
 \end{aligned} \tag{2.20.2}$$

$i, j \in I, \quad c_i > c_j, \quad v_i < v_j$

Existiert kein m' , welches die Bedingungen (2.19.1) für alle $m \in M$ erfüllt, erfolgt die Ermittlung der t_{ij}^e und der t_{ij} analog zu dem Fall mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn in den einzelnen Stationen zum jeweils frühestmöglichen Zeitpunkt (vgl. (2.6.1) und (2.6.2) in Abschnitt 2.3.1.3.1).

2.3.1.4 Intermittierender Transport

Analog zum kontinuierlichen Transport besteht auch beim intermittierenden Transport die Möglichkeit, das Band erst leerlaufen zu lassen und den Takt der intermittierenden Fortbewegung entsprechend der produktartenindividuellen Taktzeiten zu regulieren, oder aber, mit dem Ziel, auch bei nicht einheitlichem Auflegeintervall aufeinanderfolgender Produktarten unnötige Leerzeiten zu vermeiden, eine Anpassung des getakteten Fortbewegens nach dem langsameren Takt der sich gleichzeitig zur Bearbeitung auf dem Band befindenden Produktarten vorzunehmen.

Die jeweils einschlägigen Berechnungen des kontinuierlichen Transports finden in modifizierter Form entsprechend Anwendung für den intermittierenden Transport. Die Modifikation basiert auf der Annahme, daß mit den Umrüstarbeiten in den Stationen erst begonnen werden kann, wenn die letzte Produkteinheit der Vorgängerproduktart ruckartig weiterbewegt wurde, anstatt nach eventuell zeitlich früher eintretendem Bearbeitungsende. In jeder Station muß demzufolge statt der Bearbeitungszeit der Vorgängerproduktart i , d_i^m , jeweils die Länge eines vollen Auflegeintervalls von i , c_i , berücksichtigt werden.

2.3.1.4.1 Intermittierender Transport mit Bandleerlauf

In der Situation des intermittierenden Transports mit Bandleerlauf kann eine analoge Differenzierung wie im Abschnitt 2.3.1.3.1 vorgenommen werden.

a) Umrüstungsbeginn in jeder Station nach Bandverlassen der Vorgängerproduktart

Der frühestmögliche Zeitpunkt der Auflegung der Nachfolgerproduktart j relativ zu dem Zeitpunkt des Auflegens der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i berechnet sich in der Produktionssituation des Umrüstungsbeginns in jeder Station nach Bandverlassen der Vorgängerproduktart analog zu der Situation bei kontinuierlichem Transport (vgl. (2.5.1) und (2.5.2) in Abschnitt 2.3.1.3.1).

t_{ij}^e und t_{ij} berechnen sich demnach gemäß:

$$t_{ij}^e = M \cdot c_i + \max \left\{ t_{ij}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\} \quad i, j \in I, \quad i \neq j \quad (2.21.1)$$

$$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i) \quad i, j \in I, \quad i \neq j \quad (2.21.2)$$

b) Umrüstungsbeginn in jeder Station zu dem frühestmöglichen Zeitpunkt

In der Produktionssituation des Umrüstungsbeginns in jeder Station zum frühestmöglichen Zeitpunkt findet ebenfalls analog die im Abschnitt 2.3.1.3.1 aufgezeigte Berechnung (2.6.1) Anwendung, wobei die Zeit t_{ij}^e gegenüber (2.6.1) aufgrund der eingangs des Abschnitts 2.3.1.4 getroffenen Annahme, daß mit den Umrüstarbeiten erst begonnen werden kann, wenn die letzte Produkteinheit der Vorgängerproduktart ruckartig weiterbewegt wurde, leicht modifiziert werden muß. Demnach wird anstelle der Stationsbearbeitungszeit jeweils die Länge eines vollen Auflegeintervalls berücksichtigt.

t_{ij}^e und t_{ij} berechnen sich demnach gemäß:

$$t_{ij}^e = \max \left\{ M \cdot c_i, \max_{m \in M} \left\{ t_{ij}^m + c_i - (c_j - c_i)(m-1) \right\} \right\} \quad i, j \in I, \quad i \neq j \quad (2.22.1)$$

$$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i) \quad i, j \in I, \quad i \neq j \quad (2.22.2)$$

2.3.1.4.2 Intermittierender Transport ohne Bandleerlauf

Da die relativen räumlichen Stationsgrenzen in dem Produktionssystem mit intermittierendem Transport starr sind, entfällt eine analoge Betrachtung zu dem Produktionssystem des kontinuierlichen Transports ohne Bandleerlauf bei flexiblen relativen räumlichen Stationsgrenzen. Hingegen besteht jedoch eine Analogie zu den vorgenommenen Differenzierungen in dem Produktionssystem des kontinuierlichen Transports ohne Bandleerlauf bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen.

Sowohl für den Fall des Loswechsels bei Produktarten mit gleichem Auflegeintervall, als auch für die beiden Fälle des Loswechsels von einer Produktart mit kleinerem auf eine Produktart mit größerem Auflegeintervall et vice versa, finden die Berechnungen der Loswechselzeiten in Abschnitt 2.3.1.3.2 unter Berücksichtigung der beschriebenen Modifikation (Anrechnung eines vollen Auflegeintervalls anstelle der Stationsbearbeitungszeit) analog Anwendung. Diesbezügliche Ausführungen finden auch bei der in diesem Abschnitt betrachteten Situation des intermittierenden Transports Anwendung und werden im folgenden nicht wiederholt.

Loswechsel bei Produktarten mit gleichem Auflegeintervall

Analog zu den Berechnungen in (2.10.1)-(2.12.2) werden t_{ij}^e und t_{ij} wie folgt ermittelt:

$$t_{ij}^e = \max \left\{ c_i + t_{ij}^m \mid m \in M \right\} \quad i, j = 1(1)I-1, \quad i \neq j \quad (2.23.1)$$

$$t_{ij} = t_{ij}^e, \quad i = 1(1)I-1, \quad j = 1(1)I-1, \quad i \neq j \quad (2.23.2)$$

$$t_{0j}^e = \max \left\{ t_{0j}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\} \quad j = 1(1)I-1 \quad (2.24.1)$$

$$t_{0j} = t_{0j}^e + \frac{L}{v}, \quad j = 1(1)I-1 \quad (2.24.2)$$

$$t_{i0}^e = \max \left\{ c_i \cdot m + t_{i0}^m \mid m \in M \right\} \quad i = 1(1)I-1 \quad (2.25.1)$$

$$t_{i0} = t_{i0}^e - \frac{L}{v}, \quad i = 1(1)I-1 \quad (2.25.2)$$

Loswechsel von einer Produktart mit kleinerem auf eine Produktart mit größerem Auflegeintervall

Analog zu (2.13) sind für jedes m' die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ wie folgt zu berechnen:

$$t_{ij}^e(m') = c_i \cdot m', \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i < c_j \quad (2.26)$$

Analog zu (2.14) bzw. (2.15.1), (2.15.2) ist wiederum zu prüfen, ob eine oder mehrere Stationen m' existieren, die sowohl die Bearbeitung der letzten Einheit der Vorgängerproduktart i als auch die Umrüstung von i auf j in jeder Station vor Eintreffen der ersten Einheit der Nachfolgerproduktart j gewährleisten. Damit m' zulässig ist, müssen jeweils die folgenden Ungleichungen erfüllt sein:

$$c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot (m-1) \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \leq m',$$

und

$$c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot m' \leq t_{ij}^e(m'), \quad m > m', \quad (2.27.1)$$

$$i, j \in I, \quad c_i < c_j$$

Die beiden Ungleichungen zu einer Ungleichung zusammenfassend wird (2.27.1) wie folgt umformuliert:

$$c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M, \quad (2.27.2)$$

$$i, j \in I, \quad c_i < c_j$$

Existieren ein oder mehrere m' , welche die Bedingungen (2.27.2) für alle $m \in M$ erfüllen, bestimmt hiervon analog zu (2.16.1) das kleinste m' die Zeit t_{ij}^e . Auch die Loswechselzeit t_{ij} berechnet sich ausgehend von t_{ij}^e analog zu (2.16.2):

$$t_{ij}^e = t_{ij}^e(m^*),$$

$$m^* = \min \left\{ m' \mid c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \right\}, \quad (2.28.1)$$

$$i, j \in I, \quad c_i < c_j$$

$$t_{ij} = t_{ij}^e + \left(\frac{L}{v_j} - \frac{L}{v_i} \right) \cdot \frac{m^*}{M}, \quad i, j \in I, \quad c_i < c_j, \quad v_i > v_j \quad (2.28.2)$$

Existiert kein m' , welches die Bedingungen (2.27.1) für alle $m \in M$ erfüllt, erfolgt die Ermittlung der t_{ij}^e und der t_{ij} analog zu dem Fall mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn zum jeweils frühestmöglichen Zeitpunkt (vgl. (2.22.1) und (2.22.2) in Abschnitt 2.3.1.4.1).

Loswechsel von einer Produktart mit größerem auf eine Produktart mit kleinerem Auflegeintervall

Analog zu (2.17) sind für jedes m' die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ wie folgt zu berechnen:

$$t_{ij}^e(m') = c_i \cdot (M - m'), \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i > c_j \quad (2.29)$$

Analog zu (2.18) bzw. (2.19.1), (2.19.2) ist zu prüfen, ob zulässige Stationen m' existieren:

$$c_i + t_{ij}^m \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \leq m',$$

und

$$c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot (m - 1 - m') \leq t_{ij}^e(m'), \quad m > m', \quad (2.30.1)$$

$$i, j \in I, \quad c_i > c_j$$

Die beiden Ungleichungen zu einer Ungleichung zusammenfassend wird (2.30.1) wie folgt umformuliert:

$$c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m - 1 - m')\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M, \quad (2.30.2)$$

$$i, j \in I, \quad c_i > c_j$$

Existieren ein oder mehrere m' , welche die Bedingungen (2.30.2) für alle $m \in M$ erfüllen, bestimmt hiervon analog zu (2.20.1) das größte m' die Zeit t_{ij}^e . Auch die Loswechselzeit t_{ij} berechnet sich ausgehend von t_{ij}^e analog zu (2.20.2):

$$t_{ij}^e = t_{ij}^e(m^*),$$

$$m^* = \max \left\{ m' \mid c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m - 1 - m')\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \right\}, \quad (2.31.1)$$

$$i, j \in I, \quad c_i > c_j$$

$$t_{ij} = t_{ij}^e - \left(\frac{L}{v_i} - \frac{L}{v_j} \right) \cdot \left(1 - \frac{m^*}{M} \right), \quad i, j \in I, \quad c_i > c_j, \quad v_i < v_j \quad (2.31.2)$$

Existiert kein m' , welches die Bedingungen (2.30.1) für alle $m \in M$ erfüllt, erfolgt die Ermittlung der t_{ij}^e und der t_{ij} analog zu dem Fall mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn zum jeweils frühestmöglichen Zeitpunkt (vgl. (2.22.1) und (2.22.2) in Abschnitt 2.3.1.4.1).

2.3.1.5 Tabellarische Zusammenfassung der Loswechselzeiten

Generell: $t_{ii} = c_i, i \in I$		
t_{ij}	Kontinuierlich Umrüstungsbeginn grundsätzlich nach Bearbeitung von i	Intermittierend Umrüstungsbeginn grundsätzlich nach vollem Auflegeintervall von i
mit Bandleerlauf (immer starre relative räumliche Stationsgrenzen)		
Umrüstungsbeginn nach Bandverlassen von Produktart i	$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i), \quad i, j \in I, \quad i \neq j$ mit : $t_{ij}^e = M \cdot c_i + \max \left\{ t_{ij}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\}$ $i, j \in I, \quad i \neq j$	$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i), \quad i, j \in I, \quad i \neq j$ mit : $t_{ij}^e = M \cdot c_i + \max \left\{ t_{ij}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\}$ $i, j \in I, \quad i \neq j$
Umrüstungsbeginn frühestmöglich	$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i), \quad i, j \in I, \quad i \neq j$ mit : $t_{ij}^e = \max \left\{ M \cdot c_i, \max \left\{ t_{ij}^m + d_i^m - (c_j - c_i)(m-1) \mid m \in M \right\} \right\}$ $i, j \in I, \quad i \neq j$	$t_{ij} = t_{ij}^e + M \cdot (c_j - c_i), \quad i, j \in I, \quad i \neq j$ mit : $t_{ij}^e = \max \left\{ M \cdot c_i, \max \left\{ t_{ij}^m + c_i - (c_j - c_i)(m-1) \mid m \in M \right\} \right\}$ $i, j \in I, \quad i \neq j$
ohne Bandleerlauf (Umrüstungsbeginn immer frühestmöglich)		
flexible rel. räumliche Stationsgrenzen	$t_{ij} = t_{ij}^e, \quad i = 1(1)I-1, \quad j = 1(1)I-1, \quad i \neq j$ mit : $t_{ij}^e = \max \left\{ d_i^m + t_{ij}^m \mid m \in M \right\}$ $i, j = 1(1)I-1, i \neq j$ $t_{0j} = t_{0j}^e + \frac{L}{v}, \quad j = 1(1)I-1$ mit : $t_{0j}^e = \max \left\{ t_{0j}^m - \frac{(m-1)}{M} \cdot \frac{L}{v} \mid m \in M \right\}$ $j = 1(1)I-1$ $t_{i0} = t_{i0}^e - \frac{L}{v}, \quad i = 1(1)I-1$ mit : $t_{i0}^e = \max \left\{ \frac{(m-1)}{M} \cdot \frac{L}{v} + d_i^m + t_{i0}^m \mid m \in M \right\}$ $i = 1(1)I-1$	(-)

...(nächste Seite)

t_{ij}	Kontinuierlich Umrüstungsbeginn grundsätzlich nach Bearbeitung von i	Intermittierend Umrüstungsbeginn grundsätzlich nach vollem Auflegeintervall von i
starre rel. räumliche Stationsgrenzen		
$c_i = c_j$	$t_{ij} = t_{ij}^e, \quad i = 1(1)I-1, \quad j = 1(1)I-1, \quad i \neq j$ mit : $t_{ij}^e = \max \left\{ d_i^m + t_{ij}^m \mid m \in M \right\}$ $i, j = 1(1)I-1, i \neq j$ $t_{0j} = t_{0j}^e + \frac{L}{v}, \quad j = 1(1)I-1$ mit : $t_{0j}^e = \max \left\{ t_{0j}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\} \quad j = 1(1)I-1$ $t_{i0} = t_{i0}^e - \frac{L}{v}, \quad i = 1(1)I-1$ mit: $t_{i0}^e = \max \left\{ c_i(m-1) + d_i^m + t_{i0}^m \mid m \in M \right\}, \quad i = 1(1)I-1$	$t_{ij} = t_{ij}^e, \quad i = 1(1)I-1, \quad j = 1(1)I-1, \quad i \neq j$ mit : $t_{ij}^e = \max \left\{ c_i + t_{ij}^m \mid m \in M \right\}$ $i, j = 1(1)I-1, i \neq j$ $t_{0j} = t_{0j}^e + \frac{L}{v}, \quad j = 1(1)I-1$ mit : $t_{0j}^e = \max \left\{ t_{0j}^m - c_j(m-1) \mid m \in M \right\} \quad j = 1(1)I-1$ $t_{i0} = t_{i0}^e - \frac{L}{v}, \quad i = 1(1)I-1$ mit : $t_{i0}^e = \max \left\{ c_i \cdot m + t_{i0}^m \mid m \in M \right\} \quad i = 1(1)I-1$
$c_i < c_j$	Berechne für jedes m' die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ gemäß: $t_{ij}^e(m') = c_i \cdot m', \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i < c_j$ Wenn ein oder mehrere m' existieren, welche folgende Ungleichung erfüllen: $d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M,$ $i, j \in I, \quad c_i < c_j$ Dann: $t_{ij} = t_{ij}^e + \left(\frac{L}{v_j} - \frac{L}{v_i} \right) \cdot \frac{m^*}{M},$ $i, j \in I, \quad c_i < c_j, \quad v_i > v_j$ mit: $t_{ij}^e = t_{ij}^e(m^*),$ $m^* = \min \left\{ \begin{array}{l} m \mid d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \\ \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \end{array} \right\},$ $i, j \in I, \quad c_i < c_j$	Berechne für jedes m' die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ gemäß: $t_{ij}^e(m') = c_i \cdot m', \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i < c_j$ Wenn ein oder mehrere m' existieren, welche folgende Ungleichung erfüllen: $c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M,$ $i, j \in I, \quad c_i < c_j$ Dann: $t_{ij} = t_{ij}^e + \left(\frac{L}{v_j} - \frac{L}{v_i} \right) \cdot \frac{m^*}{M},$ $i, j \in I, \quad c_i < c_j, \quad v_i > v_j$ mit: $t_{ij}^e = t_{ij}^e(m^*),$ $m^* = \min \left\{ \begin{array}{l} m \mid c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \min\{(m-1), m'\} \\ \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \end{array} \right\},$ $i, j \in I, \quad c_i < c_j$

...(nächste Seite)

t_{ij}	Kontinuierlich Umrüstungsbeginn grundsätzlich nach Bearbeitung von i	Intermittierend Umrüstungsbeginn grundsätzlich nach vollem Auflegeintervall von i
	Sonst: ermittle die zugehörigen t_{ij}^e und t_{ij} analog zu der Situation mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn zum frühestmöglichen Zeitpunkt	Sonst: ermittle die zugehörigen t_{ij}^e und t_{ij} analog zu der Situation mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn zum frühestmöglichen Zeitpunkt
$c_i > c_j$	Berechne für jedes m' die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ gemäß: $t_{ij}^e(m') = c_i \cdot (M - m'), \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i > c_j$ Wenn ein oder mehrere m' existieren, welche folgende Ungleichung erfüllen: $d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m-1-m')\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i > c_j$ Dann: $t_{ij} = t_{ij}^e - \left(\frac{L}{v_i} - \frac{L}{v_j} \right) \cdot \left(1 - \frac{m^*}{M} \right)$ $i, j \in I, \quad c_i > c_j, \quad v_i < v_j$ mit: $t_{ij}^e = t_{ij}^e(m^*),$ $m^* = \max \left\{ \begin{array}{l} m d_i^m + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m-1-m')\} \\ \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \end{array} \right\},$ $i, j \in I, \quad c_i > c_j$ Sonst: ermittle die zugehörigen t_{ij}^e und t_{ij} analog zu der Situation mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn zum frühestmöglichen Zeitpunkt	Berechne für jedes m' die zugehörigen $t_{ij}^e(m')$ gemäß: $t_{ij}^e(m') = c_i \cdot (M - m'), \quad m' \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i > c_j$ Wenn ein oder mehrere m' existieren, welche folgende Ungleichung erfüllen: $c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m-1-m')\} \leq t_{ij}^e(m'), \quad m \in M, \quad i, j \in I, \quad c_i > c_j$ Dann: $t_{ij} = t_{ij}^e - \left(\frac{L}{v_i} - \frac{L}{v_j} \right) \cdot \left(1 - \frac{m^*}{M} \right)$ $i, j \in I, \quad c_i > c_j, \quad v_i < v_j$ mit: $t_{ij}^e = t_{ij}^e(m^*),$ $m^* = \max \left\{ \begin{array}{l} m c_i + t_{ij}^m - (c_j - c_i) \cdot \max\{0, (m-1-m')\} \\ \leq t_{ij}^e(m'), \quad m, m' \in M \end{array} \right\},$ $i, j \in I, \quad c_i > c_j$ Sonst: ermittle die zugehörigen t_{ij}^e und t_{ij} analog zu der Situation mit Bandleerlauf und Umrüstungsbeginn zum frühestmöglichen Zeitpunkt

Tabelle 2.2: Tabellarische Zusammenfassung der Loswechselzeiten

2.3.2 Loswechselkosten

Gemäß Annahme 19) fallen bei jedem Produktloswechsel reihenfolgeunabhängige- und reihenfolgeabhängige direkte Umrüstkosten an. Indirekte Umrüstkosten im Sinne von Opportunitätskosten für die während der Umrüstzeit nicht zur Produkterstellung genutzten Betriebsmittel werden aus den in Annahme 19) beschriebenen Gründen nicht berücksichtigt. Die reihenfolgeabhängigen Umrüstkosten bestehen in den Arbeitskosten der Werker in den Stationen, die reihenfolgeunabhängigen Umrüstkosten umfassen die für den Einsatz von Werkzeugen, Betriebsstoffen etc. anfallen Kosten der Umrüstungen. Letztere haben bei der angenommenen Reihenfolgeunabhängigkeit naturgemäß hinsichtlich der Reihenfolgebestimmung keine Entscheidungsrelevanz. Da das VLSP jedoch nicht nur die Reihenfolge-, sondern auch die Losgrößenbestimmung zum Gegenstand hat, müssen aufgrund der Entscheidungsrelevanz im Kontext der integrierten Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung auch die reihenfolgeunabhängigen Umrüstkosten Berücksichtigung finden.

Parameter

- c_{ij} Loswechselkosten bei einem Loswechsel von Produktart i auf Produktart j , $i, j = 1(1)I-1$, Ausrüstungskosten bei Produktionsende, $j=0$, $i=1(1)I-1$, Einrückungskosten bei Produktionsbeginn, $i=0$, $j=1(1)I-1$, [GE]
- c_{ij}^m Loswechselkosten in Station m bei einem Loswechsel von Produktart i auf Produktart j , $i, j = 1(1)I-1$, Ausrüstungskosten der Station m bei Produktionsende, $j=0$, $i=1(1)I-1$, Einrückungskosten der Station m bei Produktionsbeginn, $i=0$, $j=1(1)I-1$, $m=1(1)M$, [GE]
- k_d^m direkte Umrüstkosten in der Station m , $m=1(1)M$, [GE]
- k_w^m Werkerlohnsatz in der Station m , $m=1(1)M$, [GE/ZE]

Definitionsbereiche

$$c_{ij} \geq 0, \quad i, j \in I$$

$$k_d^m, k_w^m \geq 0, \quad m=1(1)M$$

$$c_{ij}^m \geq 0, \quad m=1(1)M, i, j \in I$$

Berechnung der Loswechselkosten

Analog zu den Umrüstzeiten $t_{ii}^m = 0$, $m \in M$, $i \in I$, sind auch keine Loswechselkosten zu berücksichtigen, wenn zwei Fertigungslose derselben Produktart aufeinander folgen

$$c_{ii}^m = 0, \quad m = 1(1)M, \quad i \in I \quad (2.32)$$

Die Loswechselkosten c_{ij}^m je Umrüstung von der Produktart i auf die Produktart j in Station m , wobei $i \neq j$, berechnen sich als Summe aus dem Produkt von Stationslohnsatz k_w^m und Umrüstzeit t_{ij}^m und den reihenfolgeunabhängigen Umrüstkosten k_d^m wie folgt:

$$c_{ij}^m = k_w^m \cdot t_{ij}^m + k_d^m, \quad m = 1(1)M, \quad i \neq j, \quad i, j \in I \quad (2.33)$$

Die Loswechselkosten c_{ij} berechnen sich dann als Summe über alle Loswechselkosten aller Stationen $m=1(M)$ gemäß:

$$c_{ij} = \sum_{m=1}^M c_{ij}^m, \quad i, j \in I \quad (2.34)$$

Kapitel 3

Modellierung des VLSP für Mehrproduktfließbandfertigung

Das VLSP wird in zwei Ausprägungen beschrieben. In Abschnitt 3.1 wird der Spezialfall des VLSP als Modell formuliert, bei welchem die Losgröße einer Produktart durch Gruppierung der in den externen Aufträgen nachgefragten Mengeneinheiten der betrachteten Produktart gebildet wird. Das Modell zur Abbildung des Spezialfalls wird als VLSPS bezeichnet. In Abschnitt 3.2 wird der allgemeine Fall des VLSP formal beschrieben, bei dem die Losgröße einer Produktart nicht an die mehr oder weniger gruppierten externen Auftragsmengen gebunden ist. Das Modell zur formalen Beschreibung des allgemeinen Falls wird als VLSPA bezeichnet. In Abschnitt 3.3 wird gezeigt, daß das VLSPS und das VLSPA ineinander überführbar sind. Abschließend sind beide Modelle in einer Übersicht zusammengestellt.

3.1 Modell zur Formulierung des Spezialfalls (VLSPS)

Das Modell zur Formulierung des Spezialfalls (VLSPS) wird zunächst klassifiziert. In einem Exkurs wird kurz auf die Komplexität des Problems eingegangen. Anschließend erfolgt die mathematische Formulierung des Modells.

3.1.1 Klassifikation des VLSPS

Das Problem der Reihenfolgeplanung bei Permutationsfertigung ist ein kombinatorisches Optimierungsproblem, das in der Literatur häufig als Rundreiseproblem abgebildet wird, wobei die Knoten des Rundreiseproblems den Produktarten oder Aufträgen und die Pfeile den Umrüstzeiten oder -kosten, je nach verfolgter Zielsetzung, entsprechen.¹ Bezogen auf das betrachtete Planungsproblem kann das Teilproblem der Reihenfolgeplanung als Rundreiseproblem abgebildet werden, wobei die Knoten den externen Aufträgen und die Pfeile den Loswechselkosten entsprechen. Hierbei erfolgt durch entsprechendes Anlaufen solcher externen Aufträge, hinter denen dieselbe Produktart steht, implizit die Gruppierung der externen Aufträge zu Fertigungslosen. Auf dieser Basis könnte das VLSPS als verallgemeinertes Rundreiseproblem formuliert werden, dessen Verallgemeinerung zum einen darin besteht, daß nicht nur die die Loswechselkosten bestimmenden Pfeile, sondern auch die mit den einzuplanenden Knoten bzw. Aufträgen verbundenen Lagerhaltungskosten Gegenstand der zu minimierenden Zielfunktion sind. Für die Aufnahme der Lagerungskosten in die Zielfunktion ist die Einführung zusätzlicher Entscheidungsvariablen erforderlich, welche jeweils die Fertigstellungszeit-

¹ Die Formulierung des Reihenfolgeproblems als Rundreiseproblem erfolgt üblicherweise mit auf *Manne* (vgl. *Manne* (1960), S. 220) zurückgehenden, die direkten Nachfolgerbeziehungen (Kanten zwischen den Aufträgen) abbildenden binären Entscheidungsvariablen. Zu der Formulierung des Rundreiseproblems vgl. z. B. *Neumann/Morlock* (1993), S. 442-444. Zur Formulierung des Reihenfolgeproblems als Rundreiseproblem vgl. z. B. *Pinedo* (1995), S. 48, *Gupta* (1986), S. 207 f., *Srikar/Ghosh* (1986), S. 1460.

punkte der Fertigungslose bestimmen. Zum anderen müssen aufgrund der bestehenden Kundentermine zusätzliche Kapazitätsrestriktionen berücksichtigt werden.

Ebenso ist es möglich, das VLSPS als verallgemeinertes quadratisches Zuordnungsproblem² zu formulieren, bei dem eine 1:1-Zuordnung der externen Aufträge zu den Positionen eines alle externen Aufträge anordnenden Ablaufvektors vorgenommen wird,³ wobei die Gruppierung von externen Aufträgen zu Fertigungslosen implizit durch entsprechendes Einplanen solcher Aufträge, hinter denen dieselbe Produktart steht, auf hintereinander liegenden Vektorpositionen erfolgt. Die Verallgemeinerung des quadratischen Zuordnungsproblems besteht ebenfalls zum einen darin, daß nicht nur die sich aus den Zuordnungen der Aufträge zu den Positionen ergebenden Kantenbeziehungen zwischen den Aufträgen in Form der Loswechselkosten Gegenstand der Zielfunktion sind (klassisches quadratisches Zuordnungsproblem), sondern auch die aus den Zuordnungen der Aufträge resultierenden Lagerhaltungskosten, wobei auch hier zur Bestimmung der Fertigstellungszeitpunkte die Einführung zusätzlicher Entscheidungsvariablen erforderlich ist. Zum anderen müssen wiederum aufgrund der bestehenden Kundentermine zusätzliche Kapazitätsrestriktionen berücksichtigt werden.

Das VLSPS wird als verallgemeinertes quadratisches Zuordnungsproblem formuliert, da dies zum einen aufgrund der Loswechsel- und Lagerungskosten integrierenden Zielfunktion der natürlichsten Form des Problems entspricht, und zum anderen diese Formulierung gegenüber der Formulierung als verallgemeinertes Rundreiseproblem einen wesentlichen und entscheidenden Vorteil hat: beim Rundreiseproblem werden durch die Entscheidungsvariablen die Kanten bestimmt, wobei durch entsprechende Nebenbedingungen dafür gesorgt wird, daß zu jedem Knoten genau eine Kante hin- und von jedem Knoten auch genau eine Kante wegführen muß. Diese Nebenbedingungen sind zwar notwendig, nicht aber hinreichend, um eine Rundreise durch alle Knoten bzw. Produktlose zu gewährleisten, da hierbei sogenannte Kurzzyklen auftreten können. Zur Vermeidung von Kurzzyklen ist die Formulierung zusätzlicher Restriktionen erforderlich,⁴ die bei einem quadratischen Zuordnungsproblem nicht auftreten.

Exkurs: Komplexität⁵

Bei dem betrachteten Problem handelt es sich um ein Optimierungsproblem, d. h., daß für eine gegebene Problem Instanz eine optimale Lösung, in diesem Fall ein Ablaufplan, zu ermitteln ist. Aufgabe des aus dem Optimierungsproblem ableitbaren Entscheidungsproblems ist es, für die gegebene Problem Instanz zu ermitteln, ob ein Ablaufplan existiert, der die formulierten Nebenbedingungen (Zielwert \leq vorgegebener Zielwert) erfüllt, oder nicht.

Kann die Lösung eines Entscheidungsproblems mit einem deterministischen Algorithmus in polynomieller Zeit gefunden werden, dann gehört das Entscheidungsproblem der Klasse P an. Kann die Lösung mit einem nicht-deterministischen Algorithmus in polynomieller Zeit gefunden werden, gehört das Entscheidungsproblem der Klasse NP an, wobei sich ein nicht-deterministischer Algorithmus von einem deterministischen darin unterscheidet, daß nach der Beendigung eines jeden Rechenschrittes der jeweilige Folgeschritt aus einer Menge alternativer Folgeschritte zufällig ausgewählt wird und somit der genaue Verlauf der Rechenschritte variieren kann.

² Zum quadratischen Zuordnungsproblem vgl. z. B. Domschke/Drexl (2002), S. 114.

³ Zu den verschiedenen im Rahmen der Abbildung von Reihenfolgeproblemen verwendeten Variablentypen vgl. z. B. Daub (1998), S. 69.

⁴ Zu Formulierungen zur Vermeidung von Kurzzyklen vgl. z.B. bei Domschke/Scholl/Voß (1997), S. 105-107.

⁵ Zur Komplexität vgl. auch im folgenden Holthaus (1996), S. 18 f.

Ein Entscheidungsproblem P1 ist auf ein Entscheidungsproblem P2 reduzierbar, wenn ein effizientes Lösungsverfahren für P2 mit einem deterministischen Algorithmus in polynomieller Zeit in ein effizientes Lösungsverfahren für P1 transformiert werden kann.⁶ Gehört ein Entscheidungsproblem der Klasse NP an, und gilt für alle anderen der Klasse NP-vollständig angehörigen Probleme, daß sie auf das betrachtete Problem reduzierbar sind, dann wird das betrachtete Problem als NP-vollständig bezeichnet. Ist ein Entscheidungsproblem NP-vollständig, wird die Ermittlung der Lösung des zugehörigen Optimierungsproblems als NP-schwer bezeichnet, welche bezüglich der Zeitkomplexität mindestens so aufwendig wie die Ermittlung der Lösung des Entscheidungsproblems ist, da die Lösung des Entscheidungsproblems auf die Lösung des Optimierungsproblems zurückgeführt werden kann.⁷

Ende Exkurs.

Da es sich sowohl bei dem Entscheidungsproblem des Rundreise- als auch bei dem des quadratischen Zuordnungsproblems um NP-vollständige Entscheidungsprobleme handelt,⁸ und die Lösung der Probleme durch die beschriebenen Verallgemeinerungen nicht leichter wird, ist das VLSPS ein NP-schweres Optimierungsproblem.

3.1.2 Modellformulierung des VLSPS

Bei dem VLSPS handelt es sich um ein nicht-lineares ganzzahliges Entscheidungsmodell, dessen Nicht-Linearität sich nicht nur in der quadratischen Zielfunktion, sondern auch in nicht-linearen Nebenbedingungen widerspiegelt.⁹ Zunächst werden die im Rahmen des Modells verwendeten Symbole beschrieben, wobei die Variablen nach Entscheidungsvariablen und von den Entscheidungsvariablen abhängigen Variablen differenziert werden. Daraufhin werden die definierten Parameter und Entscheidungsvariablen näher erläutert, die Zielfunktion definiert, die Nebenbedingungen formuliert und abschließend die Definitionsbereiche zusammengefaßt.

Dimensionen

Die Dimensionen Mengeneinheiten [ME] und Zeiteinheiten [ZE] werden als kleinste, nicht weiter teilbare Einheiten definiert.

Indizes

e, e', e'', e Indizes der Positionen auf dem Ablaufvektor E , $e, e', e'', e = 1(1)E$

s, s' Indizes der Aufträge, $s, s' \in S$

⁶ Vgl. auch Derstroff (1995), S. 115.

⁷ Vgl. Holthaus (1996), S. 19.

⁸ Vgl. Garey/Johnson (1979), S. 211 f. und S. 218.

⁹ Klassische nicht-lineare Entscheidungsmodelle beinhalten eine nicht-lineare Verknüpfung der Modellvariablen in der Zielfunktion und lineare Nebenbedingungen. Vgl. hierzu z. B. Stepan/Fischer (1998), S. 191-205. Daß jedoch die simultane Behandlung des Losgrößen- und Reihenfolgeproblems zu nicht-linearen Nebenbedingungen führt, beschreibt auch Daub, vgl. Daub (1994), S. 165. Auch Maes/Van Wassenhove geben an, daß die Erfassung von reihenfolgeabhängigen Umrüstzeiten in ihrem CLSP zu nicht-linearen Kapazitätsbedingungen führen würde, vgl. Maes/Van Wassenhove (1988), S. 991.

Parameter

- E Länge des Ablaufvektors E ; E entspricht der Anzahl der Aufträge, $E = |S|$, [-]
 $i(s)$ Beschreibung der Produktart i als Funktion in Abhängigkeit von dem Auftrag s , $s \in S$, [-]
 k_i Stücklagerkostensatz der Produktart i , $i \in I$, [GE/(ME*ZE)]
 t_s Termin des Auftrags s , $s \in S$, [ZE]
 T Planungshorizont (Ende des Planungszeitraums), T entspricht dem letzten Termin über alle Produktarten, $T = \max\{t_s | s \in S\}$, [ZE]
 x_s^{ext} externe Auftragsmenge des Auftrags s , $s \in S$, [ME]; für die Aufträge der fiktiven Produktart 0 beträgt die Auftragsmenge 0, $x_s^{ext} = 0$, $s \in S_0$

Entscheidungsvariablen

- F_s^{pos} ganzzahlige Entscheidungsvariable, die den Fertigstellungszeitpunkt des Fertigungsloses bestimmt, dem der Auftrag s angehört, $s \in S$, [ZE]
 x_{se} binäre Entscheidungsvariable, die den Wert 1 (Wert 0) annimmt, wenn der Auftrag s der Position e des Ablaufvektors E zugeordnet wird (nicht zugeordnet wird), $s \in S$, $e = 1(1)E$, [-]

Von den Entscheidungsvariablen abhängige Variablen/Vektor

- E Ablaufvektor. $E \in S^E$, wobei $E_e = s$ genau dann, wenn $x_{se} = 1$
 F_e Fertigstellungszeitpunkt des auf e positionierten Auftrags, $e = 1(1)E$, [ZE]
 F_e^{max} Zeitpunkt der Fertigstellung des Fertigungsloses, zu welchem der auf e positionierte Auftrag gehört, $e = 1(1)E$, [ZE]

Mengen

- S Menge aller Auftragsindizes aller Produktarten, $S = \{1, 2, \dots, E\}$
 S_0 Menge der Auftragsindizes der auf die erste und auf die letzte Position des Ablaufvektors zu positionierenden fiktiven Produktart 0, $S_0 = \{1, E\}$
 S_{1-1} Menge der Auftragsindizes aller Produktarten ohne diejenigen Auftragsindizes, hinter denen die fiktive Produktart 0 steht, $S_{1-1} = S \setminus S_0$
 S^E Menge aller Vektoren der Länge E mit Einträgen aus S

Erläuterung der Parameter

Die Menge S umfaßt die Indizes für sämtliche Aufträge aller Produktarten.¹⁰ Die Produktarten sind als Funktion $i(s)$ in Abhängigkeit von $s \in S$ gegeben. Die unabhängig von den einzelnen Aufträgen unmittelbar von den Produktarten abhängigen Parameter, hierzu zählen die Stücklagerkostensätze k_i , die Taktzeiten c_i und die paarweisen bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j anfallenden Loswechselzeiten t_{ij} bzw. Loswechselkosten c_{ij} , werden in dem Modell durch Einsetzen der Funktion $i(s)$ als $k_{i(s)}$, $c_{i(s)}$, $t_{i(s')i(s)}$ und $c_{i(s')i(s)}$, mit $s, s' \in S, s' \neq s$, beschrieben. Die Auftragsmenge x_s^{ext} und der Termin t_s werden in Abhängigkeit der Aufträge s angegeben.

Erläuterung der Entscheidungsvariablen

Die Formulierung der Entscheidungsvariablen erfolgt knoten- und nicht kantenbezogen. Demzufolge wird über die Ausprägung der Entscheidungsvariablen bestimmt, auf welche Position e des Ablaufvektors E welcher externe Auftrag s eingeplant wird. Die binäre Entscheidungsvariable x_{se} nimmt den Wert 1 (den Wert 0) an, wenn der Auftrag s der Position e des Ablaufvektors E zugeordnet wird (nicht zugeordnet wird), $e=1(1)E$, wobei E die Länge des Vektors E beschreibt und der Anzahl aller externen Aufträge entspricht, $E = |S|$. Hieraus ergeben sich sowohl eine nicht-lineare (quadratische) Zielfunktion als auch nicht-lineare Nebenbedingungen. Die Nicht-Linearität besteht darin, daß jeweils das Produkt aus den binären Entscheidungsvariablen der paarweise aufeinanderfolgenden Vektorpositionen die Reihenfolge zweier Aufträge bestimmt. Die Losgrößenentscheidungen werden implizit über die Gruppierung der Aufträge getroffen. Die ganzzahlige Entscheidungsvariable F_s^{pos} bestimmt jeweils den Fertigstellungszeitpunkt des Fertigungsloses, dem der externe Auftrag s angehört, und somit den Zeitpunkt, ab dem der Auftrags s eingelagert wird. Die Zeitpunkte F_s^{pos} ergeben sich jeweils als Produkt aus Fertigstellungszeitpunkt F_e^{max} des auf der letzten Position des betrachteten Fertigungsloses positionierten Auftrages mit der binären Entscheidungsvariablen x_{se} . Hieraus ergeben sich weitere Nicht-Linearitäten sowohl in der Zielfunktion als auch in den Nebenbedingungen.

Zielfunktion

$$Z = \sum_{e=2}^E c_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \sum_{s \in S} (t_s - F_s^{pos}) \cdot x_s^{ext} \cdot k_{i(s)} \quad \rightarrow \text{Min!} \quad (3.1)$$

mit

$$c_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s', s \in S} x_{s'e-1} \cdot x_{se} \cdot c_{i(s')i(s)}, \quad e = 2(1)E$$

¹⁰ Da die Aufträge eindeutig durch die Auftragsindizes gegeben sind, können die Bezeichnungen synonym verwendet werden.

Die in (3.1) definierte Zielsetzung minimiert die entscheidungsrelevanten Kosten, die sich aus den kumulierten Umrüst- und Lagerkosten im Planungszeitraum zusammensetzen. Die Loswechselkosten $c_{i(s')i(s)}$ zwischen zwei Aufträgen s' und s werden dann erfaßt, wenn der Position $e-1$ der Auftrag s' und der Position e der Auftrag s zugeordnet wird. Da auf dem Ablaufvektor E der Position e genau dann der Auftrag s zugeordnet wird, wenn $x_{se}=1$, können die zu erfassenden Loswechselkosten als Kurzschreibweise mit $c_{i(E_{e-1})i(E_e)}$ beschrieben werden, d. h. $c_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s',s \in S} x_{s'e-1} \cdot x_{se} \cdot c_{i(s')i(s)}$, $e = 2(1)E$. Gemäß Annahme 25) wer-

den die Produkteinheiten eines Fertigungsloses jeweils nach Fertigstellung des Loses eingelagert. Demzufolge muß sich die Berechnung der Lagerkosten der Aufträge s , welche zu einem Fertigungslos gruppiert werden, an dem Fertigstellungszeitpunkt des letzten Auftrags in der Reihe der gruppierten Aufträge orientieren. Dieser Zeitpunkt wird als F_s^{pos} bezeichnet. Die Lagerkosten für jeden auf e positionierten Auftrag s berechnen sich als Produkt des Zeitraums, der zwischen dem Zeitpunkt F_s^{pos} und dem Termin t_s des Auftrages s liegt, der zugehörigen Auftragsmenge x_s^{ext} , sowie dem Stücklagerkostensatz $k_{i(s)}$ der Produktart i , welche hinter dem Auftrag s steht.

Restriktionen der Positionszuordnungen.

Die binäre Entscheidungsvariable x_{se} nimmt den Wert 1 (den Wert 0) an, wenn der Position e der Auftrag s zugeordnet wird (nicht zugeordnet wird). Die Nebenbedingungen vom Typ (3.2) stellen sicher, daß jeder Vektorposition e aus der Menge aller Aufträge S genau ein Auftrag zugeordnet wird. In (3.3) wird sichergestellt, daß jeder Auftrag genau einer Vektorposition zugeordnet wird.

$$\sum_{s \in S} x_{se} = 1, \quad e = 1(1)E \quad (3.2)$$

$$\sum_{e=1}^E x_{se} = 1, \quad \forall s \in S \quad (3.3)$$

In (3.4) wird die erste und die letzte Vektorposition, $e=1$ und $e=E$, mit der fiktiven Produktart 0 belegt, wobei $S_0 = \{1, E\}$ die Menge der Aufträge der Produktart 0 beschreibt.

$$x_{11} = 1, \quad x_{EE} = 1 \quad (3.4)$$

Kapazitätsrestriktionen

In (3.5) wird für jeden Auftrag s der Fertigstellungszeitpunkt des Fertigungsloses, dem der Auftrag s angehört, F_s^{pos} , durch Multiplikation des Zeitpunkts F_e^{\max} mit der Entscheidungsvariablen x_{se} bestimmt. Der Zeitpunkt F_e^{\max} entspricht dem Fertigstellungszeitpunkt F_e des letzten Auftrages aus der Reihe von zu einem Fertigungslos zu gruppierenden Aufträgen, dem auch der auf e positionierte Auftrag angehört. Gemäß Annahme 4) muß der Fertig-

stellungszeitpunkt F_e^{\max} spätestens zu dem frühesten der aus diesem Fertigungslos zu befriedigenden Kundentermine erfolgen, d. h. bezugnehmend auf den Auftrag s spätestens bis t_s . Diese Bedingungen werden bei der Ermittlung von F_e^{\max} berücksichtigt. Erfüllen keine nach e eingelasteten Aufträge die Bedingungen, zu demselben Fertigungslos wie der auf e positionierte Auftrag zu gehören und vor t_s fertiggestellt zu sein, entspricht F_e^{\max} dem Fertigungsende des auf e positionierten Auftrags F_e . Für die mit der fiktiven Produktart 0 belegten ersten und letzten Vektorpositionen entspricht F_e^{\max} jeweils F_e . Die Ermittlung von F_e^{\max} ist in (3.6) und (3.7) beschrieben.

$$F_s^{pos} = \sum_{e=1}^E x_{se} \cdot F_e^{\max}, \quad \forall s \in S \quad (3.5)$$

$$F_e^{\max} = F_e, e = \max \left\{ e, \max \left\{ e'' \mid i(E_{e''}) = i(E_e), F_{e''} \leq \sum_{s \in S} x_{se} \cdot t_s, e' = e(1)E - 2, e'' = e' + 1 \right\} \right\}, \quad (3.6)$$

$$e = 2(1)E - 1$$

$$F_e^{\max} = F_e, \quad e \in \{1, E\} \quad (3.7)$$

In (3.8) wird explizit sichergestellt, daß der Fertigstellungszeitpunkt des auf e positionierten Auftrags vor seinem Termin liegt.

$$\sum_{e=1}^E x_{se} \cdot F_e \leq t_s, \quad \forall s \in S \quad (3.8)$$

$$\text{mit } t_1 = 0, t_E = T$$

(Für die Aufträge $s \in S_{1-1}$ ist (3.8) durch (3.5) und (3.6) implizit sichergestellt, da die Einhaltung des Termins t_s eine Bedingung bei der Bestimmung von F_e^{\max} ist, und gemäß (3.6) immer gilt, daß $F_e \leq F_e^{\max}$.)

Da die externen Auftragsmengen x_s^{ext} derjenigen Aufträge, hinter denen die fiktive Produktart 0 steht, 0 betragen, $x_s^{ext} = 0$, $s \in S_0$, und gemäß (3.4) die erste Vektorposition mit der Produktart 0 belegt wird, kann das Fertigungsende des auf $e=1$ positionierten Auftrags mit 0 initialisiert werden.

$$F_1 = 0 \quad (3.9)$$

Die Nebenbedingungen vom Typ (3.10) sorgen dafür, daß das Fertigungsende des auf e positionierten Auftrags nicht früher als das Fertigungsende des auf $e-1$ positionierten Auftrages liegt, zuzüglich

- der benötigten Loswechselzeit $t_{i(s')i(s)}$ von der Produktart des auf $e-1$ positionierten Auftrags s' , auf diejenige Produktart, die hinter dem auf e positionierten Auftrag s steht, und
- der Bearbeitungszeit des auf e positionierten Auftrags s . Die Bearbeitungszeit berechnet sich als Produkt der Auftragsmenge $x_s^{ext} - 1$ (abzüglich 1 aufgrund der Berücksichtigung der jeweils ersten Einheit in der Loswechselzeit) und der Taktzeit $c_{i(s)}$ derjenigen Produktart, welche hinter dem auf e positionierten Auftrag s steht.

$$F_e \geq F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{ext} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)}, \quad e = 2(1)E \quad (3.10)$$

Analog zur Beschreibung der Zielfunktion entsprechen

$$t_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s', s \in S} x_{s'e-1} \cdot x_{se} \cdot t_{i(s')i(s)}, \quad e = 2(1)E \text{ und}$$

$$\left(x_{E_e}^{ext} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)} = \sum_{s \in S} x_{se} \cdot \left(x_s^{ext} - 1 \right) \cdot c_{i(s)}, \quad e = 2(1)E$$

(Für die in Abschnitt 2.3.1.3.2 b beschriebene Produktionssituation des kontinuierlichen Transports ohne Bandleerlauf müssen die Restriktionen vom Typ (3.10) modifiziert werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im Rahmen des Modells darauf verzichtet. Eine entsprechende Formulierung der Restriktionen findet sich im Anhang, S. 199f. v. A.)

Definitionsbereiche

$$c_{i(s)}, k_{i(s)}, t_s, x_s^{ext}, F_s^{pos} \geq 0, \quad s \in S$$

$$c_{i(s')i(s)}, t_{i(s')i(s)} \geq 0, \quad s, s' \in S$$

$$x_{se} \in \{0,1\}, \quad s \in S, e = 1(1)E$$

$$F_e, F_e^{\max} \geq 0, \quad e = 1(1)E$$

$$E \in S^E, \text{ wobei } E_e = s \text{ genau dann, wenn } x_{se} = 1.$$

3.2 Modell zur Beschreibung des allgemeinen Falls (VLSPA)

Das Modell zur Beschreibung des allgemeinen Falls des VLSP (VLSPA) wird ebenfalls zunächst klassifiziert und anschließend mathematisch abgebildet.

3.2.1 Klassifikation des VLSPA

Das VLSPA ist ebenso wie das VLSPS ein kombinatorisches Optimierungsproblem, bei dem jedoch die Losgröße nicht an die mehr oder weniger gruppierten externen Auftragsmengen einer Produktart gebunden ist, sondern die in einem externen Auftrag nachgefragte Menge auf mehrere Vektorpositionen verteilt eingeplant werden kann. Ein solcher Teil eines externen

Auftrags wird als *Teilauftrag* bezeichnet. Beim VLSPA sind sowohl die Anzahl der Teilaufträge, als auch die in einem Teilauftrag einzuplanenden Mengeneinheiten zu bestimmen. Da die Anzahl der Teilaufträge offen ist, ist auch die Vektorlänge E zunächst unbekannt.¹¹ Die unbekannte Anzahl der Zuordnungen und die daraus resultierende variable Vektorlänge führen zu variablen Summengrenzen in den Nebenbedingungen und in der Zielfunktion. Auf der Grundlage dieser Variablendefinition kann das Modell VLSPA somit für eine konkret vorliegende Probleminstanz nicht vollständig formuliert werden.

Die vollständige Formulierung des VLSPA ist jedoch möglich, indem für jede einzelne Produkteinheit jedes externen Auftrags E Entscheidungsvariablen definiert werden, welche die Zuordnung einer jeden Produkteinheit zu dem Vektor E bestimmen. Die Anzahl der Zuordnungen eines Auftrags zu dem Vektor E ist dann nicht unbekannt, sondern entspricht der Anzahl der insgesamt herzustellenden Mengeneinheiten dieses Auftrags (der Auftragsmenge), und die einzuplanende Menge je Teilauftrag umfaßt jeweils genau eine Produkteinheit. Die Länge des Vektors entspricht dann der Summe über alle Auftragsmengen (zuzüglich der mit der fiktiven Produktart 0 zu belegenden Vektorpositionen).

In dem folgenden Abschnitt 3.2.2 wird das VLSPA auf Basis der in dem ersten Absatz beschriebenen variablen Vektorlänge als deskriptives Modell beschrieben. Die für die vollständige Formulierung des VLSPA erforderliche Definition der Modellparameter und -variablen wird im Rahmen des Abschnitts 3.3.1 b) gezeigt.

3.2.2 Modellbeschreibung des VLSPA

Bei dem VLSPA handelt es sich ebenfalls um ein nicht-lineares ganzzahliges Modell, dessen Nicht-Linearität sowohl in der quadratischen Zielfunktion, als auch in nicht-linearen Nebenbedingungen besteht. Zunächst werden wiederum die verwendeten Symbole beschrieben. Die Definition der im VLSPA verwendeten Symbole unterscheidet sich zu denen im VLSPS aufgrund der Möglichkeit, einen externen Auftrag in mehreren Fertigungsaufträgen aufzuteilen, hinsichtlich der Indizes, der Variablen und des zu erzeugenden Ablaufvektors. Anschließend werden die Entscheidungsvariablen näher erläutert, die Zielfunktion definiert, sowie die Nebenbedingungen beschrieben und die Definitionsbereiche zusammengefaßt. Die Parameter des VLSPA unterscheiden sich nicht von denen des VLSPS.

Indizes

a, a' Indizes der Teilaufträge, $a, a' = 1(1)A_s, s \in S$

Entscheidungsvariablen

A_s ganzzahlige Entscheidungsvariable, welche die Anzahl der Teilaufträge bestimmt, in die der Auftrag s zerlegt wird. Die Aufträge der fiktiven Produktart 0 können nicht aufgeteilt werden, $A_1 = A_E = 1, [-]$

¹¹ Vgl. auch *Lashine/Foote/Ravidran*, deren für die statische Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ungewöhnliche simultane Formulierung eine vergleichbar nicht-lineare Struktur aufweist, da die Anzahl der Nebenbedingungen bezüglich der kapazitierten Losgrößenentscheidungen von der Häufigkeit abhängt, mit welcher der Zyklus der Produktarten durchlaufen wird, diese Häufigkeit aber selbst Variable des Entscheidungsproblems ist. *Lashine/Foote/Ravidran* (1991), S. 62-66

- $F_s^{a,pos}$ ganzzahlige Entscheidungsvariable, die den Fertigstellungszeitpunkt des Fertigungsloses bestimmt, dem der Teilauftrag a des Auftrags s angehört, $a = 1(1)A_s, s \in S$, [ZE]
- x_{se}^a binäre Entscheidungsvariable, die den Wert 1 (Wert 0) annimmt, wenn der Teilauftrag a des Auftrags s der Position e des Ablaufvektors E zugeordnet wird (nicht zugeordnet wird), $a = 1(1)A_s, s \in S, e = 1(1)E$, [-]
- x_s^a ganzzahlige Entscheidungsvariable für die Anzahl der Mengeneinheiten des Teilauftrags a des Auftrags s , $a = 1(1)A_s, s \in S$, [ME]

Von den Entscheidungsvariablen abhängige Variablen/Vektor

- E Ablaufvektor. $E \in (S \times \mathbb{N})^E$, wobei $E_e = (s, a)$ genau dann, wenn $x_{se}^a = 1$
- E Länge des Ablaufvektors E ; E entspricht der Anzahl aller Teilaufträge, die erst durch das Modell zu bestimmen ist, $E = \sum_{s \in S} A_s$, [-]

Erläuterung der Entscheidungsvariablen

Ebenso wie beim VLSPS erfolgt die Definition der Variablen knoten- und nicht kantenbezogen. Zur Beschreibung des VLSPA wird die binäre Entscheidungsvariable x_{se}^a definiert, welche den Wert 1 (den Wert 0) annimmt, wenn der Teilauftrag a des Auftrags s der Position e zugeordnet wird (nicht zugeordnet wird). Die als A_s bezeichnete ganzzahlige Entscheidungsvariable bestimmt die Anzahl, mit welcher der Auftrag s dem Vektor E zugeordnet wird. Die Anzahl A_s der Belegung des Vektors E mit dem Auftrag s kann größer oder gleich eins sein. Des weiteren wird eine ganzzahlige Entscheidungsvariable x_s^a definiert, welche die in dem Teilauftrag einzuplanenden Mengeneinheiten festlegt. Die ganzzahligen Entscheidungsvariablen $F_s^{a,pos}$ müssen beim VLSPA nicht auftragsbezogen, wie beim VLSPS, sondern teilauftragsbezogen definiert werden.

Zielfunktion

$$Z = \sum_{e=2}^E c_{i(E_{e-1})j(E_e)} + \sum_{s \in S} \sum_{a=1}^{A_s} (t_s - F_s^{a,pos}) \cdot x_s^a \cdot k_{i(s)} \quad \rightarrow Min! \tag{3.11}$$

mit

$$c_{i(E_{e-1})j(E_e)} = \sum_{s', s \in S} \sum_{a'=1}^{A_{s'}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{s'e-1}^{a'} \cdot x_{se}^a \cdot c_{i(s')j(s)}, \quad e = 2(1)E$$

Analog zu dem VLSPS minimiert die Zielsetzung des VLSPA die entscheidungsrelevanten Kosten, die sich aus den kumulierten Umrüst- und Lagerkosten zusammensetzen. Von der Zielfunktion des VLSPS (3.1) unterscheidet sich (3.11) darin, daß die Anzahl A_s , mit welcher der Auftrag s dem Vektor E zugeordnet wird, d h. die Anzahl der Teilaufträge a des Auftrags s , und somit auch E nicht bekannt sind. Aufgrund der teilauftragsbezogenen

Definition der binären Entscheidungsvariablen x_{se}^a wird nicht nur über die Aufträge, sondern auch über die Teilaufträge a bzw. a' summiert. Da auf dem Ablaufvektor E der Position e genau dann der Teilauftrag a des externen Auftrags s zugeordnet wird, wenn $x_{se}^a = 1$, können die zu erfassenden Loswechselkosten als Kurzschreibweise mit $c_{i(E_{e-1})i(E_e)}$ beschrieben

werden, wobei $c_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s', s \in S} \sum_{a'=1}^{A_{s'}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{s'e-1}^{a'} \cdot x_{se}^a \cdot c_{i(s')i(s)}$, $e = 2(1)E$. Anstelle der

gegebenen Auftragsmenge x_s^{ext} wird die in dem Teilauftrag a des Auftrags s einzuplanende Menge x_s^a als Entscheidungsvariable in die Zielfunktion aufgenommen.

Restriktionen der Positionszuordnungen

Jeder Vektorposition kann genau ein Teilauftrag a eines Auftrags s zugeordnet werden (3.12), und jeder Teilauftrag wird dem Vektor genau einmal zugeordnet (3.13). Die Belegung der ersten und der letzten Vektorposition mit der fiktiven Produktart 0 erfolgt in (3.14).

$$\sum_{s \in S} \sum_{a=1}^{A_s} x_{se}^a = 1, \quad e = 1(1)E \quad (3.12)$$

$$\sum_{e=1}^E x_{se}^a = 1, \quad a = 1(1)A_s, \quad \forall s \in S \quad (3.13)$$

Die erste und die letzte Vektorposition, $e=1$ und $e=E$, werden wieder mit der Produktart 0 belegt, wobei die Aufträge, hinter denen die fiktive Produktart 0 steht, nicht aufgeteilt werden können, d. h. $A_s = 1$, $s \in S_0$, mit $S_0 = \{1, E\}$.

$$x_{11}^1 = 1, \quad x_{EE}^1 = 1 \quad (3.14)$$

Restriktionen zur Vermeidung von Fehlmengen

Die Nebenbedingungen vom Typ (3.15) stellen sicher, daß die Summe der Teilauftragsmengen x_s^a dem Umfang der Auftragsmenge x_s^{ext} entspricht.

$$\sum_{a=1}^{A_s} x_s^a = x_s^{ext}, \quad \forall s \in S_{I-1} \quad (3.15)$$

Kapazitätsrestriktionen

In (3.16) wird der Fertigstellungszeitpunkt des Fertigungsloses, dem der Teilauftrag a des Auftrags s angehört, $F_s^{a,pos}$, durch Multiplikation des Zeitpunkts F_e^{\max} mit der Entscheidungsvariablen x_{se}^a bestimmt. Der Zeitpunkt F_e^{\max} entspricht beim VLSPA dem Fertigstellungszeitpunkt F_e des letzten Teilauftrages aus der Reihe von zu einem Fertigungslos zu gruppierenden Teilaufträgen, dem auch der auf e positionierte Teilauftrag angehört. Die Ermittlung von $F_s^{a,pos}$ und von F_e^{\max} erfolgt in (3.17) und (3.18) analog zum VLSPS, jeweils unter Berücksichtigung der Teilaufträge gemäß:

$$F_s^{a,pos} = \sum_{e=1}^E x_{se}^a \cdot F_e^{\max}, \quad a = 1(1)A_s, \quad \forall s \in S \quad (3.16)$$

$$F_e^{\max} = F_e, \quad e = \max \left\{ e, \max \left\{ e' \mid i(E_{e'}) = i(E_e), F_{e'} \leq \sum_{s \in S_{I-1}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{se}^a \cdot t_s, \quad e' = e(1)E-2, \quad e'' = e'+1 \right\} \right\}, \quad (3.17)$$

$$e = 2(1)E-1$$

$$F_e^{\max} = F_e, \quad e \in \{1, E\} \quad (3.18)$$

Analog zum VLSPS wird in (3.19) explizit sichergestellt, daß der Fertigstellungszeitpunkt des auf e positionierten Teilauftrags vor dem Termin des zugehörigen Auftrags liegt.

$$\sum_{e=1}^E x_{se}^a \cdot F_e \leq t_s, \quad a = 1(1)A_s, \quad \forall s \in S \quad (3.19)$$

mit $t_1 = 0$, $t_E = T$

(Für die Teilaufträge $a = 1(1)A_s$, $s \in S_{I-1}$ ist (3.19) analog zum VLSPS durch (3.16) und

$$(3.17) \text{ wegen } F_e^{\max} \leq \sum_{s \in S_{I-1}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{se}^a \cdot t_s \text{ und } F_e \leq F_e^{\max} \text{ implizit sichergestellt.)}$$

Die Berücksichtigung der zeitlichen Kapazitätsrestriktionen für jeden auf e positionierten Teilauftrag erfolgt analog zu den in dem VLSPS an die Fertigstellungszeitpunkte der Aufträge gestellten Bedingungen. In (3.20) wird analog zu (3.9) der Fertigstellungszeitpunkt des auf der ersten Vektorposition eingelasteten Auftrags initialisiert. Außer in der teilauftragsbezogenen Definition der binären Entscheidungsvariablen unterscheiden sich die Restriktionen vom Typ (3.21) von den Restriktionen (3.10) analog zur Zielfunktion darin, daß in (3.21) anstelle der gegebenen Auftragsmenge x_s^{ext} die in dem Teilauftrag a herzustellende Menge x_s^a als Entscheidungsvariable in das Modell eingeht.

$$F_1 = 0 \quad (3.20)$$

$$F_e \geq F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{E_e} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)}, \quad e = 2(1)E \quad (3.21)$$

mit

$$t_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s', s \in S} \sum_{a'=1}^{A_{s'}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{s's'e-1}^{a'} \cdot x_{se}^a \cdot t_{i(s')i(s)}, \quad e = 2(1)E \text{ und}$$

$$\left(x_{E_e}^{E_e} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)} = \sum_{s \in S} \sum_{a=1}^{A_s} x_{se}^a \cdot \left(x_s^a - 1 \right) \cdot c_{i(s)}, \quad e = 2(1)E$$

(Analog zum VLSPS müssen für die in Abschnitt 2.3.1.3.2 b beschriebene Produktionssituation des kontinuierlichen Transports ohne Bandleerlauf die Restriktionen vom Typ (3.21) modifiziert werden, siehe hierzu S. 199f. v. A.)

Definitionsbereiche

$$c_{i(s)}, k_{i(s)}, t_s, x_s^{ext} \geq 0, \quad s \in S$$

$$A_s \in \mathbb{N}, \quad s \in S$$

$$c_{i(s')i(s)}, t_{i(s')i(s)} \geq 0, \quad s, s' \in S$$

$$F_s^{a, pos} \geq 0, \quad a = 1(1)A_s, s \in S$$

$$x_s^a \in \mathbb{N}_0, \quad a = 1(1)A_s, s \in S$$

$$x_{se}^a \in \{0,1\}, \quad a = 1(1)A_s, s \in S, e = 1(1)E$$

$$F_e, F_e^{\max} \geq 0, \quad e = 1(1)E$$

$$E \in (S \times \mathbb{N})^E, \text{ wobei } E_e = (s, a) \text{ genau dann, wenn } x_{se}^a = 1.$$

3.3 Gegenüberstellung von VLSPS und VLSPA

In Abschnitt 3.3.1 wird gezeigt, daß das VLSPS und das VLSPA gegenseitig ineinander überführbar sind. Das Kapitel 3 abschließend sind in Abschnitt 3.3.2 beide Modelle auf einen Blick dargestellt.

3.3.1 Gegenseitige Überführbarkeit

a) Überführung des VLSPS in das VLSPA

Das in Abschnitt 3.2.1 formulierte VLSPS kann in das VLSPA überführt werden, indem beim VLSPA die ganzzahlige Entscheidungsvariable A_s , welche die Anzahl der Teilaufträge a des externen Kundenauftrags s bestimmt, immer den Wert 1 annimmt. Somit wird jeder externe Auftrag dem Ablaufvektor E genau einmal zugeordnet, wobei die Menge des einen „Teilauftrages“ x_s^a der externen Auftragsmenge entspricht, d.h. $A_s = 1$, $x_s^a = x_s^{ext}$, $s \in S$. Die Länge des Ablaufvektors E entspricht dann der Mächtigkeit der Menge aller Aufträge, $E = |S|$.

b) Überführung des VLSPA in das VLSPS

Das in Abschnitt 3.2.2 formulierte VLSPA kann in das in Abschnitt 3.1.2 formulierte VLSPS überführt werden, wenn jede externe Auftragsmenge – außer der Produktart 0 – genau eine Produkteinheit umfaßt, $x_s^{ext} = 1$, $s \in S_{I-1}$. Aufgrund der Ganzzahligkeitsbedingungen der Entscheidungsvariablen sind die externen Auftragsmengen nicht in kleinere Einheiten teilbar. Die Teilauftragsmengen x_s^a umfassen somit jeweils eine Produkteinheit, und die Anzahl A_s der Teilaufträge entspricht jeweils der externen Auftragsmenge, $x_s^a = 1$, $A_s = x_s^{ext}$, $s \in S_{I-1}$. Die Vektorlänge E ist in diesem Fall nicht variabel, sondern entspricht der Anzahl sämtlicher Produkteinheiten aller Aufträge $s \in S_{I-1}$ zuzüglich der mit der Produktart 0 belegten ersten und letzten Position, $E = \sum_{s \in S_{I-1}} x_s^{ext} + 2$. Die Summenobergrenzen in der Zielfunktion und in den Nebenbedingungen sind somit determiniert, so daß das VLSPA für $x_s^{ext} = 1$, $s \in S_{I-1}$, vollständig beschrieben werden kann.

3.3.2 VLSPS und VLSPA auf einen Blick

VLSPS

$$Z = \sum_{e=2}^E c_{i(E_{e-1})} i(E_e) + \sum_{s \in S} (t_s - F_s^{pos}) \cdot x_s^{ext} \cdot k_{i(s)} \quad \rightarrow \text{Min!} \quad (3.1)$$

$$\text{mit } c_{i(E_{e-1})} i(E_e) = \sum_{s', s \in S} x_{s'e-1} \cdot x_{se} \cdot c_{i(s')} i(s), \quad e = 2(1)E$$

$$\sum_{s \in S} x_{se} = 1, \quad e = 1(1)E \quad (3.2)$$

$$\sum_{e=1}^E x_{se} = 1, \quad \forall s \in S \quad (3.3)$$

$$x_{11} = 1, \quad x_{EE} = 1 \quad (3.4)$$

$$F_s^{pos} = \sum_{e=1}^E x_{se} \cdot F_e^{\max}, \quad \forall s \in S \quad (3.5)$$

$$F_e^{\max} = F_e, \quad e = \max \left\{ e, \max \left\{ e' \mid i(E_{e'}) = i(E_e), F_{e'} \leq \sum_{s \in S} x_{se} \cdot t_s, e' = e(1)E - 2, e' = e' + 1 \right\} \right\}, \quad (3.6)$$

$$e = 2(1)E - 1$$

$$F_e^{\max} = F_e, \quad e \in \{1, E\} \quad (3.7)$$

$$\sum_{e=1}^E x_{se} \cdot F_e \leq t_s, \quad \forall s \in S \quad (3.8)$$

mit $t_1 = 0, t_E = T$

$$F_1 = 0 \quad (3.9)$$

$$F_e \geq F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{ext} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)}, \quad e = 2(1)E \quad (3.10)$$

mit

$$t_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s', s \in S} x_{s'e-1} \cdot x_{se} \cdot t_{i(s')i(s)}, \quad e = 2(1)E \text{ und}$$

$$\left(x_{E_e}^{ext} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)} = \sum_{s \in S} x_{se} \cdot \left(x_s^{ext} - 1 \right) \cdot c_{i(s)}, \quad e = 2(1)E$$

Definitionsbereiche

$$c_{i(s)}, k_{i(s)}, t_s, x_s^{ext}, F_s^{pos} \geq 0, \quad s \in S$$

$$c_{i(s')i(s)}, t_{i(s')i(s)} \geq 0, \quad s, s' \in S$$

$$x_{se} \in \{0, 1\}, \quad s \in S, e = 1(1)E$$

$$F_e, F_e^{\max} \geq 0, \quad e = 1(1)E$$

$E \in S^E$, wobei $E_e = s$ genau dann, wenn $x_{se} = 1$

VLSPA

$$Z = \sum_{e=2}^E c_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \sum_{s \in S} \sum_{a=1}^{A_s} \left(t_s - F_s^{a,pos} \right) \cdot x_s^a \cdot k_{i(s)} \quad \rightarrow \text{Min!} \quad (3.11)$$

$$\text{mit } c_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s', s \in S} \sum_{a'=1}^{A_{s'}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{s'e-1}^{a'} \cdot x_{se}^a \cdot c_{i(s')i(s)}, \quad e = 2(1)E$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{a=1}^{A_s} x_{se}^a = 1, \quad e = 1(1)E \quad (3.12)$$

$$\sum_{e=1}^E x_{se}^a = 1, \quad a = 1(1)A_s, \quad \forall s \in S \quad (3.13)$$

$$x_{11}^1 = 1, \quad x_{EE}^1 = 1 \quad (3.14)$$

$$\sum_{a=1}^{A_s} x_s^a = x_s^{ext}, \quad \forall s \in S_{I-1} \quad (3.15)$$

$$F_s^{a,pos} = \sum_{e=1}^E x_{se}^a \cdot F_e^{\max}, \quad a = 1(1)A_s, \quad \forall s \in S \quad (3.16)$$

$$F_e^{\max} = F_e, \quad e = \max \left\{ e, \max \left\{ e' \mid i(E_{e'}) = i(E_e), F_{e'} \leq \sum_{s \in S_{I-1}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{se}^a \cdot t_s, e' = e(1)E-2, e'' = e'+1 \right\} \right\}, \quad (3.17)$$

$$e = 2(1)E-1$$

$$F_e^{\max} = F_e, \quad e \in \{1, E\} \quad (3.18)$$

$$\sum_{e=1}^E x_{se}^a \cdot F_e \leq t_s, \quad a = 1(1)A_s, \quad \forall s \in S \quad (3.19)$$

mit $t_1 = 0, t_E = T$

$$F_1 = 0 \quad (3.20)$$

$$F_e \geq F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{E_e} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)}, \quad e = 2(1)E \quad (3.21)$$

mit

$$t_{i(E_{e-1})i(E_e)} = \sum_{s', s \in S} \sum_{a'=1}^{A_{s'}} \sum_{a=1}^{A_s} x_{s'e-1}^{a'} \cdot x_{se}^a \cdot t_{i(s')i(s)}, \quad e = 2(1)E \text{ und}$$

$$\left(x_{E_e}^{E_e} - 1 \right) \cdot c_{i(E_e)} = \sum_{s \in S} \sum_{a=1}^{A_s} x_{se}^a \cdot \left(x_s^a - 1 \right) \cdot c_{i(s)}, \quad e = 2(1)E$$

Definitionsbereiche

$$c_{i(s)}, k_{i(s)}, t_s, x_s^{ext} \geq 0, \quad s \in S$$

$$A_s \in \mathbf{N}, \quad s \in S$$

$$c_{i(s')i(s)}, t_{i(s')i(s)} \geq 0, \quad s, s' \in S$$

$$F_s^{a,pos} \geq 0, \quad a = 1(1)A_s, s \in S$$

$$x_s^a \in \mathbf{N}_0, \quad a = 1(1)A_s, s \in S$$

$$x_{se}^a \in \{0,1\}, \quad a = 1(1)A_s, s \in S, e = 1(1)E$$

$$F_e, F_e^{\max} \geq 0, \quad e = 1(1)E$$

$E \in (S \times \mathbf{N})^E$, wobei $E_e = (s, a)$ genau dann, wenn $x_{se}^a = 1$.

Kapitel 4

Entwicklung eines Genetischen Algorithmus zur Lösung des VLSP

Aufgrund der hohen Komplexität werden heuristische, speziell für die konkretisierte Problemstruktur entwickelte Verfahren zur Lösung des VLSP eingesetzt. Die in vorliegender Arbeit eingesetzten Verfahren stellen Varianten eines genetischen Algorithmus (GA) dar. Der genetische Algorithmus setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen: zum einen aus der Erzeugung der Ausgangspopulation anhand eines Prioritätsregeln, Dekomposition und Zufallselemente kombinierenden Konstruktionsverfahrens (*PDZ*), und zum anderen aus dem Algorithmus der genetischen Operatoren (*AGO*).

Im folgenden wird zunächst allgemein das Grundkonzept genetischer Algorithmen, die Kodierung und die Funktionsweise der genetischen Operatoren beschrieben. Anschließend erfolgt die Darstellung des problemspezifischen Algorithmus zur Lösung des VLSP.

4.1 Beschreibung des Grundkonzepts genetischer Algorithmen

Genetische Algorithmen sind eine auf *Holland*¹ zurückgehende Form evolutionärer Algorithmen.² Die evolutionären Algorithmen umfassen neben den Genetischen Algorithmen drei weitere Grundströme: Genetische Programmierung (GP), Evolutionsstrategien (ES) und Evolutionäre Programmierung (EP).³ Sämtliche evolutionäre Algorithmen stimmen in ihrer Grundphilosophie überein, die Mechanismen der Evolution für Probleme im Bereich der praktischen Optimierung zu nutzen,⁴ wobei die genetischen Algorithmen dem Konzept der natürlichen Evolution am nächsten kommen.⁵ Das Grundkonzept besteht darin, verschiedene Lösungen miteinander zu kombinieren bzw. zu kreuzen.⁶ Anders als reine lokale Suchverfahren gehen

¹ Vgl. Holland (1975).

² Eine historische Abhandlung über die Entwicklung erster evolutionärer Verfahren und deren Vorläufer, bis hin zu modernen aktuellen Verfahren, findet sich bei Nissen (1997), S. 8-12.

³ Diese Begriffsverwendung ist in Anlehnung an *Nissen* vorgenommen. *Kinnebrock* z. B. bezeichnet die auf *Rechenberg* (vgl. Rechenberg (1973)) zurückgehenden Evolutionsstrategien als Mutations-Selektions-Strategien, welche sich dann später weiterentwickelt hätten, vgl. Kinnebrock (1994), S. 19 ff, hierzu zählen im weitesten Sinne auch Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS) etc. Evolutionäre Programmierung ist bei ihm keine eigenständige Richtung. Bei *Bäck* und *Bäck/Schwefel* ist dafür die genetische Programmierung keine eigenständige Richtung, vgl. Bäck (1996), Bäck/Schwefel (1996), wobei auch *Nissen* die GP als "moderne Unterform von GA" bezeichnet, welche "im Kern eine Form von GA mit spezifischer Lösungsrepräsentation ist", vgl. Nissen (1997), S. 12 i. V. m. 237. Aufgrund der sehr übersichtlichen und die Unterschiede klar abgrenzenden Darstellungen *Nissens* wird zur Vermeidung von Verwirrungen in der Begriffsverwendung auf *Nissen* bezug genommen.

⁴ Vgl. Nissen (1997), S. 11 i. V. m. S. 1. Eine genaue Beschreibung der Mechanismen, derer sich die evolutionären Algorithmen bedienen, findet sich z. B. bei Nissen (1997), S. 13 f.

⁵ Vgl. Langdon (1998), S. 13.

⁶ Vgl. auch Glover/Kelly/Laguna (1995), S. 111, 132. Ebenfalls von einer Lösungsmenge ausgehend verfährt Scatter Search, ein Lösungsverfahren, das gefundene gute Lösungen zu Referenzpunkten bestimmt, aus denen mit Hilfe von Linearkombinationen neue Lösungen generiert werden. Vgl. hierzu Glover/Kelly/Laguna (1995), S. 121 ff.

evolutionäre Verfahren also nicht von einer, sondern von vielen Lösungen aus.⁷ Sie arbeiten mit Populationen, welche aus jeweils eine Lösung des betrachteten Problems repräsentierenden Individuen bestehen. Aus der jeweils aktuellen Population werden Individuen nach dem “survival of the fittest“-Prinzip ausgewählt, um die – nach Möglichkeit bessere – Folgegeneration zu erzeugen.⁸ Entsprechend wird die Zielfunktionswertgüte einer Lösung mit „Fitness“ bezeichnet.⁹ Durch das Zusammenwirken von Selektionsoperatoren (exploitation = Ausnutzen der in guten Lösungen enthaltenen Information über den Suchraum) und heuristischen und stochastischen Rekombinations- und Mutationsoperatoren (exploration = Abtesten neuer Bereiche des Suchraums),¹⁰ erweisen sich evolutionäre Verfahren als sehr geeignet, komplexe Optimierungsprobleme zu lösen,¹¹ da die Selektionsoperatoren das Durchsuchen “nutzlosen Raums” und die Rekombinationsoperatoren das Beschränken auf lokale Minima verhindern.

Bestehen die jeweiligen Vererbungsvorgänge des Algorithmus allein in Mutationen der einzelnen Individuen, wie bei ES und EP, entspricht das evolutionäre Verfahren einem klassischen lokalen Suchverfahren, welches an mehreren Punkten im Lösungsraum startet, d. h. einem parallelen lokalen Suchverfahren.¹² Bei klassischen lokalen Suchverfahren entstehen ausgehend von einer Lösung durch Modifikation dieser Lösung, z. B. durch das Vertauschen von zwei Produktpositionen (“swap neighbourhood“¹³), Nachbarn zu der betrachteten Ausgangslösung. Eine Lösung in der erzeugten Nachbarschaft dient als neue Ausgangslösung, wenn sie bestimmte Kriterien erfüllt.¹⁴ Im Falle einer lokalen Suche stehen die Nachbarn einer betrachteten Ausgangslösung in einem „Nachbarschaftsverhältnis zweiten Grades“ zueinander, da jeder Nachbar jeden anderen über die Ausgangslösung erreichen kann.

Im Falle genetischer Algorithmen hingegen wird von einer verallgemeinerten Form¹⁵ oder auch von einer Variante der lokalen Suche¹⁶ gesprochen, da die Struktur der Nachbarschaftsmenge aufgrund der Kombination mehrerer Lösungen anders als bei lokalen Suchverfahren definiert werden muß.¹⁷ Werden neue Kindindividuen durch Kreuzung verschiedener Eltern-

⁷ Vgl. auch Kolen/Pesch (1994), S. 273.

⁸ Vgl. z. B. Glass/Potts (1996), S. 490.

⁹ Zu der Gleichsetzung der Fitness mit Zielfunktionswertgüte vgl. auch Potvin (1996), S. 348, Downsland (1996), S. 550.

¹⁰ Vgl. Nissen (1997), S. 21.

¹¹ Vgl. Bäck (1996), S. 34 f., 137.

¹² Vgl. Yamamura/Ono/Kobayashi (1996), S. 535.

¹³ Vgl. Glass/Potts (1996), S. 494.

¹⁴ Diese Kriterien variieren von Verfahren zu Verfahren: Beim Descent-Verfahren wird ein Wechsel von der Ausgangslösung zu einer in der Nachbarschaft zu der Ausgangslösung liegenden Lösung dann vorgenommen, wenn letztere einen besseren Zielfunktionswert als erstere aufweist (wenn der Algorithmus mit verschiedenen zufällig generierten Ausgangslösungen startet, dann spricht man von Multi-Start Descent). Threshold Accepting läßt Nachbarschaftslösungen als neue Ausgangslösungen zu, wenn die Verschlechterung des Zielfunktionswertes der neuen Lösung gegenüber der Ausgangslösung innerhalb einer bestimmten Spanne – dem threshold value – liegt, wobei der threshold value im Laufe des Verfahrens abnimmt. Beim Simulated Annealing werden Verbesserungen von Zielfunktionswerten in der Nachbarschaft zu der jeweils gerade aktuellen Ausgangslösung immer und Verschlechterungen mit im Verlauf des Verfahrens abnehmender Wahrscheinlichkeit (sinkende Temperatur im Kühlplan) akzeptiert, wobei die Wahrscheinlichkeit der Akzeptanz von Zielfunktionswertverschlechterungen mit zunehmender Verschlechterung sinkt. Tabu Search akzeptiert grundsätzlich diejenige in der Nachbarschaft zu der gerade betrachteten Ausgangslösung liegende Lösung, welche von den nicht auf der sogenannten Tabuliste stehenden Lösungen den besten Zielfunktionswert aufweist. Tabu sind z. B. bei Anwendung des bereits beschriebenen swap-neighbourhood solche Lösungen, bei denen in bereits vorgehenden Verfahrensschritten angeordnete Positionen wieder vertauscht werden. Unter Abtesten aller möglichen sofort zu akzeptierenden Veränderungen kann dies selbst dann gelten, wenn der neue Zielfunktionswert besser als derjenige der Ausgangslösung ist. Um zu vermeiden, daß gute Lösungen verloren gehen, wird eine Lösung auch dann akzeptiert, wenn sie nach der Liste tabu, aber ihr Zielfunktionswert besser als diejenigen aller zuvor gefundenen Lösungen ist. Zu diesen Ausführungen vgl. Glass/Potts (1996), S. 492-497.

¹⁵ Vgl. auch Pirlot (1996), S. 501.

¹⁶ Vgl. Johnson/McGeoch (1997), S. 287.

¹⁷ Vgl. Yamamura/Ono/Kobayashi (1996), S. 535.

teile und ggf. anschließende Mutation erzeugt, so bilden ausgehend von einem Elternindividuum alle Kinder der Folgegeneration, an deren Erzeugung das betrachtete Elternindividuum beteiligt ist, seine Nachbarschaft.¹⁸ Die Kinder einer Folgegeneration können sich gegenseitig jedoch nicht über das betrachtete Elternindividuum erreichen, da sie jeweils auch die Information von wenigstens einem weiteren Elternteil enthalten. Insbesondere in Fällen besonders komplexer Problemstrukturen sind genetische Algorithmen in der Lage, mit anderen heuristischen lokalen Suchverfahren zu konkurrieren.¹⁹ Genetische Algorithmen können zur Problemlösung sowohl dann herangezogen werden, wenn der abzusuchende Lösungsraum groß und strukturell nicht sehr gut vorherzusehen oder zu erfassen ist,²⁰ als auch, wenn die genetischen Operatoren auf der Basis der Kenntnis der Lösungsraumstruktur entwickelt werden.²¹

Das grundlegende Theorem genetischer Algorithmen, das auf *Holland* zurückgehende sogenannte *Schema Theorem*,²² beschäftigt sich mit der Frage, wie groß die Anzahl der über die Generationen durch den Einsatz der genetischen Operatoren zu erhaltenden und zu schaffenden Strukturen (*schemata* oder auch *templates* = Schablonen) in der Menge der erzeugten Lösungen ist.²³ Das Ziel des Erkennens von *Schemata* besteht darin, solche Strukturen in einem dynamischen, d. h. Veränderungen unterliegenden,²⁴ Umfeld zu erhalten und/oder zu schaffen, die für die – bei Individuen, welche zur Weitervererbung selektiert werden, anzunehmender Weise hohe – Fitness des betrachteten Individuums eine erhebliche Rolle spielen. Stringabschnitte, welche die hohe Fitness eines Individuums maßgeblich bestimmen, werden als *building-blocks* bezeichnet.²⁵ Die Rekombination der selektierten Individuen soll im Idealfall dergestalt erfolgen, daß neue Individuen erzeugt werden, welche *building-blocks* aus den Elternteilen vereinen und somit eine höhere Fitness als die Eltern aufweisen.²⁶

In allgemeiner Form beschreibt *De Jong* den GA in den folgenden Schritten:²⁷

- (1) Erzeuge zufällig eine Ausgangspopulation.
- (2) Ermittle und speichere die Fitness von jedem Individuum in der gerade betrachteten Population.
- (3) Definiere die Selektionswahrscheinlichkeit für jedes Individuum in der gerade betrachteten Population, wobei sich die Selektionswahrscheinlichkeit eines Individuums proportional zu seiner Fitness verhält.
- (4) Erzeuge die nächste Generation durch Anwendung genetischer Operatoren auf die gerade betrachtete Population. Genetische Operatoren bestehen aus Selektions-, Reproduktions- und Rekombinationsoperatoren (Kreuzung und Mutation).
- (5) Gehe solange zurück zu (2), bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erreicht ist.

¹⁸ Vgl. Johnson/McGeoch (1997), S. 287.

¹⁹ Vgl. hierzu z. B. Crauwels/Potts/Van Wassenhove (1996), S. 212, Storer/Wu/Park (1992), S. 588. Angaben über Literatur, in der verschiedene neuere heuristische Lösungsverfahren verglichen werden, finden sich bei Osman/Laporte (1996), S. 553 f.

²⁰ Vgl. Mitchell (1996), S. 156, Pirlot (1996), S. 505. *Nissen* beschreibt verschiedene in der Literatur entwickelte Ansätze zur Messung der Eignung eines genetischen Algorithmus zur Lösung eines betrachteten Problems und stellt fest, daß diejenigen Ansätze hinsichtlich der Qualität der gefundenen Lösungen am vielversprechendsten erscheinen, die auf intuitiven Vorstellungen bezüglich der Fitnesslandschaft beruhen. Vgl. *Nissen* (1997), S. 97-101.

²¹ Z. B. gehen *Freisleben/Merz* bei der Entwicklung ihrer Operatoren für das TSP von einem global konvexen Lösungsraum aus, d. h. einem Lösungsraum, in welchem das globale Optimum in der Nähe des Zentrums eines von fast-optimalen Lösungen, die alle einen ungefähr ähnlichen Abstand zueinander haben, gesäumten Tals liegen kann, vgl. *Freisleben/Merz* (1996b), S. 616.

²² Vgl. ausführlich *Holland* (1992), S. 66-74.

²³ Vgl. z. B. *Goldberg* (1989), S. 9, *Mühlenbein* (1997), S. 142 f., *Hammerman/Goldberg* (1999), S. 130-132.

²⁴ Vgl. auch *Antonisse* (1989), S. 87.

²⁵ Vgl. z. B. *Langdon* (1998), S. 15.

²⁶ Vgl. *Goldberg* (1989), S. 41-45.

²⁷ Vgl. *De Jong* (1993), S. 7.

4.2 Kodierung genetischer Algorithmen

Die Abbildung der genetischen Information einer erzeugten Lösung bzw. eines erzeugten Individuums erfolgt anhand eines binär oder mehrwertig kodierten Vektors (String), wobei die binäre Kodierung die ursprüngliche Form ist. Der ein Individuum abbildende Vektor wird als Chromosom bezeichnet, dessen einzelne Positionen als loci, die Variable auf einem locus als Gen und der Wert der Variable als Allel.²⁸ Im Falle der binären Kodierung wird jeder locus auf dem string mit einer Binärvariablen (Gen) belegt, deren Wert (Allel) jeweils 0 oder 1 betragen kann. Im Falle der mehrwertigen Kodierung erfolgt die Belegung der loci direkt mit reellen Variablenwerten.

Die „richtige Kodierung“ der jeweils einen Ablaufvektor darstellenden Individuen zu wählen, ist eine zentrale Problemstellung bei der Implementierung eines genetischen Algorithmus, wobei keine allgemeingültige Aussage bezüglich der Vorteilhaftigkeit einer bestimmten Kodierung getroffen werden kann.²⁹ Einerseits haben allgemeine Problemstrukturen erfassende Algorithmen ihre Berechtigung aufgrund größerer Robustheit,³⁰ zumal für ein sehr komplexes Problem im voraus schwer festzustellen ist, welche Kodierung die unumstritten beste für das betrachtete Problem darstellt.³¹ Andererseits ist es naheliegend, diejenige Kodierung zu wählen, welche dem Charakter bzw. der Struktur des betrachteten spezifischen Problems am nächsten kommt, da Algorithmen mit problemspezifischer Kodierung die „besseren Optimierer“ sind.³²

Für die Gruppe sehr komplexer Entscheidungsprobleme wird zunehmend die mehrwertige der binären (kanonischen) Kodierung vorgezogen.³³ Befürworter der kanonischen Kodierung erläutern zwar, daß der Lösungsraum besser als mit einer nicht-kanonischen Kodierung erfaßt wird.³⁴ Dagegen spricht jedoch, daß sich eine binäre Kodierung der jeweils ein Individuum abbildenden Strings deswegen nicht zur Optimierung von Funktionen eignet, weil eine Lösung, die phenotypisch möglicherweise extrem nahe am globalen Optimum liegt, nicht gefunden wird, da die dafür notwendigen genotypischen Veränderungen des Bitstrings zu zahlreich sind.³⁵ So kann zum einen die sogenannte *hamming distance*, welche die Anzahl der unterschiedlichen Bits beim positionsweisen Vergleich von zwei Strings wiedergibt, und die zwischen bestem und schlechtestem Individuum (gemessen an der jeweiligen Fitness) bei kanonischer Kodierung häufig als Maß für die Heterogenität einer Population dient,³⁶ sehr klein sein, obwohl die betrachteten Individuen im Lösungsraum der Fitness-Werte weit auseinander liegen; zum anderen entfällt bei der binären Kodierung aufgrund des Arbeitens auf genotypischer Ebene die Möglichkeit, graduelle Veränderungen zu erreichen, d. h., daß eine geringfügige Veränderung einer Entscheidungsvariablen auch zu einer relativ geringfügigen Veränderung der Fitness des Individuums führt.³⁷ Als weiterer „Vorteil“ der kanonischen Kodierung wird die Möglichkeit der Standardanwendung der genetischen Operatoren genannt,³⁸ welche die generierten Bitstrings dann bspw. sektionsweise paaren.³⁹ Hiergegen spricht allerdings, daß das große Potential genetischer Algorithmen gerade in der problemspezifischen Ausge-

²⁸ Vgl. Mühlbein (1997), S. 141.

²⁹ Zu dieser Problematik vgl. z. B. Aufsätze von Janikow/Michalewicz (1991), Tamaki et al. (1994).

³⁰ Vgl. Davis (1991b), S. 64.

³¹ Vgl. Mitchell (1996), S. 158.

³² Vgl. Davis (1991b), S. 64.

³³ Vgl. z. B. die Gegenüberstellung der Variablen-Kodierung bei Bäck (1996), S. 132, und Nissen (1997), S. 242. Vgl. auch die klare Abgrenzung bei Schöneburg/Heizmann/Feddersen (1994), S. 219.

³⁴ Vgl. Stöppler/Bierwirth (1992), S. 165.

³⁵ Vgl. De Jong (1993), S. 14 f.

³⁶ Vgl. z. B. De Jong (1993), S. 14, Nissen (1997), S. 45, Bäck (1996), S. 39.

³⁷ Vgl. Eshelman/Schaffer (1993), S. 188.

³⁸ Vgl. Crauwels/Potts/Van Wassenhove (1996), S. 206.

³⁹ Vgl. Crauwels/Potts/Van Wassenhove (1996), S. 208.

gestaltung der Operatoren liegt. So haben die ersten Anwendungen eines GA zur Lösung des Rundreiseproblems eine kanonische Kodierung zur Reihenfolgeabbildung verwendet⁴⁰ und die Operatoren unabhängig von der individuellen Problemstruktur gestaltet, wodurch entsprechende Verfahren nicht mit einfacheren, speziell auf das Rundreiseproblem zugeschnittenen Heuristiken⁴¹ konkurrieren konnten.⁴²

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß sowohl aus Praktikabilitätsüberlegungen⁴³ als auch aufgrund theoretisch fundierter Erkenntnisse⁴⁴ die binäre Kodierung an Stellenwert verloren hat, und insbesondere für komplexe Probleme, bei welchen in einem Gen umfangreiche Information abgespeichert werden muß, eine mehrwertige Kodierung der binären Kodierung bei entsprechender Gestaltung der genetischen Operatoren vorzuziehen ist.⁴⁵ Folgendes in Anlehnung an Antonisse skizziertes Beispiel verdeutlicht abschließend den Unterschied zwischen den beiden Kodierungsformen.⁴⁶

Beispiel:

Gegeben sind zwei Kodierungsformen, bei der ersten kann jedes Gen auf dem Chromosom zwei verschiedene Werte annehmen (binäre Kodierung), bei der zweiten kann jedes Gen zehn Werte annehmen (mehrwertige Kodierung). Die beiden unterschiedlich kodierten Chromosomen können in etwa die gleiche Menge unterschiedlicher Schemata erfassen, wenn das Chromosom im ersten Fall aus 20 loci und im zweiten Fall aus 6 loci besteht, da $2^{20} = 1,048576 \cdot 10^6 \approx 10^6$. Sollte ein Schema auch die Möglichkeit berücksichtigen, daß es für bestimmte Positionen unerheblich ist, welchen Wert die Variable auf der betrachteten Position annimmt,⁴⁷ würde sich der Umfang der möglichen Schemata in dem ersten Fall auf $(2+1)^{20} = 3,4868 \cdot 10^9$ und im zweiten Fall nur auf $(10+1)^6 = 1,7716 \cdot 10^6$ erhöhen. Um die Reihenfolge von I einzuplanenden Produktarten abzubilden, wird für jede mögliche Kantenbeziehung eine (0,1)-Variable definiert. Bei einer symmetrischen Reihenfolgestruktur beträgt die Anzahl der möglichen Kantenbeziehungen (Anzahl der Gene = Chromosomenlänge)

$$(I-1) + (I-2) + \dots + (I-(I-1)) = \sum_{n=1}^{I-1} (I-n) = \frac{I \cdot (I-1)}{2}. \text{ Bei einer asymmetrischen Reihenfolge-}$$

struktur beträgt die Chromosomenlänge sogar $I \cdot (I-1) = I^2 - I$, da in diesem Fall die Reihenfolge der in einer Kantenbeziehung abgebildeten Produktarten erheblich ist. Im Fall der mehrwertigen Kodierung beträgt die Genanzahl I. Demzufolge übersteigt die Genanzahl bei binärer Kodierung diejenige bei mehrwertiger Kodierung im Fall einer symmetrischen Reihenfolge-

$$\text{struktur um } \sum_{n=1}^{I-1} (I-n) - I = \sum_{n=2}^{I-1} (I-n) - 1 = \sum_{n=2}^{I-2} (I-n) = \frac{I \cdot (I-1)}{2} - I,^{48} \text{ und im Fall einer asym-}$$

⁴⁰ Vgl. z. B. Grefenstette et al. (1985).

⁴¹ Vgl. hierzu Grötschel/Holland (1991).

⁴² Vgl. Kolen/Pesch (1994), S. 276

⁴³ So wird das Bearbeiten eines Optimierungsproblems durch die binäre Abbildung natürlicher Zahlen unverhältnismäßig aufgebläht und verkompliziert, vgl. hierzu auch Bäck/Schwefel (1996), S. 25. Auch die experimentellen Untersuchungen von Davis haben zu dem Ergebnis geführt, daß genetische Algorithmen mit mehrwertig kodierten Chromosomen besser funktionieren als mit binär kodierten, vgl. Davis (1991b), S. 63.

⁴⁴ Daß sich die Vorteilhaftigkeit einer mehrwertigen Kodierung nicht nur auf experimentelle Ergebnisse stützt, sondern auch theoretisch begründen läßt, zeigen Eshelman/Schaffer, vgl. Eshelman/Schaffer (1993). Vgl. auch Antonisse (1989).

⁴⁵ Vgl. auch Rubin/Ragatz (1995), S. 88, Mitchell (1996), S. 156, sowie die dort angegebene Literatur.

⁴⁶ Vgl. auch im folgenden Antonisse (1989), S. 87 f.

⁴⁷ Vgl. z. B. Mühlenbein (1997), S. 143, Oliver/Smith/Holland (1987), S. 225.

⁴⁸ Vgl. hierzu ein Beispiel bei Whitley/Starkweather/Shaner (1991), S. 356.

metrischen Reihenfolgestruktur um I²-2-I. Bezüglich der Handhabung ist es also unkomplizierter, eine Permutationsfolge mehrwertig anstatt binär zu kodieren.

4.3 Operatoren genetischer Algorithmen

Die Anwendung genetischer und evolutionärer Verfahren zur Lösung kombinatorischer Produktionsplanungsprobleme ist sehr zahlreich. Sowohl im Bereich der Fließbandabtaktung als auch in der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung hat sich die Anwendung genetischer Lösungsverfahren als sinnvoll erwiesen.⁴⁹ Daß gerade in diesem Bereich mit genetischen Operatoren hervorragende Ergebnisse erzielt werden können, liegt vor allem an der Möglichkeit, die genetischen Operatoren genau auf die betrachtete Problemstruktur zuzuschneiden.⁵⁰

4.3.1 Selektion

Die Selektion beschreibt den Auswahlprozeß derjenigen Individuen, die jeweils in die Folgegeneration übernommen und zur Kreuzung herangezogen werden. Der Auswahlprozeß erfolgt zumeist in proportionaler Abhängigkeit von der Fitness. Diese als *fitness proportional reproduction* bezeichnete Selektion führt zu dem gewünschten Effekt, daß sich die Fitness der Population von Generation zu Generation im Mittel verbessert und der Lösungsraum gut ausgeschöpft wird.⁵¹

Wird die Entscheidung, ob ein Individuum in die Folgegeneration aufgenommen wird oder nicht, unmittelbar nach seiner Erzeugung getroffen, liegt eine stationäre Selektion vor. Bei der stationär elitären Selektion wird ein erzeugtes Kind in jedem Fall in die Population zur Erzeugung der nächsten Generation aufgenommen, wenn seine Fitness besser ist als die des schlechtesten Individuums in der Population, aus welcher die betrachtete Kindgeneration hervorgeht. Das bis dato schlechteste Individuum wird dann durch das gerade erzeugte Kind ersetzt.⁵² Eine andere stationäre Vorgehensweise besteht in dem jeweils unmittelbaren Vergleich von erzeugtem Kind und den Eltern, aus welchen das betrachtete Kind hervorgeht. In der z. B. von *Mattfeld* dargestellten stationär elitären Selektion wird der elitäre Charakter etwas relativiert, indem ein erzeugtes Kind ein Elternteil schon dann ersetzt, wenn die Fitness des Kindes besser ist als die um einen Akzeptanzbereich korrigierte Fitness des Elternindividuum.⁵³

⁴⁹ Vgl. z. B. Chen/Vempati/Aljaber (1995), Cleveland/Smith (1989), Davis (1995), Anderson/Ferris (1994), Gehring/Schütz (1994), Kimms (1997), Lee/Sikora/Shaw (1993), Crauwels/Potts/Van Wassenhove (1996), Haase/Kohlmorgen (1996), Bierwirth (1992), Glass/Potts (1996), Jordan (1998), Yamada/Reeves (1998). Vgl. auch die einschlägigen Literaturverweise in Osman/Laporte (1996), S. 520.

⁵⁰ Vgl. Pirlot (1996), S. 505. Vgl. auch die Gegenüberstellung der beiden genetischen Algorithmen – einen mit problemnaher und einen mit problemferner Repräsentation – bei Gehring/Schütz (1994). Die Erfahrungen von *Kimms* bezüglich der Anwendung eines genetischen Algorithmus für das PLSP zeigen, daß das Unterlassen der Entwicklung problemspezifischer Operatoren zu sehr negativen Ergebnissen führen kann, vgl. *Kimms* (1997), S. 163-169, S. 220 f.

⁵¹ Vgl. *Shiroma* (1996), S. 39, 43, *Holland* (1975), (1992), S. 90. Zu Anwendungen der *fitness proportional reproduction* vgl. z. B. *Starkweather/Whitley/Cookson* (1992), S. 570, *Pirlot* (1996), S. 502, *Rabelo/Jones/Yih* (1995), S. 207.

⁵² Vgl. *Asveren/Molitor* (1996), S. 292.

⁵³ Konkret hat *Mattfeld* die Fitness eines Individuums mit dem Zielfunktionswert (Zykluszeit) gleichgesetzt. Bei dem von *Mattfeld* betrachteten Minimierungsproblem wird ein Elternindividuum p durch das erzeugte Kind o ersetzt, wenn gilt: $f_o < f_p + (f_p - LB) \cdot X$, wobei f die Fitness, LB eine für das betrachtete Problem konkretisierte Untergrenze und X ein Akzeptanz-Kriterium darstellen. Letzteres wird idealer Weise auf 0,1 gesetzt und bewirkt eine kontinuierlich abnehmende Akzeptanz neuer Individuen. Vgl. *Mattfeld* (1996), S. 104. Bereits *Gorges-Schleuter* arbeitet mit der Idee des Akzeptanz-Kriteriums, vgl. *Gorges-Schleuter* (1989), S. 423.

4.3.2 Kreuzung

Die Kreuzung beschreibt die Methodik, wie die selektierten Individuen zur Erzeugung eines oder mehrerer Kinder kombiniert werden müssen und stellt das Rückgrat eines genetischen Algorithmus dar, da er erst durch sie lebt.⁵⁴ Bei der Kreuzung sollten zum einen nach Möglichkeit building-blocks rekombiniert werden, zum anderen muß auf die Zulässigkeit der erzeugten Individuen geachtet werden. Bezüglich des Aufrechterhaltens der Zulässigkeit gibt es grundsätzlich vier Möglichkeiten:⁵⁵

- Eine problemgerechte Gestaltung des Operators selbst gewährleistet, daß das (die) bei jeder Paarung erzeugte(n) Kind(er) wiederum zulässig ist (sind), z. B. durch Berücksichtigung von aufrecht zu erhaltenden Nennungshäufigkeiten⁵⁶ und/oder Vorrangbeziehungen⁵⁷ oder einzuhaltenden Terminen.⁵⁸
- Der Operator selbst wird unabhängig von zu berücksichtigenden Zulässigkeitsbedingungen gewählt und die somit erzeugten ggf. unzulässigen Individuen der Folgegeneration mit Hilfe von Korrekturroutinen in zulässige Lösungen transformiert.⁵⁹
- Ein unzulässiges Individuum erhält eine extrem schlechte Fitness (z. B. mittels aufzuschlagende Strafkosten auf die zu minimierende Kostenfunktion) und wird folglich nicht wieder bzw. sehr viel weniger wahrscheinlich zur Erzeugung der Nachfolgegeneration verwendet.⁶⁰
- Unzulässige Individuen bleiben unverändert in der Population erhalten, wobei dafür gesorgt wird, daß nur diejenigen Gene des betrachteten Individuums zur Erzeugung von Kindern herangezogen werden dürfen, welche zulässig sind.

Im folgenden sind einige Möglichkeiten der Gestaltung des Kreuzungsoperators für das Problem der Reihenfolgeplanung beschrieben.

Kreuzungsoperatoren zur Reihenfolgebestimmung

Für die der Permutationsfertigung häufig zu Grunde gelegte Struktur des TSP ist eine Vielzahl an Operatoren bekannt. Der von *Goldberg/Lingle* entwickelte PMX = partially mapped crossover⁶¹ erzeugt bei einem Paarungsvorgang von zwei Elternteilen P1 und P2 zwei Kinder K1 und K2. In einem ersten Schritt erhält K1 die zwischen zwei Schnittstellen liegenden Gene von P2 und K2 diejenigen von P1, wobei die außerhalb der Schnittstellen liegenden Po-

⁵⁴ Vgl. Crauwels/Potts/Van Wassenhove (1996), S. 208.

⁵⁵ Vgl. hierzu Anderson/Ferris (1994), S. 163.

⁵⁶ Vgl. z. B. die im Anschluß kurz erläuterten Operatoren OX, PBX, ER.

⁵⁷ Vgl. z. B. Grefenstette (1987b), S. 42-60, Eiben/Raué/Ruttkey (1994), S. 81.

⁵⁸ Vgl. z. B. Cleveland/Smith (1989), S. 164.

⁵⁹ Vgl. z. B. den im Anschluß kurz erläuterten PMX oder weitere "reordering operators" in Goldberg (1989), S. 166-179.

⁶⁰ *Gen/Chen* zeigen, daß der Erhalt von unzulässigen Lösungen sehr nützlich sein kann, da bei im voraus nicht bekannter Aufteilung des Lösungsraums in zulässigen und in unzulässigen Bereich durchaus die Möglichkeit besteht, daß eine unzulässige Lösung dem globalen Optimum viel näher als eine andere zulässige Lösung ist, d. h. viel mehr Information mit dem Optimum gemein hat als andere zulässige Lösungen, vgl. *Gen/Cheng* (1996), S. 805. *Richardson et al.* zeigen in ihrem Beispiel, daß die *hamming distance* zwischen der optimalen Lösung und verschiedenen unzulässigen Lösungen eins betragen kann, d. h. die unzulässigen Lösungen sind unmittelbare Nachbarn der optimalen Lösung, so daß eine einzige Mutation ausreichen würde, um von ihnen zum Optimum zu gelangen, vgl. *Richardson et al.* (1989), S. 192.

⁶¹ Vgl. *Goldberg/Lingle* (1985).

sitionen von K1 mit den Genen auf den entsprechenden Positionen von P1 und die von K2 mit denjenigen von P2 belegt werden. In einem zweiten Schritt werden die erzeugten Kinder in zulässige Lösungen transformiert, wobei P1 als Orientierungselternteil für K1 und P2 für K2 dient. Eine zulässige Lösung K1 wird erzeugt, indem diejenigen zwischen den Schnittstellen liegenden mit den Genen von P2 belegten Positionen, welche mit Genen belegt sind, die auch in den außerhalb der Schnittstellen liegenden mit den Genen von P1 belegten Positionen vorkommen, mit den jeweiligen Entsprechungen in dem Orientierungselternteil P1 ersetzt werden. Die Erzeugung einer zulässigen Lösung K2 erfolgt analog.

Dem die absoluten Genpositionen bewahrenden PMX gegenüber haben sich Operatoren, welche die relativen Genpositionen aufrecht zu halten versuchen, als überlegen herausgestellt.⁶² Zu den die relativen Positionsbelegungen berücksichtigenden Operatoren zählt z. B. der „reorder crossover“⁶³, der ebenfalls an zwei Schnittstellen kreuzt. Dabei werden in dem zwischen den Schnittstellen liegenden Abschnitt die loci mit den Genen aus einem Elternteil, und die außerhalb des Abschnitts liegenden loci mit den noch nicht zugeordneten Genen – allerdings in der Reihenfolge, wie sie in dem anderen Elternteil auftreten – belegt; der „insertion crossover“ stellt hinsichtlich der Behandlung des zwischen den Schnittstellen liegenden Abschnitts die Umkehrung des „reorder crossover“ dar.⁶⁴ Der von *Oliver/Smith/Holland* entwickelte OX = order crossover vererbt dem zu erzeugenden Kind durch das Einrichten von Platzhalterloci die Gene eines Elternteils und verteilt diejenigen Gene, welche nicht die bereits weitervererbten Platzhalterloci belegen, auf die übrigen loci mit der relativen Reihenfolge ihres Auftretens in dem anderen Elternteil.⁶⁵ Die von *Syswerda* entwickelten Operatoren OBX = Order-based crossover und PBX = Position-based crossover wählen ohne Schnittstellen bestimmte Positionsbelegungen eines Elternteils aus und ersetzen zur Erzeugung des Kindstrings die ausgewählten Positionen mit den entsprechenden Belegungen an den Positionen des anderen Elternstrings, wobei OBX und PBX sich in der Fixierung des Elternteils unterscheiden.⁶⁶

Eine andere Struktur weist der auch auf *Oliver/Smith/Holland*⁶⁷ zurückgehende CX = cycle crossover auf, welcher aus zwei Elternstrings Teilmengen solcher Positionen bildet, deren Belegungen die gleichen Gene umfassen, wobei die konkrete Zuordnung der einzelnen Gene zu den der jeweiligen Teilmenge angehörenden Positionen unerheblich ist. Die der Teilmenge angehörenden Positionen werden mit den Genen von dem einen Elternteil weitervererbt und die anderen Positionen mit den entsprechenden Belegungen des anderen Elternteils gefüllt. Der CX bewahrt in dem Kindstring demnach weder die absoluten (wie der PMX) noch die relativen Positionen einzelner Gene oder Genabschnitte (wie der reorder crossover, der OX oder der OBX und PBX). Sowohl die Idee der absoluten als auch die der relativen Positionsbelegungen vereint der von *Asveren/Molitor* vorgestellte MOX = meta-ordering crossover, der immer eine mehrere loci umfassende Teilmenge alternierend von einem der beiden zu paarenden Elternteile bildet, und in dem Kind die Gene auf die entsprechenden loci mit der relativen Reihenfolge ihres Auftretens in dem jeweils anderen Elternteil setzt. Eine Teilmenge besteht hierbei immer nur aus solchen Genen, welche in dem Kind noch nicht zugeordnet wurden.⁶⁸ Nach Untersuchungen der Autoren selbst ist der MOX dem PMX überlegen.⁶⁹

⁶² Vgl. hierzu z. B. Mattfeld (1996), S. 55.

⁶³ Vgl. Reeves (1995).

⁶⁴ Vgl. hierzu Glass/Potts (1996), S. 500.

⁶⁵ Vgl. Oliver/Smith/Holland (1987).

⁶⁶ Vgl. Syswerda (1995), S. 343.

⁶⁷ Vgl. Oliver/Smith/Holland (1987).

⁶⁸ Vgl. Asveren/Molitor (1996), S. 294 f.

⁶⁹ Vgl. Asveren/Molitor (1996), S. 296.

Dem Anspruch, nicht nur die Zulässigkeit aufrecht zu halten, sondern darüber hinaus auch building-blocks zu vereinen, wird der auf Whitley/Starkweather/Fuquay⁷⁰ zurückgehende kantenorientierte ER = Edge Recombination Operator besser gerecht als die zuvor genannten positionsorientierten – von Freisleben/Merz als „blinde Operatoren“⁷¹ bezeichneten – Operatoren.⁷² Der ER stellt das Aufrechterhalten direkter Nachbarschaftsbeziehungen zweier Knoten in den Vordergrund, da nicht in den Positionsbelegungen mit bestimmten Produktarten, sondern in den Kantenbeziehungen building-blocks vermutet werden. Der von Tang/Leung⁷³ vorgestellte EdgeNN stellt nach Aussage der Autoren⁷⁴ eine Weiterentwicklung des ER dar, wobei die Weiterentwicklung in der Einbindung von heuristischen Elementen besteht.⁷⁵ Auch der von Yamamura *et al.*⁷⁶ entwickelte SXX = Subtour Exchange crossover erreicht durch Austausch (und Inversion) von die gleichen Elemente in unterschiedlicher Reihenfolge (Anwendung nur für symmetrische TSPs) umfassenden Subtouren den Erhalt von solchen Kanten, die aufgrund des Auftretens in mehreren Subtouren möglicherweise einen building-block darstellen. Eine noch stärkere Kantenorientierung verfolgt der auf Maekawa *et al.*⁷⁷ zurückgehende EEX = Edge Exchange crossover, da beim EEX die Gene der Chromosomen direkt als Kanten kodiert sind. Durch Kombination und Inversion der Kanten beider Eltern wird bei jedem Kreuzungsvorgang jeweils ein Kind gezeugt, welches ausschließlich aus Kanten besteht, die wenigstens in einem der beiden Elternteile vorkommen. Nach Untersuchungen von Maekawa *et al.* ist der EEX dem CX und dem PMX stark, dem SXX und dem ER leicht überlegen. Durch die Inversion ist dieser Operator allerdings ebenfalls auf die symmetrische TSP-Struktur beschränkt.

Der auf Eiben/Raué/Ruttka zurückgehende OB-ABC = Occurrence-based Adjacency-based crossover ist ein multi-parent Ansatz, d. h., daß an dem Kreuzungsvorgang mehr als zwei Eltern beteiligt sind.⁷⁸ Beim OB-ABC erfolgt die Belegung der loci in dem zu erzeugenden Kind sukzessive durch schrittweises bzw. loci-weises Belegen der jeweils noch zu vererbenden Gene anhand der Häufigkeit bestimmter Kantenfolgen in den Elternstrings.⁷⁹ Der OB-ABC ist also wie der ER ein Kreuzungsoperator, der die in den betrachteten Eltern bestehenden Nachbarschaftsbeziehungen im Rahmen der Vererbung zu erhalten versucht. Im Gegensatz zum ER arbeitet der OB-ABC allerdings zum einen mit vier anstatt mit zwei Elternteilen, zum anderen werden zu jeder gerade betrachteten Kante nur die Nachfolgerkanten anstelle der Vorgänger- und Nachfolgerkanten betrachtet. Zudem spielt beim OB-ABC die Häufigkeit des Auftretens einer bestimmten Kante für die Entscheidung, diese Kante in dem Kind zu erhalten, eine Rolle. Die Berücksichtigung der Häufigkeit des Auftretens bestimmter Kanten erfolgt, weil angenommen werden kann, daß eine bestimmte Kantenbeziehung, welche in vier Individuen mit hohen Fitness-Werten mehrfach vorkommt, möglicherweise die hohe Fitness maßgeblich beeinflußt und darum unbedingt in dem Kind erhalten bleiben sollte (vgl. buil-

⁷⁰ Vgl. Whitley/Starkweather/Fuquay (1989).

⁷¹ Vgl. Freisleben/Merz (1996a), S. 892.

⁷² Zu der Beurteilung, daß der ER für das symmetrische TSP anderen Operatoren überlegen ist vgl. z. B. Lee/Sikora/Shaw (1993), S. 385, Mattfeld (1996), S. 55. Die Vorteilhaftigkeit eines bestimmten Operators läßt sich allerdings nicht eindeutig bestimmen. So haben Murata/Ishibuchi im Rahmen einer verschiedenen Kreuzungsoperatoren und Mutationsoperatoren vergleichenden Analyse für eine Permutationsreihenfertigung festgestellt, daß der PBX dem ER überlegen ist, vgl. Murata/Ishibuchi (1996), S. 172.

⁷³ Vgl. Tang/Leung (1994), S. 180-182. Ein Überblick über die kurz beschriebenen und weitere Operatoren findet sich z. B. bei Potvin (1996), S. 351-361, Starkwether *et al.* (1992), S. 132-136.

⁷⁴ Vgl. Tang/Leung (1994), S. 180.

⁷⁵ Der Zusatz „nach Aussage der Autoren“ ist hier deswegen angefügt, da der EdgeNN in der Methodik vielmehr dem noch vorzustellenden OB-ABC von Eiben/Raué/Ruttka entspricht.

⁷⁶ Vgl. Yamamura/Ono/Kobayashi (1996), S. 538.

⁷⁷ Vgl. hierzu Maekawa *et al.* (1996), S. 531 f.

⁷⁸ Vgl. hierzu auch Aufsätze von Mühlenbein (1989) und Seront/Bersini (1992).

⁷⁹ Vgl. Eiben/Raué/Ruttka (1994), S. 80 f.

ding-block-Hypothese⁸⁰). In der Methodik kommt auch der von *Tang/Leung* als „Weiterentwicklung des ER“ (s.o.) vorgestellte EdgeNN einer Form von OB-ABC im Prinzip näher als dem ER selbst, da beim EdgeNN ebenfalls sowohl die direkten Kantenbeziehungen als auch die Häufigkeit ihres Auftretens relevant sind.⁸¹

4.3.3 Mutation

Der Mutations-Operator sorgt dafür, daß ein Kind auch Information enthalten kann, welche in keinem der Eltern vorliegt,⁸² und bewahrt somit eine Population vor Homogenität.⁸³ Ursprünglich wurde die Ansicht vertreten, daß die Mutation im Gegensatz zur Kreuzung lediglich als Hintergrundoperator fungieren sollte.⁸⁴ Die Anwendung eines Mutationsoperators bzw. welchen Mutationsoperators hängt jedoch grundsätzlich davon ab, wie geeignet er sich in dem Zusammenspiel mit dem Kreuzungsoperator erweist. *Freisleben/Merz* beschreiben in ihrem genetischen Algorithmus das Zusammenspiel von Kreuzungs- und Mutationsoperator wie folgt:⁸⁵ Bei der Durchsuchung des Lösungsraums durchforstet der GA den Lösungsraum, indem er von einem mit Hilfe des Selektionsoperators gefundenen lokalen Optimum zum nächsten springt, bis das globale Optimum gefunden ist. Die Sprungkraft besteht zum einen aus dem Kreuzungs- und zum anderen aus dem Mutationsoperator, wobei der Kreuzungsoperator ausgehend von den lokalen Minima mit variierender Länge in dieselbe Richtung und der Mutationsoperator in eine zufällige Richtung mit konstanter Länge springt.

Da prinzipiell im voraus nicht gesagt werden kann, ob die Kombination von für eine bestimmte Problemstruktur isoliert angewandt sehr gute Ergebnisse erzielenden Kreuzungs- und Mutationsoperatoren im Zusammenspiel auch zu schlechteren Ergebnissen als in der isolierten Anwendung führen kann,⁸⁶ sollte die Festlegung auf einen Mutationsoperator grundsätzlich erst nach einer experimentellen Analyse von für die Problemstellung überhaupt in Frage kommenden Kreuzungsoperatoren erfolgen. Die Mutationsrate beschreibt bei jedem Evolutionsschritt jeweils den Anteil der Gene der erzeugten Individuen, auf die der Mutationsoperator angewandt wird. Bezüglich der Dimensionierung wurde die Beobachtung gemacht, daß anfangs höhere und im Verlauf des Evolutionsprozesses abnehmende Mutationsraten sich als sehr nützlich erwiesen haben, sowohl in bezug auf die Zuverlässigkeit, daß der Algorithmus gegen das globale Optimum konvergiert, als auch auf seine Schnelligkeit.⁸⁷

⁸⁰ Vgl. in diesem Zusammenhang auch die Beschreibung des *o-schemas* von *Oliver/Smith/Holland*, welches abweichend von dem ursprünglichen Schema-Begriff in einem Lösungsstring auch dann festzustellen ist, wenn eine bestimmte Ordnung in dem Auftreten der entsprechend des betrachteten *o-schemas* von den Variablen anzunehmenden Werte vorliegt, wobei diese Ordnung z. B. Positionsverschiebungen unterliegen kann, *Oliver/Smith/Holland* (1987), S. 225-227.

⁸¹ Vgl. *Tang/Leung* (1994), S. 180-182.

⁸² Vgl. *Stöppler/Bierwirth* (1992), S. 168.

⁸³ Vgl. *Crauwels/Potts/Van Wassenhove* (1996), S. 208.

⁸⁴ Vgl. *Holland* (1992), S. 109-111.

⁸⁵ Vgl. im folgenden *Freisleben/Merz* (1996a).

⁸⁶ Vgl. *Murata/Ishibuchi* (1996), S. 171-173, *Chen/Vempati/Aljaber* (1995), S. 392.

⁸⁷ Vgl. *Bäck/Schwefel* (1996), S. 25.

Hybride Genetische Algorithmen

In der Literatur wird vielfach erwähnt, daß die Qualität eines genetischen Algorithmus bei Einbeziehung eines anderen – zumeist lokalen⁸⁸ – Lösungsverfahrens erheblich steigt.⁸⁹ Diese sogenannte Hybridisierung ist allerdings in den Fällen der Kombination mit die Nachbarschaft absuchenden Lösungsverfahren im Prinzip nichts anderes, als die ausreichend häufige Anwendung einer Form von Mutationsoperator auf das mittels Kreuzung aus den jeweiligen Eltern hervorgehende Kind, bis dieses Kind-Individuum soweit mutiert ist, daß es ein lokales Optimum darstellt. Erst das mutierte Kind, das lokale Optimum, geht dann in die Population ein. *Glass/Potts* z. B. beschreiben die Integration von GA und Descent-Verfahren sinngemäß so: Die Aufgabe des GA besteht darin, in dem Lösungsraum die Täler zu finden und die des Descent-Verfahrens darin, die Täler hinunterzugehen.⁹⁰ Die für das Descent-Verfahren von *Glass/Potts* definierte Nachbarschaft “swap-neighbourhood”⁹¹ verdeutlicht, daß das Hinzuziehen eines lokalen Suchverfahrens, um in die neue Generation nur lokale Optima aufzunehmen, mit einer entsprechend häufigen Anwendung⁹² eines geeigneten Mutationsoperators realisiert werden kann. So zählt auch *Potvin* lokale Verbesserungsverfahren wie 2-Opt oder 3-Opt im Rahmen der Beschreibung der Funktionsweise von genetischen Algorithmen für das TSP zu den Mutationsoperatoren.⁹³

⁸⁸ Z. B. *Nagar* kombiniert branch&bound mit GA, vgl. *Nagar* (1996).

⁸⁹ Vgl. z. B. *Ulder et al.* (1991), *Mathias/Whitley* (1992), *Glover/Kelly/Laguna* (1995), *Glass/Potts* (1996), *Freisleben/Merz* (1996a). Nach Untersuchungen der Autoren selbst ist zur Lösung des TSP der Algorithmus von *Freisleben/Merz* allen anderen genetischen Ansätzen überlegen und mit den besten nicht genetischen Ansätzen vergleichbar, vgl. *Freisleben/Merz* (1996a), S. 897. Mit den „besten nicht genetischen Ansätzen“ beziehen sich *Freisleben/Merz* auf die von *Martin/Otto/Felten* angewandte Heuristik, in der jeweils nur von einer Lösung ausgehend ein Mutationsoperator mit dem lokalen Optimierer 3-Opt kombiniert wird, und auf die dann von *Johnson* durch Modifikation des Mutationsoperators und durch Ersetzen von 3-Opt mit LK zu der so genannten ILK = Iterated Lin-Kernighan Heuristik weiterentwickelten Heuristik. Vgl. hierzu *Johnson/McGeoch* (1997), S. 291-298, *Martin/Otto/Felten* (1991), (1992). Trotz Bezeichnung als genetischen Ansatz durch *Johnson*, zählen *Freisleben/Merz* den ILK nicht zu den genetischen Algorithmen, da er von einer nur einelementigen Population ausgeht und keinen Kreuzungsoperator beinhaltet, somit also die Schlüsselemente eines genetischen Algorithmus fehlen, vgl. *Freisleben/Merz* (1996a), S. 893. Erst der bereits erwähnte und von *Freisleben/Merz* entwickelte DPX und LK kombinierende Ansatz erfüllt die Kriterien, um als GA kategorisiert zu werden, die ILK-Heuristik kann allenfalls als Sonderfall (Populationsgröße=1, Mutationsrate=1, Kreuzungsrate=0) ihres Algorithmus verstanden werden, vgl. *Freisleben/Merz* (1996a), S. 897. Ein Überblick über weitere genetische Ansätze findet sich bei *Johnson/McGeoch* (1997), S. 286-302.

⁹⁰ Vgl. *Glass/Potts* (1996), S. 500.

⁹¹ Üblicherweise wird als *swap* ein Mutationsoperator bezeichnet, der zufällig zwei Gene auswählt und vertauscht, vgl. z. B. *Potvin* (1996), S. 361, wobei z. B. *Mattfeld* diese Form von Mutationsoperator als *order based mutation* bezeichnet und bei einem *swap* ein Gen zufällig auswählt und dieses mit einem unmittelbar benachbarten Gen vertauscht, vgl. *Mattfeld* (1996), S. 94.

⁹² Um mit einem “swap“-Mechanismus diejenige Lösung in der relativ zu einer Ausgangslösung definierten Nachbarschaft zu finden, welche den besten Zielfunktionswert aufweist, müssen $\frac{1}{2}G_{anz}(G_{anz} - 1)$ Nachbarschaftsbeziehungen abgetastet werden, wobei G_{anz} die Anzahl der Gene eines eine Lösung repräsentierenden Individuums bezeichnet, vgl. auch *Glass/Potts* (1996), S. 494.

⁹³ Vgl. *Potvin* (1996), S. 361.

4.4 Genetischer Algorithmus (GA) zur Lösung des VLSP

In Anlehnung an die zuvor für die Methodik genetischer Algorithmen im allgemeinen von *De Jong* beschriebenen fünf Schritte, kann der in vorliegender Arbeit entwickelte Genetische Algorithmus zur Lösung des VLSP ganz grundlegend wie folgt beschrieben werden:

- (1) Erzeuge eine Menge von bereits relativ guten Lösungen mit einem speziell für die betrachtete Problemstellung entwickelten stochastischen Konstruktionsverfahren. Jede gefundene zulässige Lösung repräsentiert ein Individuum in der Ausgangspopulation.
- (2) Ermittle und speichere die Fitness (Güte des Zielfunktionswertes) von jedem Individuum in der Population.
- (3) Bestimme anhand fitnessproportionaler Selektionsoperatoren, welche der Individuen in der betrachteten Population für die Erzeugung der nächsten Generation zur Verfügung stehen und welche hieraus jeweils zur Erzeugung der Kinder herangezogen werden sollen.
- (4) Erzeuge neue Kinder und somit die nächste Generation durch Anwendung eines speziell entwickelten Kreuzungsoperators, der einen Mutationsoperator bereits impliziert.
- (5) Gehe solange zurück zu Punkt (2), bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erreicht ist.

Zunächst wird in Abschnitt 4.4.1 die Kodierung des genetischen Algorithmus zur Lösung des VLSP beschrieben und anschließend in Abschnitt 4.4.2 das zur Erzeugung der Ausgangspopulation entwickelte Verfahren *PDZ* sowie in Abschnitt 4.4.3 der als *AGO* bezeichnete Algorithmus der genetischen Operatoren dargestellt. Abschließend werden in Abschnitt 4.4.4 die auf Varianten des *PDZ*-Verfahrens und weiteren Faktoren basierenden Varianten des genetischen Algorithmus abgebildet.

4.4.1 Kodierung

Für vorliegendes komplexes Entscheidungsproblem wird aus den in Kapitel 4.2 aufgeführten Gründen eine mehrwertige Kodierung zur Abbildung der die zu erzeugenden Ablaufvektoren repräsentierenden Individuen der binären Kodierung vorgezogen. Die genotypische und die phenotypische Ebene sind also äquivalent. Jedes Gen eines Chromosoms bzw. Individuums repräsentiert ein Produktlos. Die in einem Gen zu speichernde Information ist sehr umfangreich und beinhaltet zusammengefaßt:

- § Um welche Produktart es sich handelt.
- § Wieviel Zeit unter Berücksichtigung einzuhaltender Termine für die Fertigung zur Verfügung steht.
- § In welcher Losgröße die Produktart hergestellt wird.
- § Wie der externe Bedarf dieser Produktart zu dem nächstmöglichen Termin ist, und wie aufgrund des aktuellen Lagerbestandes der Nettobedarf hiervon abweicht.
- § Welche Lagerungs- und Loswechselkosten aus der Positionierung und der Dimensionierung des betrachteten Produktloses auf diesem locus resultieren.

Genetische Algorithmen können nicht nur mit einheitlich kodierten Strings einer bestimmten Länge arbeiten.⁹⁴ So kann gegebenenfalls erst durch das Kreuzen unterschiedlich kodierter Chromosomen eine Anpassung an die betrachtete Problemstellung und somit ein guter Fitness-Wert erreicht werden.⁹⁵ Diese Annahme liegt dem von *Goldberg et al.* entwickelten sogenannten *messy-GA* zugrunde, der mit nur Teillösungen eines betrachteten Problems darstellenden sehr "fitten" Bausteinen (building-blocks) beginnend, die building-blocks auf sinnvolle Weise vorerst nur zusammenfügt und im Verlauf des Algorithmus trennt und wieder zusammenfügt („cut and splice“).⁹⁶ Auch in dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten genetischen Algorithmus kann es aufgrund der unterschiedlichen Auflegungshäufigkeiten zu einer Kreuzung von Chromosomen nicht einheitlicher Länge kommen. Ggf. wird eine künstliche Vereinheitlichung der Chromosomenlängen gemäß der Vorgabe des besten Individuums aus der Menge der beteiligten Eltern vorgenommen.

4.4.2 Erzeugung der Ausgangspopulation anhand eines stochastischen Konstruktionsverfahrens (*PDZ*)

Zur Erzeugung der Ausgangspopulation für den GA wird das Konstruktionsverfahren *PDZ* entwickelt, welches Prioritätsregeln, Dekomposition und Zufallselemente kombiniert. Die Notwendigkeit der Kombination ergibt sich daraus, daß zum einen eine Vielzahl unterschiedlicher zulässiger Lösungen benötigt wird, und zum anderen bei der hier betrachteten sehr komplexen Problemstruktur der Genpool der Ausgangspopulation bereits relativ sinnvolle Lösungen enthalten sollte, da der GA ansonsten zuviel unnötigen Lösungsraum durchforsten müßte.⁹⁷ Die Anwendung nur von Prioritätsregeln würde nicht genug unterschiedliche Lösungen – bei gleicher Reihenfolge der Prioritätsregeln und ohne Zufallselement für eine gegebene Probleminstanz sogar nur genau eine Lösung – und die Anwendung nur von Zufallsfunktionen zu wenige bereits relativ gute Lösungen erzeugen. Mit der Kombination soll erreicht werden, daß der in der Ausgangspopulation widergespiegelte Genpool einerseits Individuen mit relativ guter Fitness enthält und andererseits relativ heterogen ist.

Zunächst wird das Grundkonzept des *PDZ*-Verfahrens erläutert. Daraufhin werden verschiedene Varianten des Verfahrens, die verwendeten Symbole und dann die einzelnen Schritte ausführlich beschrieben. Abschließend wird das *PDZ*-Verfahren als Pseudocode dargestellt.

⁹⁴ Vgl. hierzu Bäck (1996), S. 109.

⁹⁵ Vgl. hierzu die bei *Mitchell* angegebene Literatur, Mitchell (1996), S. 159.

⁹⁶ Vgl. z. B. Goldberg et al. (1993), S. 57 f.

⁹⁷ Vgl. Ronald (1995), S. 372. Auch *Chen/Vempati/Aljaber* betonen, daß die Ausgangspopulation bereits gute Lösungen umfassen sollte, vgl. *Chen/Vempati/Aljaber* (1995), S. 391. *Braun* erzeugt einen bereits relativ guten Genpool in der Ausgangspopulation zur Lösung relativ hoch dimensionierter TSP, vgl. *Braun* (1991), S. 131. Ebenfalls gute Erfahrungen mit der Anwendung einer Verbesserungsheuristik auf die Ausgangspopulation (und dann jeweils auf die erzeugten Nachkommen), bevor die genetischen Operatoren mit der Population arbeiten, haben *Freisleben/Merz* gemacht, vgl. *Freisleben/Merz* (1996a). Gegenteilig verfahren *Hwang/Sun*, die sich bezüglich ihrer zufällig erzeugten Ausgangspopulation auf die Erfahrungen von *Liepins et al.* – *Hwang/Sun* geben keine genauere Bezeichnung ihrer Quelle an – berufen, nach denen es sich nicht lohnt, die Ausgangspopulation mit einem an die Problemstruktur angepaßten Verfahren zu erzeugen, da hieraus keine großen Vorteile gewonnen werden können, vgl. *Hwang/Sun* (1998), S. 2444.

4.4.2.1 Grundkonzept des PDZ

Ablaufvektoren und Abschnitte

Die Ausgangspopulation wird aus R verschiedenen mit dem PDZ zu erzeugenden Ablaufvektoren der Produktlose gebildet, wobei jeder erzeugte Ablaufvektor ein Individuum repräsentiert. Die Belegung des Ablaufvektors mit den Produktlosen erfolgt abschnittsweise. Hierzu wird zunächst vor jedem erneuten Durchlauf der Verfahrensschritte, d. h. bei jeder *Aktualisierung*, der relativ zu dem aktuellen Zeitpunkt *nächstmögliche Termin* über alle Aufträge ermittelt, wobei der aktuelle Zeitpunkt jeweils den Zeitpunkt relativ zum Fertigungsbeginn widerspiegelt. Diejenigen Produktarten, die zu dem betrachteten Termin einen *positiven Nettobedarf* (externer Bedarf abzüglich Lagerbestand) haben, werden gemeinsam in einem *Abschnitt* geplant. Hat relativ zu dem aktuellen Zeitpunkt keine Produktart einen positiven Nettobedarf, wird kein Abschnitt gebildet. Da vor Fertigungsbeginn des Produktionsprogramms die Lagerbestände sämtlicher Produktarten Null betragen, muß bei der ersten Aktualisierung gefertigt und somit ein Abschnitt gebildet werden. Wenn ein Abschnitt gebildet wird, wird dem Abschnittsindex immer der Wert des Aktualisierungsindex zugeordnet. Dies ist für die Anwendung der genetischen Operatoren auf die mit dem PDZ zu erzeugenden Ausgangslösungen erforderlich. Sowohl die Anzahl der Abschnitte, als auch deren Längen sind nicht ex ante bekannt, wobei die Anzahl der Abschnitte nach oben durch die Anzahl der unterscheidbaren Termine über alle Produktarten und somit der Anzahl der Aktualisierungen begrenzt ist. Die Belegung der Abschnitte erfolgt sukzessiv. Hierbei werden die Produktlose (zunächst) schnellstmöglich relativ zu dem aktuellen Zeitpunkt eingeplant.

Reihenfolgebestimmung in Abschnittsgruppen und Teilablauffolgen

Die in einem Abschnitt einzuplanenden Produktarten werden jeweils in maximal drei Produktarten umfassende *Gruppen zufällig* (Gleichverteilung) eingeteilt. Für jede Gruppe werden alle möglichen *Teilablauffolgen* (Tupel) aus den Produktarten der betrachteten Gruppe enumeriert, und hiervon diejenige Teilablauffolge für die betrachtete Gruppe eingeplant, welche hinsichtlich der *Reihenfolgeplanung* auf Basis einer zu wählenden *Prioritätsregel ZEITKOST, KOSTZEIT* oder *ZUFALL* (siehe hierzu den folgenden Abschnitt 4.4.2.2 Verfahrensvarianten des PDZ) die beste Teilablauffolge darstellt. Ist die Einplanung einer Teilablauffolge für eine Gruppe abgeschlossen, erfolgt die Einplanung der Teilablauffolge für die nächste Gruppe, bis alle Gruppen in dem betrachteten Abschnitt eingeplant sind.

Losgrößenbestimmung

Für die in einem Abschnitt eingeplanten Produktarten werden die *Losgrößen* anhand von einer zu wählenden *Prioritätsregel* bestimmt. Die Losgrößenbestimmung kann alternativ in fünf verschiedenen Modi A, B, AB, C oder D erfolgen (siehe auch hierzu den folgenden Abschnitt 4.4.2.2 Verfahrensvarianten des PDZ). Vor der Einplanung eines jeden Produktloses wird geprüft, ob alle in dem betrachteten Abschnitt herzustellenen Produktarten mindestens in der Höhe ihres Nettobedarfs hergestellt werden können. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, wird mit der Erzeugung des betrachteten Ablaufvektors von vorn begonnen. Wird eine vorgegebene Anzahl an Wiederholungen des zu erzeugenden Ablaufvektors aufgrund nicht erfüllter Zulässigkeitsbedingung überschritten, bricht das Verfahren ab. Es muß dann angenommen werden, daß für die gegebene Problem Instanz mit dem PDZ keine zulässige Lösung gefunden werden kann.

Aktualisierung und neuer Abschnitt

Unabhängig davon, ob zu dem betrachteten Termin Produktlose in einem Abschnitt eingeplant werden oder für keine Produktart zu dem betrachteten Termin ein Nettobedarf besteht, und somit kein Abschnitt gebildet wird, müssen die relevanten Größen, wie die *Lagerbestände*, die verbleibenden noch ausstehenden *Gesamtherstellungsmengen*, die *Menge der noch nicht betrachteten Termine* und der aktuelle Zeitpunkt *aktualisiert* werden, wobei der aktuelle Zeitpunkt unverändert bleibt, wenn zu dem betrachteten Termin nicht gefertigt wurde. Relativ zu dem jeweils neuen aktuellen Zeitpunkt wird aus der Menge der noch nicht betrachteten Termine wiederum der nächst mögliche Termin über alle Produktarten bestimmt, und der nächste Abschnitt aus denjenigen Produktarten gebildet, welche zu dem betrachteten Termin einen positiven Nettobedarf haben. Das Verfahren wiederholt sich so Termin für Termin.

Backtracking

Wenn alle Termine betrachtet wurden, und alle Produktlose inklusive der fiktiven Produktart 0 zur Abbildung des neutralen Maschinenzustands nach Bearbeitungsende eingeplant sind, wird – sofern freie Kapazitäten auftreten – ein Operator auf den Ablaufvektor angewandt, der Time-Opt-Operator (TOO), welcher den *Fertigungsbeginn* eines jeden Produktloses auf den jeweils *spätestmöglichen Zeitpunkt* verschiebt. Durch die Anwendung des TOO werden freie Kapazitäten nach vorn verschoben und somit die Lagerungskosten reduziert.

Bewertung der Lösungen

Sind alle Ablaufvektoren bzw. Individuen in der Ausgangspopulation erzeugt, wird die Fitness der Individuen ermittelt. Die *Fitness* eines erzeugten Individuums entspricht der *Güte des Zielfunktionswertes* des zugehörigen Ablaufvektors und wird als Abweichung des eigenen Zielfunktionswertes von dem schlechtesten Zielfunktionswert aller Individuen in der Population berechnet. Diejenigen Individuen mit der besten Fitness stellen die Menge der mit dem PDZ besten gefundenen Lösungen dar.

Abbildung 4.1 zeigt den zuvor verbal beschriebenen Zusammenhang zwischen den Terminen der Aufträge, den Aktualisierungen und Abschnitten, sowie den jeweils bei Aktualisierung betrachteten Zeitraum. Es werden drei Aktualisierungen skizziert, wobei bei der ersten und bei der dritten Aktualisierung ein Fertigungsbedarf besteht und somit jeweils ein Abschnitt gebildet wird, hingegen bei der zweiten Aktualisierung kein Fertigungsbedarf besteht, und somit kein Abschnitt gebildet werden muß. Zum besseren Verständnis der Abbildung werden Symbole eingeführt, deren ausführliche Erläuterung im Rahmen des Abschnitts 4.4.2.3 erfolgt.

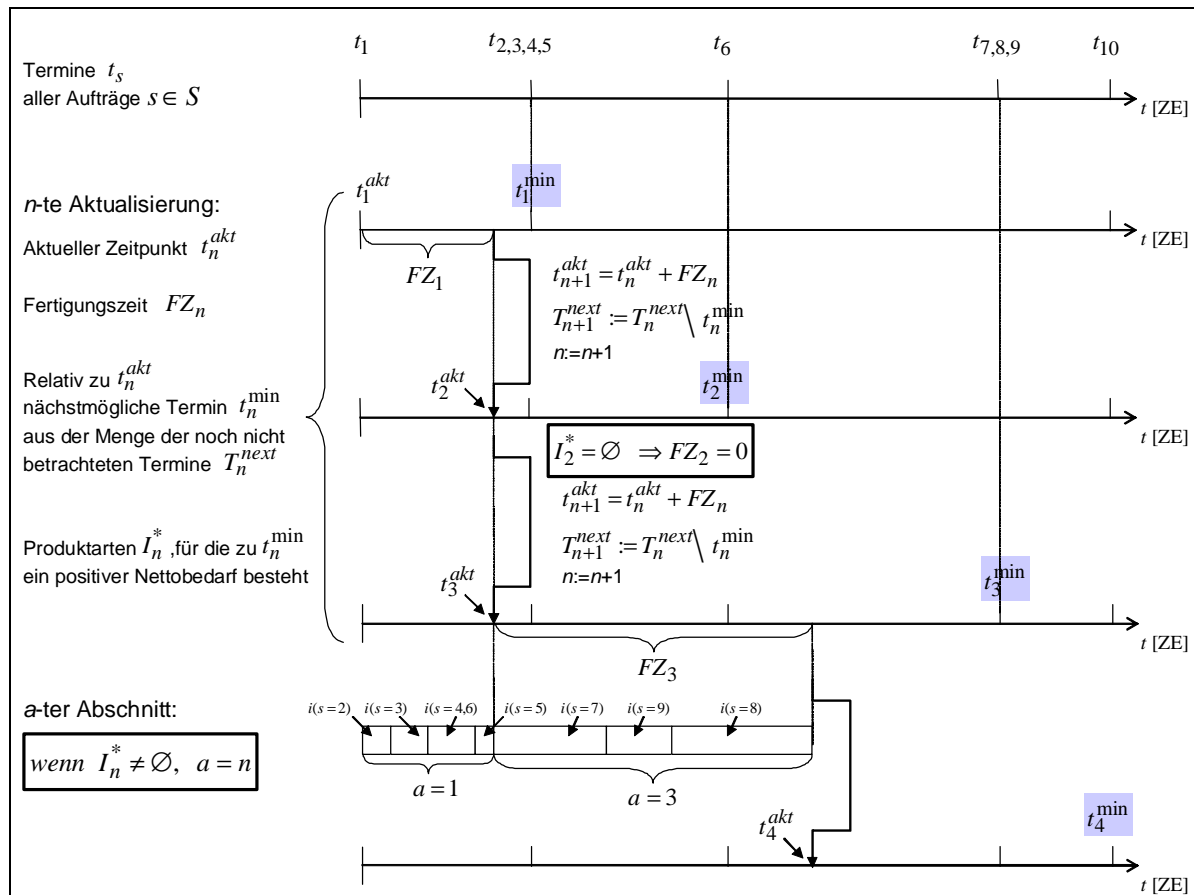


Abbildung 4.1: Aktualisierung der Zeitpunkte / Abschnitte auf dem Ablaufvektor

4.4.2.2 Verfahrensvarianten des PDZ

Bezüglich der Reihenfolgeplanung wird das Verfahren danach differenziert, ob alternativ die Minimierung der Loswechselzeiten, *ZEITKOST*, oder die Minimierung der Loswechselkosten, *KOSTZEIT*, eine höhere Priorität erhält, oder ob die Reihenfolgebestimmung innerhalb der Teilablauffolge zufällig bestimmt wird, *ZUFALL*.

Die fünf Modi zur Losgrößenplanung werden als A, B, AB, C und D bezeichnet. Die Modi A, C und D entsprechen dem allgemeinen Fall des VLSP. Anders als in der formalen Beschreibung des Problems in Abschnitt 3.2.2 wird die Losgröße im *PDZ* jeweils aus der Menge der noch herzustellenden Produkteinheiten der betrachteten Produktart bestimmt und in einem Fertigungsauftrag zusammengefaßt.⁹⁸ Ein Fertigungsauftrag belegt jeweils eine Position auf dem Ablaufvektor. Die Modi B und AB entsprechen dem Spezialfall des VLSP, d. h., daß die Losgrößen durch Gruppierung der externen Bedarfe bestimmt werden. Wiederum abweichend von der Modellierung des Problems in Abschnitt 3.1.2 werden in dem *PDZ* die zu einem Los zu gruppierenden Aufträge direkt in einem Fertigungsauftrag zusammengefaßt und belegen eine Position auf dem Ablaufvektor.

Die Modi unterscheiden sich wie folgt: beim Modus A wird die Losgrößenentscheidung auf Basis der durch die Losgrößenentscheidung verursachten Lagerungskosten getroffen, während beim Modus B die Losgrößenentscheidung durch Gruppierung von bis zu maximal drei Aufträgen der betrachteten Produktart zu einem Fertigungslos erfolgt. Die Gruppierungsent-

⁹⁸ In der formalen Modellierung des Problems (Kapitel 3) erfolgt die Losgrößenbestimmung indirekt, indem die Belegung unmittelbar aufeinanderfolgender Vektorpositionen mit derselben Produktart wie ein zusammengelegtes Los behandelt wird.

scheidung wird zum einen per Zufallsgenerator – bei Auswahl mit gleicher Wahrscheinlichkeit für alle drei Optionen – und zum anderen durch die zu beachtenden Kapazitätsrestriktionen getroffen. Der Modus **AB** kombiniert die Modi **A** und **B**, indem die Fertigungslose ebenfalls durch Gruppierung von bis zu maximal drei Aufträgen der betrachteten Produktart erfolgt, die Gruppierungsentscheidung jedoch nicht zufällig, sondern unter Berücksichtigung der dadurch verursachten Lagerungskosten erfolgt. Bei den Modi **C** und **D** wird die Losgrößenentscheidung aus jeweils zu bestimmenden Intervallen mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt, ohne Aufträge gezielt zu gruppieren oder Lagerungskosten zu berücksichtigen.

Das *PDZ* wird je nach Prioritätsregel zur Reihenfolgebestimmung und nach Losgrößenbestimmungsmodus indiziert. Durch Kombination ergeben sich die folgenden Varianten:

Nr.	Prioritätsregel zur Reihenfolgebestimmung	Losgrößenmodus	Variante
1	<i>ZEITKOST</i>	A	PDZ_A^Z
2	<i>ZEITKOST</i>	B	PDZ_B^Z
3	<i>ZEITKOST</i>	AB	PDZ_{AB}^Z
4	<i>ZEITKOST</i>	C	PDZ_C^Z
5	<i>KOSTZEIT</i>	A	PDZ_A^K
6	<i>KOSTZEIT</i>	B	PDZ_B^K
7	<i>KOSTZEIT</i>	AB	PDZ_{AB}^K
8	<i>KOSTZEIT</i>	C	PDZ_C^K
9	<i>ZUFALL</i>	A	PDZ_A^{Zuf}
10	<i>ZUFALL</i>	B	PDZ_B^{Zuf}
11	<i>ZUFALL</i>	AB	PDZ_{AB}^{Zuf}
12	<i>ZUFALL</i>	C	PDZ_C^{Zuf}
13	<i>ZUFALL</i>	D	PDZ_D^{Zuf}

Tabelle 4.1: Varianten des *PDZ*-Verfahrens

Der Losgrößenmodus **D** wird nur mit der zufälligen Reihenfolgebestimmung kombiniert. Diese Kombination PDZ_D^{Zuf} beinhaltet die meisten Zufallskomponenten und wird im folgenden auch als *Zufallsverfahren* bezeichnet. Die mit dem PDZ_D^{Zuf} erzeugten Lösungen dienen im Rahmen der Bewertung der Verfahren als Vergleichsbasis für die mit den anderen *PDZ*-Varianten erzeugten Lösungen.

4.4.2.3 Beschreibung der verwendeten Symbole

Indizes

- a Index der Abschnitte des Ablaufvektors E^r , $a \in A_r$, $r \in R$
- b Index der Positionen in den Teilablauffolgen $TA F_a^{gf}$, $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$,
 $g = 1(1) G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- e Index der Positionen auf den Vektoren E^r , N^r , F^r , FB^r , $F^{r,neu}$,
 $e = 1(1) E^r$, $r \in R$
- $e_{r,a}^A$ Position des a -ten Abschnittsanfangs auf dem r -ten Ablaufvektor, $a \in A_r$,
 $r \in R$
- $e_{r,a}^\Omega$ Position e des a -ten Abschnittsendes auf dem r -ten Ablaufvektor, $a \in A_r$,
 $r \in R$
- f Index der Teilablauffolgen in der Gruppe g des a -ten Abschnitts,
 $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$, $g = 1(1) G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- g Index der aus $I_{r,a}$ zu bildenden Gruppen, $g = 1(1) G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- n Index der Aktualisierungen, $n = 1(1)t$
- r Index der Individuen und Vektoren, $r \in R$

Parameter

- R Anzahl der zu erzeugenden Individuen in der Ausgangspopulation, [-]
- V_MAX Anzahl der Wiederholungen zur Erzeugung eines zulässigen Ablaufvektors
(Vielfaches von R), [-]
- x_i^H Gesamtherstellmenge der Produktart i , $i \in I$, [ME]
- t Anzahl der unterscheidbaren Termine über alle Produktarten, $t = \left| T_1^{next} \right|$, [-]

Variablen/Vektoren

- c_a^{gf} Summe der Loswechselkosten der Teilablauffolge f in der Gruppe g des a -
ten Abschnitts, $f = 1(1) \left| I_a^g \right|!$, $g = 1(1) G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE]
- $c_a^{g \min}$ Minimum der Summe der Loswechselkosten über alle Teilablauffolgen in
der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $g = 1(1) G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE]
- $C_{B,r}$ Summe der Lagerungskosten über alle nach dem Erreichen des jeweils
nächstmöglichen Termins auf Lager verbleibenden Bestände, $r \in R$, [GE]
- $C_{L,r}$ Summe der Lagerungskosten über alle Produktlose bis zum jeweils nächst
möglichen Termin, $r \in R$, [GE]
- C_{E^r} Loswechselkosten des Ablaufvektors E^r , $r \in R$, [GE]
- E^r r -ter Ablaufvektor der Produktarten, $E^r \in I^{E^r}$, wobei E_e^r die an Position e
eing geplante Produktart beschreibt, $e = 1(1) E^r$, $r \in R$

- E^r Länge des r -ten Ablaufvektors, $r \in R$, [-]
- $fit(P^r)$ Fitness des r -ten Individuums, $r \in R$, [-]
- F^r r -ter Vektor der Fertigstellungszeitpunkte *vor* Anwendung des Operators TOO, $F^r \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei F_e^r den Fertigstellungszeitpunkt der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- $F^{r,neu}$ r -ter Vektor der Fertigstellungszeitpunkte *nach* Anwendung des Operators TOO, $F^{r,neu} \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei $F_e^{r,neu}$ den Fertigstellungszeitpunkt der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- FB^r r -ter Vektor der Fertigungsbeginnzeitpunkte, $FB^r \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei FB_e^r den Fertigungsbeginnzeitpunkt der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- G_a Anzahl der aus $I_{r,a}$ zu bildenden Gruppen, $a \in A_r$, $r \in R$, [-]
- k_a^{\max} größter vorkommender Stücklagerkostensatz der Produktarten $i \in I_{r,a}$ des a -ten Abschnitts, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE/(ME*ZE)]
- k_a^{\min} kleinster vorkommender Stücklagerkostensatz der Produktarten $i \in I_{r,a}$ des a -ten Abschnitts, $a \in A_r$, $r \in R$, [GE/(ME*ZE)]
- k_i^{rel} Relation der Differenz zwischen k_a^{\max} und k_i , zu der Differenz zwischen k_a^{\max} und k_a^{\min} in dem a -ten Abschnitt, $a \in A_r$, $r \in R$, [-]
- L_{ni} Lagerbestand der Produktart i nach der n -ten Aktualisierung, $i \in I$, $n = 1(1)t$, [ME]
- N^r r -ter Vektor der Losgrößen, $N^r \in \mathbb{N}^{E^r}$, wobei N_e^r die Losgröße der an Position e des Ablaufvektors E^r eingeplanten Produktart E_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- O_i hinsichtlich der zeitlichen Kapazität obere Schranke des Losgrößenintervalls der Produktart i in dem Abschnitt a , $i \in I_{r,a}$, $a \in A_r$, $r \in R$, [ME]
- O_i^{rel} anhand der Position der betrachteten Produktart i in dem Abschnitt a relativierte obere Grenze des Losgrößenintervalls, $i \in I_{r,a}$, $a \in A_r$, $r \in R$, [ME]
- P^r r -tes Individuum, $P^r \in (I \times \mathbb{N})^{E^r}$, wobei P_{e1}^r die an Position e des Ablaufvektors der Produktarten positionierte Produktart E_e^r , und P_{e2}^r die zugehörige Losgröße N_e^r beschreibt, $e=1(1)E^r$, $r \in R$
- t Zeitpunkt, [ZE]
- t_a^{gf} Summe der Loswechselzeiten der Teilablauffolge f in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $f = 1(1)I_a^g$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [ZE]

- $t_a^{g \min}$ Minimum der Summe der Loswechselzeiten über alle Teilablauffolgen in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$, [ZE]
- t_e^{next} relativ zu dem Fertigstellungszeitpunkt F_e^r der auf e positionierten Produktart E_e^r nächstmögliche Termin der Produktart E_e^r , $e=1(1)E^r$, $r \in R$, [ZE]
- $t_{E^{r,a}}$ Summe der Loswechselzeiten des a -ten Abschnitts auf dem r -ten Vektor der Produktarten, $a \in A_r$, $r \in R$, [ZE]
- t_{i+} relativ zu dem Zeitpunkt t nächstmögliche Termin t_s der Produktart i , $i=i(s)$, $i(s) \in I$, $s \in S$, [ZE]
- t_{i++} relativ zu dem Termin t_{i+} nächstmögliche Termin t_s der Produktart i , $i=i(s)$, $i(s) \in I$, $s \in S$, [ZE]
- t_n^{akt} aktueller Zeitpunkt nach der n -ten Aktualisierung, $n = 1(1)t$, [ZE]
- t_n^{\min} relativ zu t_n^{akt} nächst mögliche Termin über alle Aufträge aus der Menge der noch nicht betrachteten Termine, $n = 1(1)t$, [ZE]
- $TAF^{gf,a}$ Teilablauffolge f in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $TAF^{gf,a} \in I^{|I_a^g|}$, wobei $TAF_b^{gf,a}$ die an b positionierte Produktart beschreibt, $f = 1(1)I_a^g$!, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $TAF^{g^*,a}$ eingeplante Teilablauffolge in der Gruppe g des a -ten Abschnitts, $TAF^{g^*,a} \in I^{|I_a^g|}$, wobei $TAF_b^{g^*,a}$ die an b positionierte Produktart beschreibt, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- u Variable, welche die Anzahl der erzeugten unzulässigen Ablaufvektoren zählt, [-]
- x_{ni} Nettobedarf der Produktart i nach der n -ten Aktualisierung, $i \in I$, $n = 1(1)t$, [ME]
- x_{ni}^H noch ausstehende Gesamtherstellmenge der Produktart i nach der n -ten Aktualisierung, $i \in I$, $n = 1(1)t$, [ME]
- x_{i+}^{ext} externer Bedarf der Produktart i zu dem Termin t_{i+} , $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_{i+}$, $i \in I$, [ME]
- x_{i++}^{ext} externer Bedarf der Produktart i zu dem Termin t_{i++} , $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_{i++}$, $i \in I$, [ME]
- $Z(P^r)$ Zielfunktionswert des r -ten Individuums, $r \in R$ [GE]
- Z^{\max} Maximum der Zielfunktionswerte der jeweils betrachteten Population, [GE]

Mengen

- A_r Menge der Abschnittsindizes des r -ten Ablaufvektors, $A_r \subset \mathbb{N}$, $r \in R$
- F_a^g Menge der Teilablauffolgen in der g -ten Gruppe des a -ten Abschnitts, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$

- $F_a^{g \min, K}$ Menge derjenigen Teilablauffolgen $TAF^{gf,a} \in F_a^g$, für die gilt:
 $c_a^{gf} = c_a^{g \min}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $F_a^{g \min, KZ}$ Menge derjenigen Teilablauffolgen mit der geringsten Summe der
 Loswechselzeiten von allen $TAF^{gf,a} \in F_a^{g \min, K}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$,
 $r \in R$
- $F_a^{g \min, Z}$ Menge derjenigen Teilablauffolgen $TAF^{gf,a} \in F_a^g$, für die gilt:
 $t_a^{gf} = t_a^{g \min}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- $F_a^{g \min, ZK}$ Menge derjenigen Teilablauffolgen mit der geringsten Summe der
 Loswechselkosten von allen $TAF^{gf,a} \in F_a^{g \min, Z}$, $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$,
 $r \in R$
- I_a^{copy} Kopie der Menge $I_{r,a}$, $a \in A_r$, $r \in R$
- I_a^g Menge derjenigen Produktarten $i \in I_{r,a}$, welche der Gruppe g angehören,
 $g=1(1)G_a$, $a \in A_r$, $r \in R$
- I_n^{term} Menge derjenigen Produktarten $i \in I$, für die zu t_n^{\min} ein externer Bedarf
 besteht, $n = 1(1)t$
- I_n^* Menge derjenigen Produktarten $i \in I_n^{term}$, für die zu t_n^{\min} ein positiver
 Nettobedarf besteht, $n = 1(1)t$
- $I_{r,a}$ Menge der Produktarten $i \in I$ des a -ten Abschnitts des r -ten Ablaufvektors,
 $a \in A_r$, $r \in R$
- LG Menge der Auswahloptionen zur Losgruppierung bei Anwendung des Mo-
 dus B , $LG = \{1,2,3\}$
- P Menge der Individuen, $P = \{P^1, P^2, \dots, P^R\}$
- P^* Menge der hinsichtlich der Fitness besten gefundenen Individuen, $P^* \subset P$
- R Menge der Individuenindizes, $R \subset \mathbb{N}$
- T_n^{next} Menge der unterscheidbaren Termine über alle Aufträge nach der n -ten
 Aktualisierung, $n = 1(1)t$

Hilfsfunktionen

- $next(t, i)$ gibt den relativ zu t nächstmöglichen Termin t_s der Produktart i zurück,
 $i=i(s)$, $i(s) \in I$, $s \in S$
- $random(X)$ gibt ein mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewähltes Element aus der
 Menge X zurück
- $random(U; O)$ gibt einen mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählten Wert aus dem
 Intervall $[U; O]$ zurück
- $rand3(X)$ gibt drei mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählte Elemente aus
 der Menge X zurück

4.4.2.4 Erläuterung der einzelnen Schritte des PDZ

Das PDZ wird durch die folgenden 28 Schritte beschrieben und in die Hauptteile Initialisierungen (Schritte 1–4), Mengenbestimmung und Dekomposition (Schritte 5–6), Reihenfolgebestimmung anhand von Prioritätsregeln und/oder Zufall (Schritte 7–11), Losgrößenbestimmung (Schritte 12–20), Aktualisierung und Backtracking (Schritte 21–25) sowie Fitnessberechnung (Schritte 26–28) gegliedert.

Initialisierungen

- 1) Initialisierung der Menge der Individuen, $P = \emptyset$, und der Individuenindizes, $R = \emptyset$. Festlegung der Verfahrensvariante durch Bestimmung der Prioritätsregel zur Reihenfolgebestimmung (PR) von den möglichen Regeln *ZEITKOST*, *KOSTZEIT* oder *ZUFALL* und des Losgrößenmodus (LM) von den möglichen Modi A, B, AB, C oder D. Festlegung der für den Losgrößenmodus AB benötigten Parameter Niveau1 und Niveau2. Initialisierung der die erzeugten unzulässigen Ablaufvektoren zählenden Variablen u , $u=0$, und des Individuenindizes r , $r=1$.
- 2) Initialisierung der Menge der Abschnitte, $A_r = \emptyset$. Betrachtung der ersten Position des Ablaufvektors, $e = 1$, und Belegung der Position e mit der fiktiven Produktart 0, $E_1^r = 0$. Initialisierung des Aktualisierungszählers, $n=1$, sowie des aktuellen Zeitpunkts $t_1^{\text{akt}} = 0$. Initialisierung der ausstehenden Gesamtherstellmengen x_{ni}^H und der Lagerbestände L_{ni} aller Produktarten i , $x_{1i}^H = x_i^H$, $L_{1i} = 0$, $i \in I$.
- 3) Bestimmung des relativ zu t_1^{akt} nächstmöglichen Termins aus der Menge der unterscheidbaren Termine T_1^{next} , $t_1^{\text{min}} = \min \{t_s | t_s \in T_1^{\text{next}}\}$, mit $T_1^{\text{next}} = \{t_s | s \in S\}$. Bestimmung der Menge derjenigen Produktarten, die zu t_1^{min} einen externen Bedarf haben, $I_1^{\text{term}} = \{i | i = i(s), s \in S, \text{ mit } t_s = t_1^{\text{min}}\}$.
- 4) Initialisierung der Nettobedarfe der der Menge I_1^{term} angehörenden Produktarten mit den externen Bedarfen zu dem Termin t_s , sowie der nicht der Menge I_1^{term} angehörenden Produktarten mit 0, $x_{1i}^{\text{ext}} = x_s^{\text{ext}}$, $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_1^{\text{min}}$, $i \in I_1^{\text{term}}$, und $x_{1i} = 0$, $i \in I \setminus I_1^{\text{term}}$.

Mengenbestimmung und Dekomposition (mit Zufall)

- 5) Bestimmung derjenigen Produktarten $i \in I_n^{\text{term}}$, welche zu t_n^{min} nicht nur einen positiven externen, sondern auch einen positiven Nettobedarf haben, $I_n^* = \{i | x_{ni} > 0, i \in I_n^{\text{term}}\}$. Der Nettobedarf kann von dem für den entsprechenden Termin vorgegebenen externen Bedarf abweichen, wenn Lagerbestände vorhanden sind. (Zum Initialisierungszeitpunkt betragen die Lagerbestände für alle Produktarten null, d. h., $I_1^* = I_1^{\text{term}}$.)

- 6) Ist die Menge I_n^* leer, $I_n^* = \emptyset$, besteht für keine der Produktarten $i \in I_n^{\text{term}}$ ein Fertigungsbedarf. Das Verfahren geht über zu der Aktualisierung, d. h. zu Schritt 21). Ist $I_n^* \neq \emptyset$, setze $a = n$, $A_r := A_r \cup \{a\}$, und $I_{r,a} = I_n^*$. Umfaßt die Menge $I_{r,a}$ genau ein Element, $|I_{r,a}| = 1$, besteht in der betrachteten Periode also nur für eine Produktart ein Fertigungsbedarf, wird der Ablaufvektor eine Position weitergezählt, $e := e + 1$, und diese eine in $I_{r,a}$ enthaltenen Produktart dem Ablaufvektor an der Position e zugeordnet. Das Verfahren geht zu der Losgrößenbestimmung für diese eine Produktart über, d. h. zu Schritt 12).

Umfaßt die Menge $I_{r,a}$ mehr als ein Element, $|I_{r,a}| > 1$, werden aus $I_{r,a}$ soweit möglich drei Elemente umfassende Gruppen, $I_a^g, g=1(1)G_a$, gebildet (Dekomposition). Die der Gruppe g zuzuteilenden Produktarten werden jeweils zufällig mit gleicher Wahrscheinlichkeit ausgewählt. Ist $|I_{r,a}|$ nicht ganzzahlig durch drei teilbar, wird aus den restlichen Produktarten eine Gruppe mit zwei Elementen bzw. mit einem Element gebildet. Die Anzahl G_a der aus $I_{r,a}$ zu bildenden Gruppen beträgt demnach $\left\lceil \frac{|I_{r,a}|}{3} \right\rceil$.

Reihenfolgebestimmung anhand von Prioritätsregeln und/oder Zufall

- 7) Betrachtung der ersten Gruppe, $g=1$.
- 8) Aus den der Gruppe g angehörenden Produktarten $i \in I_a^g$ werden durch Permutation der Elemente der Menge I_a^g maximal sechs (3!) mögliche Teilablauffolgen $TAF^{gf,a}$ gebildet und in der Menge F_a^g vereint, $F_a^g = \{TAF^{gf,a} \mid f = 1(1)|I_a^g|!\}$. Nun ist zu ermitteln, welche der $TAF^{gf,a}$ für die Gruppe g einzuplanen ist, d. h. $TAF^{g^*,a}$.

Umfaßt die Menge I_a^g nur eine Produktart, $|I_a^g| = 1$, kann es auch nur eine Teilablauffolge $f=1$ für die betrachtete Gruppe geben. Diese Teilablauffolge umfaßt dann nur diese eine Produktart. Das Durchlaufen der Prioritätsregeln zur Entscheidung, welche Teilablauffolge für die Gruppe g eingeplant werden muß, ist in diesem Fall nicht erforderlich, $TAF^{g^*,a} = TAF^{g1,a}$.

Andernfalls, $|I_a^g| > 1$, wird bei Anwendung der Prioritätsregel:

- **ZEITKOST:**
die Menge derjenigen Teilablauffolgen mit jeweils minimaler Summe der Loswechselzeiten bestimmt, $F_a^{g \text{ min,Z}} = \arg \min \{TAF^{gf,a} \in F_a^g\}$,

$$\text{mit, } t_a^{gf} = \sum_{b=1}^{|I_a^g|-1} t_{TAF_b^{gf,a}} TAF_{b+1}^{gf,a}, TAF^{gf,a} \in F_a^g.$$

Ist diese Menge einelementig, $|F_a^{g \min, Z}| = 1$, wird diese eine in $F_a^{g \min, Z}$ enthaltene Teilablauffolge für die betrachtete Gruppe als $TAF^{g^*, a}$ eingeplant. Das Verfahren geht über zu Schritt 10). Ansonsten, $|F_a^{g \min, Z}| > 1$, geht das Verfahren weiter zu Schritt 9).

- **KOSTZEIT:**

die Menge derjenigen Teilablauffolgen mit jeweils minimaler Summe der Loswechselkosten bestimmt, $F_a^{g \min, K} = \arg \min \left\{ c_a^{gf} \mid TAF^{gf, a} \in F_a^g \right\}$,

$$\text{mit, } c_a^{gf} = \sum_{b=1}^{|I_a^g|-1} c_{TAF_b^{gf, a} TAF_{b+1}^{gf, a}}, TAF^{gf, a} \in F_a^g.$$

Ist diese Menge einelementig, $|F_a^{g \min, K}| = 1$, wird diese eine in $F_a^{g \min, K}$ enthaltene Teilablauffolge für die betrachtete Gruppe als $TAF^{g^*, a}$ eingeplant. Das Verfahren geht über zu Schritt 10). Ansonsten, $|F_a^{g \min, K}| > 1$, geht das Verfahren weiter zu Schritt 9).

- **ZUFALL:**

aus der Menge der Teilablauffolgen F_a^g eine Teilablauffolge mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt und eingeplant, $TAF^{g^*, a} = \text{random}(F_a^g)$. Das Verfahren geht über zu Schritt 10).

9) Bei Anwendung der Prioritätsregel

- **ZEITKOST:**

wird aus der Menge der Teilablauffolgen mit minimaler Summe der Loswechselzeiten $F_a^{g \min, Z}$ die Menge derjenigen Teilablauffolgen mit jeweils minimaler Summe der Loswechselkosten bestimmt, $F_a^{g \min, ZK} = \arg \min \left\{ c_a^{gf} \mid TAF^{gf, a} \in F_a^{g \min, Z} \right\}$.

Trifft dies auf genau eine Teilablauffolge zu, $|F_a^{g \min, ZK}| = 1$, wird diese eine in $F_a^{g \min, ZK}$ enthaltene Teilablauffolge für die betrachtete Gruppe als $TAF^{g^*, a}$ eingeplant. Ist die Menge $F_a^{g \min, ZK}$ mehrelementig, $|F_a^{g \min, ZK}| > 1$, wird hieraus eine Teilablauffolge mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt und eingeplant, $TAF^{g^*, a} = \text{random}(F_a^{g \min, ZK})$. (Diese Differenzierung wird hier und in vergleichbaren Entscheidungssituationen im Algorithmus nur zu Erläuterungszwecken getroffen. Die Auswahl erfolgt in beiden Fällen über die random-Funktion, da in dem Fall, daß $F_a^{g \min, ZK}$ einelementig ist, die random-Funktion nur genau diese eine Teilablauffolge auswählen kann.)

- **KOSTZEIT:**

wird aus der Menge der Teilablauffolgen mit minimaler Summe der Loswechselkosten $F_a^{g \min, K}$ die Menge derjenigen Teilablauffolgen mit jeweils minimaler Summe der

Loswechselzeiten bestimmt, $F_a^{g \min, KZ} = \arg \min \left\{ t_a^{gf} \mid TAF^{gf, a} \in F_a^{g \min, K} \right\}$. Trifft dies auf genau eine Teilablauffolge zu $\left| F_a^{g \min, KZ} \right| = 1$, wird diese eine in $F_a^{g \min, KZ}$ enthaltene Teilablauffolge für die betrachtete Gruppe als $TAF^{g^*, a}$ eingeplant. Ist die Menge $F_a^{g \min, KZ}$ mehrelementig, $\left| F_a^{g \min, KZ} \right| > 1$, wird hieraus eine Teilablauffolge mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt und eingeplant, $TAF^{g^*, a} = \text{random} \left(F_a^{g \min, KZ} \right)$.

- 10) Solange nicht die letzte der für diesen Abschnitt einzuplanenden Gruppen betrachtet ist, $g < G_a$, betrachte die nächste Gruppe, $g := g + 1$, und gehe zurück zu Schritt 8), sonst geht das Verfahren weiter zu Schritt 11).
- 11) Belegung des Ablaufvektors E^r mit den Produktarten der Teilablauffolgen $TAF^{g^*, a}$ in aufsteigender Reihenfolge des Gruppenindizes g . Setze $g = 1$.
 - a) Betrachte die erste Position der Teilablauffolge, $b = 1$.
 - b) Inkrementiere die Position des Ablaufvektors, $e := e + 1$ und belege e mit der an Position b in der Teilablauffolge stehenden Produktart, $E_e^r = TAF_b^{g^*, a}$.
 - c) Wenn $b < \left| I_a^g \right|$, betrachte die nächste Position der Teilablauffolge, $b := b + 1$, und gehe zurück zu b). Sonst, $b = \left| I_a^g \right|$, gehe weiter zu d).
 - d) Wenn $g < G_a$, betrachte die nächste Gruppe $g := g + 1$, und gehe zurück zu a). Sonst, $g = G_a$, sind alle Gruppen in dem a -ten Abschnitt betrachtet. Das Verfahren geht weiter zur Losgrößenbestimmung.

Losgrößenbestimmung

- 12) Wenn in Schritt 1) der Modus A oder AB zur Bestimmung der Losgrößen gewählt ist, wird der größte und der kleinste vorkommende Stücklagerkostensatz aus der Menge der Produktarten $i \in I_{r, a}$ bestimmt, $k_a^{\min} = \min \{ k_i \mid i \in I_{r, a} \}$, $k_a^{\max} = \max \{ k_i \mid i \in I_{r, a} \}$.
- 13) Die Losgrößenbestimmung erfolgt positionsweise für die dem a -ten Abschnitt zugeordneten Produktarten $i \in I_{r, a}$. Zunächst wird die aktuelle Position e der relativen Position des Abschnittsendes zugewiesen, $e_{r, a}^{\Omega} = e$. Dann wird die Position des Ablaufvektors zurückgesetzt, $e := e - \left(\left| I_{r, a} \right| - 1 \right)$, und die Position e der relativen Position des Abschnittsanfangs zugewiesen, $e_{r, a}^{\Lambda} = e$.
- 14) Unabhängig von der betrachteten Position, gilt für alle Produktarten $i \in I_{r, a}$, daß für die Ermittlung der für die Bearbeitung der Produkteinheiten in dem betrachteten Abschnitt zur Verfügung stehenden Zeit, von der Differenz zwischen t_n^{\min} und t_n^{akt} die auf die Loswechsel anfallenden Zeiten abgezogen werden müssen. Die Summe der Loswechsel-

zeiten des a -ten Abschnitts berechnet sich gemäß $t_{E^{r,a}} = \sum_{e=e_{r,a}^A}^{e_{r,a}^\Omega} t_{E_{e-1}^r E_e^r}$. Die Berech-

nung berücksichtigt, daß auch die Loswechselzeit von der in dem letzten Abschnitt zuletzt aufgelegten Produktart, bzw. in dem Fall, daß es sich bei dem betrachteten Abschnitt um den ersten Abschnitt handelt, von der fiktiven Anfangsproduktart 0 in die Berechnung einfließen muß. Dies ist erforderlich, da zu jedem Termin mindestens die Bearbeitung der letzten der benötigten Einheiten abgeschlossen sein muß, nicht jedoch die Umrüstung auf die darauf folgende Produktart.

- 15) Berechnung der oberen Mengenschranke zur Fertigung der auf e positionierten Produktart i , mit $i = E_e^r$:

Bei der Dimensionierung der Losgröße muß immer berücksichtigt werden, daß alle Produktarten $i \in I_{r,a}$ mindestens in der Höhe ihres Nettobedarfs gefertigt werden können. Hierzu wird jeweils eine obere Mengenschranke für das Intervall ermittelt, aus welchem die Losgröße für die Produktart i festzulegen ist. Die Berechnung der oberen Mengenschranke basiert auf der zeitlich begrenzten Kapazität. Die Losgröße für die Produktart i darf zum einen höchstens der noch ausstehenden Gesamtherstellmenge x_{ni}^H entsprechen, muß mindestens den eigenen Nettobedarf x_{ni} decken, und muß zum anderen für die Fertigung aller anderen Produktarten soviel Zeit zur Verfügung lassen, daß diese ebenfalls zumindest in Höhe ihres Nettobedarfs gefertigt werden können. Diese die zeitliche Kapazität berücksichtigende obere Mengenschranke wird als $O_{E_e^r}$ bezeichnet. Nur für die letzte in dem betrachteten Abschnitt eingeplante Produktart kann somit ermittelt werden, wieviel Zeit tatsächlich zur Fertigung zur Verfügung steht, da nur für diesen Fall die Losgrößen und somit die Zeiträume bekannt sind, welche sämtliche Produktarten vor der letzten Produktart in dem Abschnitt zur Bearbeitung benötigt haben. Bei der Bestimmung von $O_{E_e^r}$ werden für alle Produktarten $E_{e'}^r$, mit $e < e' \leq e_{r,a}^\Omega$, die benötigten Zeiträume für die Fertigung ihres Nettobedarfs, und für alle Produktarten $E_{e'}^r$, mit $e > e' \geq e_{r,a}^A$, die benötigten Zeiträume für die Fertigung der Losgröße berücksichtigt.

Zunächst wird der maximal für die Fertigung der Produktart E_e^r zur Verfügung stehende Zeitraum ermittelt. Hierbei müssen neben den erläuterten Bearbeitungszeiträumen der anderen Produktarten auch die in Schritt 14) berechneten Loswechselzeiten $t_{E^{r,a}}$ von dem Zeitraum $(t_n^{\min} - t_n^{\text{akt}})$ abgezogen werden.

Aufgrund der Bearbeitung der Produkteinheiten mit dem zeitlichen Abstand eines Auflegeintervalls, wird zur Berechnung von $O_{E_e^r}$ der ermittelte maximale Zeitraum dann durch die Taktzeit $c_{E_e^r}$ dividiert, und die eine Einheit, welche zu dem Zeitpunkt des Bandverlassens der ersten Einheit der Produktart E_e^r bereits gefertigt ist, dazu addiert:

$$O_{E_e^r} = \frac{t_n^{\min} - t_n^{\text{akt}} - t_{E^{r,a}} - \sum_{e'=e_{r,a}^A}^{e-1} c_{E_{e'}^r} \cdot (N_{e'}^r - 1) - \sum_{e'=e+1}^{e_{r,a}^{\Omega}} c_{E_{e'}^r} \cdot (x_{nE_{e'}^r} - 1)}{c_{E_e^r}} + 1.$$

16) Zulässigkeitsprüfung:

Sollte die Kapazität bei einer gegebenen Problem Instanz so knapp sein, daß die Produktarten $i \in I_{r,a}$ aufgrund der Loswechselzeiten und/oder der Inanspruchnahme von Produktivzeit durch die in früheren Abschnitten bereits eingeplanten Produktlose nicht in den geforderten Nettobedarfen x_{ni} gefertigt werden können, tritt dieses Problem bereits bei der Losgrößenbestimmung für die auf der ersten Position des betrachteten Abschnitts eingeplante Produktart auf. Die Obergrenze, welche berücksichtigt, daß alle Produktarten $i \in I_{r,a}$ in ihren jeweiligen Mindestmengen gefertigt werden können müssen, wäre gegebenenfalls kleiner als die geforderte Mindestmenge. Ist dies der Fall, d. h. $O_{E_e^r} < x_{nE_e^r}$, und ist die maximale Anzahl an Versuchen nicht erreicht, $u < V_MAX$, wird die die unzulässigen Versuche zählende Variable u inkrementiert, $u := u + 1$, und mit der Erzeugung der r -ten Lösung von vorn begonnen, d. h. das Verfahren geht zurück zu Schritt 2). Ist nach V_MAX Versuchen keine zulässige Lösung gefunden worden, $u = V_MAX$, bricht das Verfahren ab.

Ist die Zulässigkeitsbedingung erfüllt, $O_{E_e^r} \geq x_{nE_e^r}$, geht das Verfahren in den Fällen der Losgrößenbestimmung gemäß Modus A oder C weiter zu Schritt 17) und in den Fällen der Losgrößenbestimmung gemäß Modus B, AB oder D über zu Schritt 18).

17) Positionsrelativierung der oberen Mengenschranke:

Der zur Verfügung stehende Zeitraum nach Abzug der Bearbeitungs- und Loswechselzeiten sinkt überproportional mit jeder Vektorposition, weil für immer mehr Produktarten die Bearbeitungszeiten für die tatsächlichen Losgrößen und nicht nur für die Nettobedarfe abgezogen werden. Um den Positionsnachteil weiter hinten liegender Produktarten zu kompensieren, werden die oberen Grenzen $O_{E_e^r}$ in Abhängigkeit von der Vektorposition e relativiert. Da die Möglichkeit zur Fertigung der Mindestherstellmenge $x_{nE_e^r}$ gewähr-

leistet bleiben muß, steht zur Relativierung von $O_{E_e^r}$ die Intervalllänge $(O_{E_e^r} - x_{nE_e^r})$ zur Verfügung. Diese Intervalllänge wird jeweils durch die Anzahl der für den Abschnitt noch ausstehenden Produktarten geteilt. Die relativierte obere Grenze $O_{E_e^r}^{rel}$ berechnet

$$\text{sich wie folgt: } O_{E_e^r}^{rel} = x_{nE_e^r} + \left(O_{E_e^r} - x_{nE_e^r} \right) \cdot \frac{1}{e_{r,a}^{\Omega} - e + 1}.$$

Werden z. B. in der betrachteten Periode 12 Produktarten aufgelegt, $|I_{r,a}| = 12$, steht der ersten in dem Abschnitt aufgelegten Produktart $E_{e=e_{r,a}^A}^r$ nur $(1/12)$ des Intervalls

$(O_{E_e^r} - x_{nE_e^r})$, der Produktart $E_{e=e_{r,a}^A+1}^r$ dann $(1/11), \dots$, und $E_{e=e_{r,a}^{\Omega}}^r$ das ganze Intervall $(1/1) (O_{E_e^r} - x_{nE_e^r})$ - jeweils zuzüglich der Mindestmenge - zur Verfügung.

18) Die Losgröße N_e^r wird aus einem jeweils für die betrachtete Produktart zu berechnenden Wertebereich nach dem in Schritt 1) festgelegten Modus bestimmt. Unabhängig von dem gewählten Modus muß immer berücksichtigt werden, daß die Losgröße nicht die noch ausstehende Gesamtherstellmenge $x_{nE_e^r}^H$ übersteigt.

- **Modus A:**

Die Losgröße N_e^r wird in proportionalem Verhältnis zu der Position des eigenen Stücklagerkostensatzes, $k_{E_e^r}$, innerhalb des Intervalls zwischen kleinstem, k_a^{\min} , und größtem, k_a^{\max} , vorkommenden Stücklagerkostensatz über alle Produktarten $i \in I_{r,a}$, aus dem Intervall $\left[x_{nE_e^r}^H ; O_{E_e^r}^{rel} \right]$ bestimmt. Je näher $k_{E_e^r}$ an k_a^{\max} liegt, um so kleiner ist N_e^r . Der die relative Position von $k_{E_e^r}$ in dem Intervall zwischen k_a^{\min} und k_a^{\max}

widerspiegelnde Faktor $k_{E_e^r}^{rel}$ berechnet sich gemäß $k_{E_e^r}^{rel} = \frac{k_a^{\max} - k_{E_e^r}}{k_a^{\max} - k_a^{\min}}$, $k_a^{\max} \neq k_a^{\min}$.

Wegen der Ganzzahligkeitsbedingung wird die Losgröße ganzzahlig abgerundet, d. h.

wenn $k_a^{\max} \neq k_a^{\min}$: $N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, \left\lfloor k_{E_e^r}^{rel} \cdot \left(O_{E_e^r}^{rel} - x_{nE_e^r}^H \right) \right\rfloor + x_{nE_e^r}^H \right\}$.

Sollten die Stücklagerkostensätze aller Produktarten $i \in I_{r,a}$ gleich und somit $k_a^{\max} = k_a^{\min}$ sein, wird die Losgröße aus dem Intervall zwischen Mindestbedarfsmenge und oberer Grenze mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt. Die obere Grenze wird aus dem Minimum von $x_{nE_e^r}^H$ und $O_{E_e^r}^{rel}$ gebildet:

$N_e^r = \text{random} \left(x_{nE_e^r}^H ; \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, O_{E_e^r}^{rel} \right\} \right)$, $k_a^{\max} = k_a^{\min}$.

- **Modus B:**

Per Zufallsgenerator (Gleichverteilung) wird bestimmt, ob die Bedarfsmengen mehrerer externer Aufträge zu einem Fertigungsauftrag, d. h. zu einem Los, zusammengefaßt bzw. gruppiert werden. Maximal können die Bedarfsmengen von drei aufeinanderfolgenden Terminen zu einem Los gruppiert werden, d. h. die Summe aus Nettobedarf $x_{nE_e^r}^H$ und den externen Bedarfen der beiden darauf folgenden Termine $x_{E_e^r+}^{ext}$ und

$x_{E_e^r++}^{ext}$ der betrachteten Produktart. Zunächst werden hierzu der relativ zu dem Termin t_n^{\min} nächst folgende Termin $t_{E_e^r+}$ sowie der auf $t_{E_e^r+}$ nächst folgende Termin $t_{E_e^r++}$ der Produktart E_e^r bestimmt, sofern diese Termine existieren, $t_{E_e^r+} = \text{next}(t_n^{\min}, E_e^r)$, $t_{E_e^r++} = \text{next}(t_{E_e^r+}, E_e^r)$.

Die externen Bedarfe der Produktart E_e^r zu $t_{E_e^r+}$ bzw. $t_{E_e^r++}$ entsprechen

$x_{E_e^r+}^{ext} = x_s^{ext}$, $E_e^r = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_{E_e^r+}$, wenn $t_{E_e^r+}$ existiert, bzw.

$$x_{E_e^r++}^{ext} = x_s^{ext}, E_e^r = i(s), s \in S, \text{ mit } t_s = t_{E_e^r++}, \text{ wenn } t_{E_e^r++} \text{ existiert.}$$

Die Menge $LG = \{1,2,3\}$ repräsentiert die Auswahloptionen. Trifft der Zufallsgenerator die Entscheidung, den aktuellen Nettobedarf und die externen Auftragsmengen der nächsten beiden Aufträge der betrachteten Produktart E_e^r zu gruppieren, reicht aber hierfür die zur Verfügung stehende Zeit nicht aus oder hat die Produktart E_e^r keine zwei weiteren Termine, wird der aktuelle Nettobedarf mit der externen Auftragsmenge nur des nächsten Auftrags gruppiert. Reicht auch hierfür die Zeit nicht aus oder hat die Produktart E_e^r keinen weiteren Termin, wird nur für den aktuellen Termin gefertigt. Bei der zufälligen Entscheidung, zwei Aufträge zu gruppieren, wird analog verfahren, sofern die Kapazität nicht reicht oder kein weiterer Termin für E_e^r existiert. Die Losgröße N_e^r wird demnach wie folgt bestimmt:

$$rand = \text{random}(LG);$$

Fall (1):

$$rand = 3 \quad \wedge \quad t_{E_e^r+}, t_{E_e^r++} \text{ existieren} \quad \wedge \quad x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} \leq O_{E_e^r}$$

$$\Rightarrow N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} \right\}.$$

Fall (2):

$$rand = 2 \quad \wedge \quad t_{E_e^r+} \text{ existiert} \quad \wedge \quad x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} \leq O_{E_e^r} \quad \text{oder}$$

$$rand = 3 \quad \wedge \quad t_{E_e^r+} \text{ existiert}$$

$$\wedge \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} > O_{E_e^r} \quad \vee \quad t_{E_e^r++} \text{ existiert nicht} \right)$$

$$\Rightarrow N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} \right\}.$$

Fall (3):

$$rand = 1 \quad \text{oder}$$

$$rand = 2 \quad \wedge \quad \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} > O_{E_e^r} \quad \vee \quad t_{E_e^r+} \text{ existiert nicht} \right) \quad \text{oder}$$

$$rand = 3 \quad \wedge \quad \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} > O_{E_e^r} \quad \vee \quad t_{E_e^r+}, t_{E_e^r++} \text{ existieren nicht} \right)$$

$\Rightarrow N_e^r = x_{nE_e^r}$. (Die Minimumbildung ist hier nicht erforderlich, da der Nettobedarf die noch ausstehende Gesamtherstellmenge nicht übersteigen kann.)

- Modus AB:

Der Modus AB stellt eine Mischung aus den Modi A und B dar. Die Lose können – wie bei Modus B – bis zu drei Aufträge umfassen, wobei die Gruppierungsentscheidung nicht zufällig, sondern – wie bei Modus A – anhand der relativen Position des Stücklagerkostensatzes der betrachteten Produktart getroffen wird. Hierzu wird zuerst

das Verhältnis $k_{E_e^r}^{rel} = \frac{k_a^{\max} - k_{E_e^r}}{k_a^{\max} - k_a^{\min}}$, $k_a^{\max} \neq k_a^{\min}$, berechnet. Erreicht $k_{E_e^r}^{rel}$ ein be-

stimmtes Niveau1, wird – sofern zulässig – eine Dreier-Gruppierung und bei Erreichen eines bestimmten Niveau2 – sofern zulässig – eine Zweier-Gruppierung vorgenommen, wobei Niveau 1 einen näher an eins liegenden Wert annimmt als Niveau 2.

Wie bei dem Modus B werden die Termine $t_{E_e^r+}$ und $t_{E_e^r++}$ sowie die zugehörigen externen Bedarfe $x_{E_e^r+}^{ext}$ und $x_{E_e^r++}^{ext}$ bestimmt, sofern $t_{E_e^r+}$ und $t_{E_e^r++}$ existieren.

Wenn $k_a^{\max} \neq k_a^{\min}$:

Fall (1):

$$\text{Niveau1} \leq k_{E_e^r}^{rel} \wedge t_{E_e^r+}, t_{E_e^r++} \text{ existieren} \wedge x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} \leq O_{E_e^r}$$

$$\Rightarrow N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} \right\}.$$

Fall (2):

$$\text{Niveau1} > k_{E_e^r}^{rel} \geq \text{Niveau2} \wedge t_{E_e^r+} \text{ existiert} \wedge x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} \leq O_{E_e^r} \text{ oder}$$

$$\text{Niveau1} \leq k_{E_e^r}^{rel} \wedge t_{E_e^r+} \text{ existiert} \\ \wedge \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} > O_{E_e^r} \vee t_{E_e^r++} \text{ existiert nicht} \right)$$

$$\Rightarrow N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} \right\}.$$

Fall (3):

$$\text{Niveau2} > k_{E_e^r}^{rel} \text{ oder}$$

$$\text{Niveau1} > k_{E_e^r}^{rel} \geq \text{Niveau2} \wedge \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} > O_{E_e^r} \vee t_{E_e^r+} \text{ existiert nicht} \right) \text{ oder}$$

$$\text{Niveau1} \leq k_{E_e^r}^{rel} \wedge \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^r+}^{ext} + x_{E_e^r++}^{ext} > O_{E_e^r} \vee t_{E_e^r+}, t_{E_e^r++} \text{ existieren nicht} \right)$$

$$\Rightarrow N_e^r = x_{nE_e^r}.$$

Sollten die Stücklagerkostensätze aller Produktarten $i \in I_{r,a}$ gleich und somit $k_a^{\max} = k_a^{\min}$ sein, wird die Losgröße wie bei Modus A aus dem Intervall zwischen Mindestbedarfsmenge und oberer Grenze mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig

gewählt, wobei die obere Grenze wieder aus dem Minimum von $x_{nE_e}^H$ und $O_{E_e}^{rel}$

gebildet wird: $N_e^r = \text{random}\left(x_{nE_e}^r; \min\left\{x_{nE_e}^H, O_{E_e}^{rel}\right\}\right)$, $k_a^{\max} = k_a^{\min}$.

- Modus C:

Die Losgröße N_e^r wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall zwischen Mindestbedarf und positionsrelativierter oberer Schranke ausgewählt, wobei wiederum berücksichtigt werden muß, daß höchstens die noch ausstehende Gesamt-

herstellmenge $x_{nE_e}^H$ hergestellt werden darf: $N_e^r = \text{random}\left(x_{nE_e}^r; \min\left\{x_{nE_e}^H, O_{E_e}^{rel}\right\}\right)$

- Modus D:

Die Losgröße N_e^r wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall zwischen Mindestbedarf und oberer Schranke ausgewählt, wobei wiederum berücksichtigt werden muß, daß höchstens die noch ausstehende Gesamtherstellmenge $x_{nE_e}^H$

hergestellt werden darf:

$$N_e^r = \text{random}\left(x_{nE_e}^r; \min\left\{x_{nE_e}^H, O_{E_e}^{rel}\right\}\right)$$

19) Berechnung des Fertigungsendes $F_e^r = \sum_{e'=2}^e \left(t_{E_{e'-1}^r E_e^r} + c_{E_{e'}^r} \cdot (N_{e'}^r - 1)\right)$.

20) Wenn $n < t$, werden die noch ausstehende Gesamtherstellmenge $x_{n+1E_e}^H$ und der

Lagerbestand $L_{n+1E_e}^r$ auf Basis der Losgröße N_e^r aktualisiert:

$$x_{n+1E_e}^H = x_{nE_e}^H - N_e^r, \quad L_{n+1E_e}^r = N_e^r - x_{nE_e}^r.$$

Solange nicht für die an der letzten Position des Abschnitts stehende Produktart die Losgröße bestimmt ist, $e < e_{r,a}^{\Omega}$, betrachte die nächste Position, $e := e + 1$, und gehe zurück

zu Schritt 15). Sind die Losgrößen für alle Produktarten bestimmt $e = e_{r,a}^{\Omega}$, geht das Verfahren weiter zu Schritt 21).

Aktualisierung und Backtracking

21) Wenn $n = t$, wurden alle Termine betrachtet. Das Verfahren geht über zu Schritt 23).
 Sonst, $n < t$, werden die Lagerbestände und die noch ausstehenden Gesamtherstellmengen derjenigen Produktarten, die nicht dem a -ten Abschnitt angehören, sowie die Menge T_n^{next} , aktualisiert:

$$L_{n+1i} = L_{ni} - x_s^{ext}, \quad i = i(s), \quad s \in S, \quad \text{mit } t_s = t_n^{\min}, \quad i \in I_n^{\text{term}} \setminus I_{r,a}$$

$$L_{n+1i} = L_{ni}, \quad i \in I \setminus I_n^{\text{term}}$$

$$x_{n+1i}^H = x_{ni}^H, \quad i \in I \setminus I_{r,a}$$

$$T_{n+1}^{next} = T_n^{next} \setminus \left\{ t_n^{\min} \right\}.$$

22) a) Wenn nach der n -ten Aktualisierung ein Fertigungsbedarf bestand, $I_n^* \neq \emptyset$,

$$\text{wird der neue aktuelle Zeitpunkt gemäß } t_{n+1}^{\text{akt}} = t_n^{\text{akt}} + t_{E^r, a} + \sum_{e=e_{r,a}^A}^{e_{r,a}^{\Omega}} c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1)$$

ermittelt. Sonst, $I_n^* = \emptyset$, $t_{n+1}^{\text{akt}} = t_n^{\text{akt}}$.

b) Inkrementieren des Aktualisierungszähler $n := n+1$.

c) Ermittlung des neuen relativ zu t_n^{akt} nächstmöglichen Termins aus der Menge T_n^{next} ,
 $t_n^{\text{min}} = \min \{t_s \mid t_s \in T_n^{\text{next}}\}$.

d) Bestimmung der Menge $I_n^{\text{term}} = \{i \mid i = i(s), s \in S, \text{ mit } t_s = t_n^{\text{min}}\}$.

e) Bestimmung der Nettobedarfe derjenigen Produktarten, die zu t_n^{min} einen externen Bedarf haben, $x_{ni} = \max \{0, x_s^{\text{ext}} - L_{ni}\}$, $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_n^{\text{min}}$, $i \in I_n^{\text{term}}$.

Das Verfahren geht zurück zu der Bestimmung der Menge I_n^* , Schritt 5).

23) Wurden sämtliche Termine betrachtet, wird die letzte Position des Ablaufvektors mit der Produktart 0 belegt, $e := e+1$, $E_e^r = 0$. Die Position e entspricht der Länge des Ablaufvektors, $E^r = e$. Zu dem aktuellen Zeitpunkt t_n^{akt} wird die für die Ausrüstung des Fließbandes, d. h. für die Abrüstung von der auf $e-1$ positionierten Produktart auf die fiktive Produktart 0, benötigte Zeit addiert: $t_n^{\text{akt}} := t_n^{\text{akt}} + t_{E_{e-1}^r, 0}$.

Wenn der aktuelle Zeitpunkt t_n^{akt} vor T liegt, $t_n^{\text{akt}} < T$, gehe weiter zu Schritt 24). Sonst gehe über zu Schritt 25).

24) Anwendung des Time-Opt-Operators (TOO):

Der TOO verschiebt den Fertigungsbeginn eines jeden Produktloses auf den jeweils spätestmöglichen Zeitpunkt. Aufgrund des vorerst nahtlosen Aneinanderreihens der Produktlose können eventuelle freie Kapazitäten vor Anwendung des TOO nur zwischen dem Zeitpunkt der Beendigung der Ausrüstung des Fließbandes und dem Ende des Planungszeitraums T auftreten.

Beschreibung der einzelnen Schritte

a) Setze das Fertigungsende F_e^r der zuletzt aufgelegten fiktiven Produktart 0 auf T ,
 $F_e^r = T$, und ermittle den Fertigungsbeginn gemäß $FB_e^r = F_e^r - t_{E_{e-1}^r, 0}$.

b) Gehe eine Position zurück, $e := e-1$.

c) Bestimme den relativ zu F_e^r nächstmöglichen Termin der auf e positionierten Produktart E_e^r gemäß $t_e^{\text{next}} = \text{next}(F_e^r, E_e^r)$.

Ist der Termin t_e^{next} später als der auf den spätestmöglichen Zeitpunkt verschobene Fertigungsbeginn der auf $e+1$ positionierten Produktart, $t_e^{\text{next}} > FB_{e+1}^r$, setze das neue Fertigungsende auf FB_{e+1}^r . Ansonsten, $t_e^{\text{next}} \leq FB_{e+1}^r$, setze das neue Fertigungsende auf den relativ zu F_e^r nächstmöglichen Termin t_e^{next} ,

$$F_e^{r, \text{neu}} := \min \{t_e^{\text{next}}, FB_{e+1}^r\}.$$

Wenn $F_e^{r,neu} = F_e^r$, ist die zur Verfügung stehende Kapazität voll ausgeschöpft. Da gemäß Schritt 22) der aktualisierte Zeitpunkt t_n^{akt} jeweils um die benötigte Umrüst- und Bearbeitungszeit verschoben wird, kann in diesem Fall auch für kein auf dem Ablaufvektor vor e positioniertes Produktlos eine Verschiebung des Fertigungsbeginns vorgenommen werden. Für die auf den Positionen $e' < e$ positionierten Produktlose, wird jeweils dem neuen Fertigungsende das alte Fertigungsende zugewiesen, $F_{e'}^{r,neu} = F_{e'}^r$, $e' = 2(1)e - 1$. Dies ist aufgrund der Verwendung von $F_e^{r,neu}$ im Rahmen der Berechnung der Lagerungskosten erforderlich. Das Verfahren geht dann über zu Schritt 25).

Andernfalls, $F_e^{r,neu} > F_e^r$, ermittle den Fertigungsbeginn (nicht Bearbeitungsbeginn, d. h. unter Berücksichtigung, daß auf die auf e positionierte Produktart nach Bearbeitungsende der auf $e-1$ positionierten Produktart noch umgerüstet werden muß) der auf e positionierten Produktart E_e^r gemäß $FB_e^r = F_e^{r,neu} - c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1) - t_{E_{e-1}^r E_e^r}$, und gehe weiter zu Unterschritt d).

- d) Solange nicht alle Positionen betrachtet wurden, $e > 2$ (Position $e=1$ braucht wegen der Belegung mit der fiktiven Produktart 0 nicht betrachtet zu werden), gehe zurück zu Unterschritt b). Ansonsten gehe weiter zu Schritt 25).
- 25) Füge den Index r der Menge der Individuenindizes und das Individuum P^r der Menge aller Individuen hinzu, $R := R \cup \{r\}$, $P := P \cup \{P^r\}$. Solange $r < R$, erzeuge das nächste Individuum, $r := r+1$, d.h. gehe zurück zu Schritt 2). Ansonsten gehe weiter zur Berechnung der Fitness, Schritt 26).

Fitnessberechnung

- 26) Für die Fitnessberechnung werden zunächst die entscheidungsrelevanten Kosten für alle Individuen P^r , $r=1(1)R$, ermittelt. Die entscheidungsrelevanten Kosten setzen sich aus den Umrüstungskosten des gesamten Ablaufvektors und aus den Lagerungskosten der einzelnen Produktlose nach Fertigungsende bis zu dem jeweils nächst folgenden Termin sowie den Lagerungskosten der nach dem Erreichen des jeweils nächst folgenden Termins auf Lager verbleibenden Bestände zusammen.

Berechnung der Loswechselkosten

Die gesamten Loswechselkosten des Ablaufvektors C_{E^r} berechnen sich als Summe der Loswechselkosten aller paarweisen Produktartenfolgen inklusive der Kosten für die Ein- und die Ausrüstung des Fließbandes. Besteht zwischen zwei Losen eine Stillstandzeit, so werden die Maschinen zwischenzeitig nicht auf einen neutralen Maschinenzustand abgerüstet.

$$C_{E^r} = \sum_{e=2}^{E^r} c_{E_{e-1}^r E_e^r}, \quad r = 1(1)R.$$

Lagerungskosten der gefertigten Produktlose

Nach dem Fertigstellungszeitpunkt $F_e^{r,neu}$ wird jedes Produktlos zunächst bis zu dem jeweils nächsten Termin gelagert. Wegen $t_e^{next} = next(F_e^r, E_e^r)$ und $F_e^{r,neu} := \min\{t_e^{next}, FB_{e+1}^r\}$ (vgl. Schritt 24c) gilt stets: $F_e^r \leq F_e^{r,neu} \leq t_e^{next}$. Da t_e^{next} demnach relativ zu $F_e^{r,neu}$ ebenso der nächstmögliche Termin wie relativ zu F_e^r ist, kann t_e^{next} für die Berechnung der Lagerkosten Anwendung finden. Die zwischen $F_e^{r,neu}$ und t_e^{next} liegende Zeit wird mit dem Stücklagerkostensatz $k_{E_e^r}$ und der Losgröße N_e^r bewertet. Die als $C_{L,r}$ bezeichneten Lagerkosten der Produktlose bis zu dem jeweils nächsten eigenen Termin berechnen sich als Summe über alle Positionen des Ablaufvektors gemäß:

$$C_{L,r} = \sum_{e=2}^{E^r-1} k_{E_e^r} \cdot N_e^r \cdot (t_e^{next} - F_e^{r,neu}), \quad r=1(1)R.$$

Lagerungskosten der Bestände

Die jeweils nach der n -ten Aktualisierung auf Lager verbleiben Bestände der einzelnen Produktarten werden ebenfalls mit dem Stücklagerkostensatz $k_{E_e^r}$ bewertet. Da die Lagerbestände je nach Fertigung und Inanspruchnahme von Aktualisierung zu Aktualisierung variieren, darf die Berechnung nur jeweils für den Zeitraum von dem betrachteten bis zu dem nächsten Termin t_{i+} der betrachteten Produktart erfolgen. Die Lagerkosten der Bestände $C_{B,r}$ berechnen sich demnach als Summe über alle Aktualisierungen und Produktarten gemäß:

$$C_{B,r} = \sum_{i \in I} \sum_{n=1}^t k_i \cdot L_{ni} \cdot (t_{i+} - t_n^{\min}),$$

mit $t_{i+} = next(t_n^{\min}, i)$, $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_n^{\min}$, und t_{i+} existiert, $r=1(1)R$.

Zielfunktionswert

Der Zielfunktionswert $Z(P^r)$ des r -ten Individuums, d. h. die entscheidungsrelevanten Kosten (im folgenden auch als Kosten bezeichnet), berechnet sich als Summe aus Umrüstungs- und Lagerhaltungskosten:

$$Z(P^r) = C_{E^r} + C_{L,r} + C_{B,r}, \quad r=1(1)R.$$

- 27) Berechnung der Fitness $fit(P^r)$ für alle Individuen P^r , $r=1(1)R$. Zur Berechnung von $fit(P^r)$ wird der schlechteste Zielfunktionswert, d. h. das Kostenmaximum Z^{\max} , ermittelt, und von diesem der Zielfunktionswert $Z(P^r)$ abgezogen.⁹⁹
- $$fit(P^r) = Z^{\max} - Z(P^r), \quad r = 1(1)R, \quad \text{mit } Z^{\max} = \max\{Z(P^r) \mid P^r \in P\}$$
- 28) Diejenigen Individuen P^r mit der besten Fitness bilden die Menge der besten gefundenen Lösungen, $P^* = \arg \max\{fit(P^r) \mid P^r \in P\}$. Das Verfahren endet.

4.4.2.5 PDZ als Pseudocode

Die Numerierung der Schritte im Pseudocode entspricht der zuvor vorgenommenen Numerierung. Ist an eine „Wenn“-Bedingung (analog „Sonst“, „Für“ oder „Solange“) nur eine Anweisung geknüpft, kann diese ohne geschweifte Klammern in derselben Zeile wie die Bedingung stehen. Hiervon wird im Einzelnen abgewichen, wenn die Formel der Bedingung und/oder der Anweisung zu lang ist. Sofern keine Angabe „gehe weiter“ oder „gehe über“ explizit angegeben ist, erfolgt das Fortschreiten im Algorithmus gemäß der Numerierung.

1. Bestimme PR, LM, Niveau1 und Niveau2. Initialisiere $P = \emptyset$, $R = \emptyset$, $u=0$ und $r=1$.
2. Initialisiere $A_r = \emptyset$, $e = 1$. Setze $E_1^r = 0$. Initialisiere $n=1$, $t_1^{\text{akt}} = 0$, sowie $x_{1i}^H = x_i^H$, $L_{1i} = 0$, $i \in I$.
3. Bestimme $t_1^{\min} = \min\{t_s \mid t_s \in T_1^{\text{next}}\}$, mit $T_1^{\text{next}} = \{t_s \mid s \in S\}$.
Bestimme $I_1^{\text{term}} = \{i \mid i = i(s), s \in S, \text{ mit } t_s = t_1^{\min}\}$.
4. Initialisiere $x_{1i} = x_s^{\text{ext}}$, $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_1^{\min}$, $i \in I_1^{\text{term}}$, und $x_{1i} = 0$, $i \in I \setminus I_1^{\text{term}}$.
5. Bestimme die Menge $I_n^* = \{i \mid x_{ni} > 0, i \in I_n^{\text{term}}\}$.
6. Wenn $I_n^* = \emptyset$, dann gehe zu Schritt 21.
Sonst
{
 $a = n$
 $A_r := A_r \cup \{a\}$
 $I_{r,a} = I_n^*$
 Wenn $|I_{r,a}| = 1$, dann
 {
 $e := e + 1$
 $E_e^r = \text{random}(I_{r,a})$
 gehe zu Schritt 12
 }
}

⁹⁹ Anhand der relativen Position des Zielfunktionswertes des betrachteten Individuums in dem Intervall zwischen bestem und schlechtestem Zielfunktionswert innerhalb der Population ermitteln z. B. Sannomiya/Iima die Fitness eines Individuum, wobei dann das schlechteste Individuum den Fitness-Wert 0 und das beste Individuum den Fitness-Wert 1 annimmt, vgl. Sannomiya/Iima (1996), S. 525.

Sonst

{

$$G_a = \left\lfloor \frac{|I_{r,a}|}{3} \right\rfloor$$

$$I_a^{copy} = I_{r,a}$$

Für ($g = 0, g < G_a, g := g + 1$)

{

$$\text{Wenn } |I_a^{copy}| \geq 3, I_a^g = \text{rand3}(I_a^{copy})$$

$$\text{Sonst, } I_a^g = I_a^{copy}$$

$$I_a^{copy} := I_a^{copy} \setminus I_a^g$$

}

}

}

7. Betrachte die erste Gruppe, $g=1$.

8. Bilde die Menge F_a^g durch Permutation der maximal sechs (3!) möglichen Teilablauffolgen, $F_a^g = \{TAF^{gf,a} \mid f = 1(1) | I_a^g |!\}$.

Wenn $|I_a^g| = 1$, dann $TAF^{g^*,a} = TAF^{g1,a}$.

Sonst

{

Wenn PR= ZEITKOST, dann

{

$$F_a^{g \min, Z} = \arg \min \left\{ t_a^{gf} \mid TAF^{gf,a} \in F_a^g \right\}, \text{ mit}$$

$$t_a^{gf} = \sum_{b=1}^{|I_a^g|-1} t_{TAF_b^{gf,a} TAF_{b+1}^{gf,a}}, TAF^{gf,a} \in F_a^g.$$

Wenn $|F_a^{g \min, Z}| = 1$, dann

{

$$TAF^{g^*,a} = \text{random}(F_a^{g \min, Z})$$

gehe über zu Schritt 10

}

}

Wenn PR= KOSTZEIT, dann

{

$$F_a^{g \min, K} = \arg \min \left\{ c_a^{gf} \mid TAF^{gf,a} \in F_a^g \right\}, \text{ mit}$$

$$c_a^{gf} = \sum_{b=1}^{|I_a^g|-1} c_{TAF_b^{gf,a} TAF_{b+1}^{gf,a}}, TAF^{gf,a} \in F_a^g$$

Wenn $|F_a^{g \min, K}| = 1$, dann

{

- $$TAF^{g^*,a} = \text{random}(F_a^{g \min, K})$$
- gehe über zu Schritt 10
- }
- }
- Wenn PR= ZUFALL, dann
- {
- $$TAF^{g^*,a} = \text{random}(F_a^g)$$
- gehe über zu Schritt 10
- }
- }
9. Wenn PR= ZEITKOST, dann
- {
- $$F_a^{g \min, ZK} = \arg \min \left\{ c_a^{gf} \mid TAF^{gf,a} \in F_a^{g \min, Z} \right\}$$
- $$TAF^{g^*,a} = \text{random}(F_a^{g \min, ZK})$$
- }
- Wenn PR= KOSTZEIT, dann
- {
- $$F_a^{g \min, KZ} = \arg \min \left\{ c_a^{gf} \mid TAF^{gf,a} \in F_a^{g \min, K} \right\}$$
- $$TAF^{g^*,a} = \text{random}(F_a^{g \min, KZ})$$
- }
10. Wenn $g < G_a$, dann
- {
- $$g := g + 1$$
- gehe zurück zu Schritt 8
- }
11. Für ($g=0, g < G_a, g := g + 1$)
- {
- Für ($b=0, b < |I_a^g|, b := b + 1$)
- {
- $$e := e + 1$$
- $$E_e^r = TAF_b^{g^*,a}$$
- }
- }
12. Wenn LM=A oder LM=AB, dann
- {
- $$k_a^{\min} = \min \{k_i \mid i \in I_{r,a}\}$$
- $$k_a^{\max} = \max \{k_i \mid i \in I_{r,a}\}$$
- }
13. Setze $e_{r,a}^\Omega = e, e := e - (|I_{r,a}| - 1), e_{r,a}^\Lambda = e$.
14. Bestimme $t_{E^{r,a}} = \sum_{e=e_{r,a}^\Lambda}^{e_{r,a}^\Omega} t_{E_{e-1}^r E_e^r}$.

15. Berechne $O_{E_e^r}$ gemäß

$$O_{E_e^r} = \frac{t_n^{\min} - t_n^{\text{akt}} - t_{E^{r,a}} - \sum_{e'=e_{r,a}^A}^{e-1} c_{E_{e'}^r} \cdot (N_{e'}^r - 1) - \sum_{e'=e+1}^{e_{r,a}^{\Omega}} c_{E_{e'}^r} \cdot (x_{nE_{e'}^r} - 1)}{c_{E_e^r}} + 1.$$

16. Wenn $O_{E_e^r} < x_{nE_e^r}$, dann

{
 Wenn $u < V_MAX$, dann
 {
 $u := u + 1$
 gehe zurück zu Schritt 2
 }
 Sonst, bricht das Verfahren ab.
 }

Sonst

{
 Wenn (LM=B oder LM=AB oder LM=D), dann gehe über zu Schritt 18
 }

17. Berechne $O_{E_e^r}^{rel} = x_{nE_e^r} + \left(O_{E_e^r} - x_{nE_e^r} \right) \cdot \frac{1}{e_{r,a}^{\Omega} - e + 1}$.

18. Wenn (LM=AB oder LM=A), dann

{
 Wenn $k_a^{\max} \neq k_a^{\min}$, dann $k_{E_e^r}^{rel} = \frac{k_a^{\max} - k_{E_e^r}}{k_a^{\max} - k_a^{\min}}$.
 }

Wenn (LM=AB oder LM=B), dann

{
 Bestimme $t_{E_e^r+} = next(t_n^{\min}, E_e^r)$, $t_{E_e^r++} = next(t_{E_e^r+}, E_e^r)$.
 Wenn $t_{E_e^r+}$ existiert, dann $x_{E_e^r+}^{ext} = x_s^{ext}$, $E_e^r = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_{E_e^r+}$.
 Wenn $t_{E_e^r++}$ existiert, dann $x_{E_e^r++}^{ext} = x_s^{ext}$, $E_e^r = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_{E_e^r++}$.
 }

Wenn LM=A, dann

{
 Wenn $k_a^{\max} \neq k_a^{\min}$, $N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, \left[k_{E_e^r}^{rel} \cdot \left(O_{E_e^r}^{rel} - x_{nE_e^r} \right) \right] + x_{nE_e^r} \right\}$
 sonst, $N_e^r = \text{random} \left(x_{nE_e^r}; \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, O_{E_e^r}^{rel} \right\} \right)$
 }

Wenn LM=B, dann

{
 $rand = \text{random}(LG)$
 }

Wenn ($rand = 3 \wedge t_{E_e^r+}, t_{E_e^{r++}}$ existieren $\wedge x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} + x_{E_e^{r++}}^{ext} \leq O_{E_e^r}$),

$$\text{dann } N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} + x_{E_e^{r++}}^{ext} \right\}.$$

Wenn ($rand = 2 \wedge t_{E_e^r+}$ existiert $\wedge x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} \leq O_{E_e^r}$ oder

$rand = 3 \wedge t_{E_e^r+}$ existiert

$$\wedge \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} + x_{E_e^{r++}}^{ext} > O_{E_e^r} \vee t_{E_e^{r++}} \text{ existiert nicht} \right)),$$

$$\text{dann } N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} \right\}$$

Sonst $N_e^r = x_{nE_e^r}$

}

Wenn LM=AB, dann

{

Wenn $k_a^{\max} \neq k_a^{\min}$, dann

{

Wenn ($\text{Niveau1} \leq k_{t_i}^{rel} \wedge t_{E_e^r+}, t_{E_e^{r++}}$ existieren

$$\wedge x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} + x_{E_e^{r++}}^{ext} \leq O_{E_e^r}$$

$$\text{dann } N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} + x_{E_e^{r++}}^{ext} \right\}$$

Wenn ($\text{Niveau1} > k_{E_e^r}^{rel} \geq \text{Niveau2} \wedge t_{E_e^r+}$ existiert $\wedge x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} \leq O_{E_e^r}$ oder

$\text{Niveau1} \leq k_{t_i}^{rel} \wedge t_{E_e^r+}$ existiert

$$\wedge \left(x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} + x_{E_e^{r++}}^{ext} > O_{E_e^r} \vee t_{E_e^{r++}} \text{ existiert nicht} \right)),$$

$$\text{dann } N_e^r = \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, x_{nE_e^r} + x_{E_e^{r+}}^{ext} \right\}$$

Sonst, $N_e^r = x_{nE_e^r}$

}

$$\text{Sonst, } N_e^r = \text{random} \left(x_{nE_e^r}; \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, O_{E_e^r}^{rel} \right\} \right)$$

}

$$\text{Wenn LM=C, dann } N_e^r = \text{random} \left(x_{nE_e^r}; \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, O_{E_e^r}^{rel} \right\} \right).$$

$$\text{Wenn LM=D, dann } N_e^r = \text{random} \left(x_{nE_e^r}; \min \left\{ x_{nE_e^r}^H, O_{E_e^r} \right\} \right).$$

$$19. \text{ Berechne } F_e^r = \sum_{e'=2}^e \left(t_{E_{e'-1}^r E_e^r} + c_{E_e^r} \cdot (N_{e'}^r - 1) \right).$$

20. Wenn $n < t$, dann

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{n+1E_e^r}^H = x_{nE_e^r}^H - N_e^r \\ L_{n+1E_e^r} = N_e^r - x_{nE_e^r} \\ \end{array} \right\}$$

Wenn $e < e_{r,a}^\Omega$, dann

$$\left\{ \begin{array}{l} e := e + 1 \\ \text{gehe zurück zu 15} \\ \end{array} \right\}$$

21. Wenn $n = t$, dann gehe zu 23.

Sonst

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{n+1i} = L_{ni} - x_s^{ext}, \quad i = i(s), \quad s \in S, \quad \text{mit } t_s = t_n^{\min}, \quad i \in I_n^{\text{term}} \setminus I_{r,a} \\ L_{n+1i} = L_{ni}, \quad i \in I \setminus I_n^{\text{term}} \\ x_{n+1i}^H = x_{ni}^H, \quad i \in I \setminus I_{r,a} \\ T_{n+1}^{next} = T_n^{next} \setminus \{t_n^{\min}\} \\ \end{array} \right\}$$

22. Wenn $I_n^* \neq \emptyset$, dann $t_{n+1}^{\text{akt}} = t_n^{\text{akt}} + t_{E^r,a} + \sum_{e=e_{r,a}^\Lambda}^{e_{r,a}^\Omega} c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1)$.

Sonst, $t_{n+1}^{\text{akt}} = t_n^{\text{akt}}$.

$n := n + 1$.

$$t_n^{\min} = \min \{t_s \mid t_s \in T_n^{next}\}.$$

$$I_n^{\text{term}} = \{i \mid i = i(s), \quad s \in S, \quad \text{mit } t_s = t_n^{\min}\}.$$

$$x_{ni} = x_s^{ext} - L_{ni}, \quad i = i(s), \quad s \in S, \quad \text{mit } t_s = t_n^{\min}, \quad i \in I_n^{\text{term}}.$$

Gehe zurück zu 5.

23. Setze $e := e + 1$, $E_e^r = 0$, $E^r = e$, $t_n^{\text{akt}} := t_n^{\text{akt}} + t_{E_{e-1}^r} 0$.

Wenn $t_n^{\text{akt}} = T$, dann gehe zu 25.

24. Setze $F_e^r = T$, und berechne $FB_e^r = F_e^r - t_{E_{e-1}^r} 0$.

Solange ($e > 2$)

$$\left\{ \begin{array}{l} e := e - 1 \\ t_e^{next} = next(F_e^r, E_e^r) \\ F_e^{r,neu} := \min \{t_e^{next}, FB_{e+1}^r\} \\ \text{Wenn } F_e^{r,neu} > F_e^r, \text{ dann } FB_e^r = F_e^{r,neu} - c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1) - t_{E_{e-1}^r} E_e^r \end{array} \right\}$$

```

    Sonst
    {
        Solange ( $e > 2$ )
        {
             $e := e - 1$ 
             $F_e^{r,neu} = F_e^r$ 
        }
        Gehe zu 25.
    }
    }
    
```

25. Füge den Index r der Menge R und das Individuum P^r der Menge P hinzu, $R := R \cup \{r\}$,
 $P := P \cup \{P^r\}$.

Wenn $r < R$, dann

```

    {
         $r := r + 1$ 
        gehe zurück zu Schritt 2
    }
    
```

26. Für ($r=0$, $r < R$, $r:=r+1$)

```

    {
         $C_{E^r} = \sum_{e=2}^{E^r} c_{E_{e-1}^r E_e^r}$ 
         $C_{L,r} = \sum_{e=2}^{E^r-1} k_{E_e^r} \cdot N_e^r \cdot (t_e^{next} - F_e^{r,neu})$ 
         $C_{B,r} = \sum_{i \in I} \sum_{n=1}^t k_i \cdot L_{ni} \cdot (t_{i+} - t_n^{\min})$ ,
    
```

mit $t_{i+} = next(t_n^{\min}, i)$, $i = i(s)$, $s \in S$, mit $t_s = t_n^{\min}$, und t_{i+} existiert

$$Z(P^r) = C_{E^r} + C_{L,r} + C_{B,r}$$

```

    }
    
```

27. Ermittle $Z^{\max} = \max \{Z(P^r) \mid P^r \in P\}$.

Für ($r=0$, $r < R$, $r:=r+1$), $fit(P^r) = Z^{\max} - Z(P^r)$.

28. Bestimme $P^* = \arg \max \{fit(P^r) \mid P^r \in P\}$. Das Verfahren endet.

4.4.3 Algorithmus der genetischen Operatoren (AGO)

Im folgenden wird zunächst ein Überblick über das Grundkonzept des AGO gegeben. Anschließend werden die verwendeten Symbole beschrieben, die einzelnen Schritte des Algorithmus genau erläutert und der AGO als Pseudocode abgebildet.

4.4.3.1 Grundkonzept des AGO

Die mit Hilfe des PDZ erzeugten Ablaufvektoren bzw. Individuen bilden die Ausgangspopulation, auf welche die Operatoren des genetischen Algorithmus angewandt werden. Zu den genetischen Operatoren zählt zum einen die Selektion derjenigen Individuen, welche aus der Menge der potentiellen Eltern für den Evolutionsprozeß in jeder Generationsstufe herangezogen werden, und zum anderen ein speziell für die vorliegende Problemstruktur der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung entwickelter Kreuzungsoperator. Ebenfalls zu den Rekombinationsoperatoren gehört üblicherweise ein stochastischer Mutationsoperator, der sich in folgendem Algorithmus implizit aus dem Kreuzungsoperator ergibt.

Die Selektion erfolgt in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird die *Elternpopulation* zur Erzeugung der nächsten Generation aus der *Menge der potentiellen Eltern* ausgewählt. Die Menge der potentiellen Eltern wird in jedem Generationsschritt aus der Elternpopulation des vorherigen Generationsschritts und der daraus aktuell erzeugten *Kindgeneration* gebildet. Nach der Vereinigung in die Menge der potentiellen Eltern wird die Fitness der Individuen neu berechnet, und dann die Menge der potentiellen Eltern nach elitärem Prinzip in proportionaler Abhängigkeit von der Fitness der Individuen auf die Elternpopulation dezimiert. Mit dieser nicht-stationären Vorgehensweise, d. h., daß ein erzeugtes Kind weder das schlechteste Individuum in der aktuellen Population noch einen Elternteil unmittelbar nach seiner Erzeugung ersetzt, wird der Gefahr zu großer Homogenität in der Population entgegengewirkt (Vermeidung von Inzucht), da andernfalls ein Kind in demselben Generationsschritt an der Erzeugung eines Kindes beteiligt und somit in derselben Generation sowohl Eltern- als auch Geschwisteranteil sein könnte.¹⁰⁰ In der zweiten Stufe werden aus der Elternpopulation die jeweils aus vier Individuen bestehenden Mengen zur Erzeugung der einzelnen Kinder gebildet. Diese Auswahl erfolgt mit von der Fitness der Elternindividuen abhängiger Wahrscheinlichkeit.

Der entwickelte Kreuzungsoperator wird in Anlehnung an den von *Eiben/Raué/Ruttkay* vorgestellten OB-ABC (vgl. Kapitel 4.3.2) als „Cost-Weighted-Adjacency-based-crossover“ (CW-ABC) bezeichnet. Zum einen basiert die Anlehnung an den OB-ABC darauf, daß vier Elternteile an einem Kreuzungsvorgang beteiligt sind. Durch die Beteiligung mehrerer Elternteile wird bei einem Kreuzungsvorgang eine größere Vielfalt an paarweisen Produktartenfolgen (Kantenbeziehungen) als bei der Kreuzung von nur zwei Elternteilen betrachtet. Dieser Aspekt ist insbesondere bei der vorliegenden asymmetrischen Reihenfolgestruktur relevant. Einerseits hat zwar das einzelne Individuum dann weniger Chancen, genau seine Information zu vererben, die Beteiligung mehrerer Eltern mindert aber andererseits die Gefahr, daß die Population zu früh konvergiert.¹⁰¹ Mit diesem positiven Effekt geht allerdings einher, daß vorhandene Information immer wieder zerstört werden, und zwar in proportional steigendem Verhältnis zu der Anzahl der Eltern.¹⁰² Die Anzahl der beteiligten Eltern darf also weder zu hoch noch zu niedrig ausfallen. Daß die Beteiligung mehrerer Elternteile am Kreuzungsvorgang bei mehrwertiger Kodierung häufig zu besseren Ergebnissen als die klassische Kreuzung

¹⁰⁰ Demselben Prinzip bei der Konzeption des Kreislaufs „Population-Generation-Folgegeneration“ folgen auch *Lee/Choi*, vgl. *Lee/Choi* (1995), S. 863.

¹⁰¹ Vgl. *Eiben/Van Kemenade/Kok* (1995), S. 944.

¹⁰² Vgl. *Eiben/Van Kemenade/Kok* (1995), S. 944.

führt, ist vielfach gezeigt worden.¹⁰³ Zum anderen ist die Anlehnung an den OB-ABC darin begründet, daß die Erzeugung eines Kindindividuum beim CW-ABC ebenso wie beim OB-ABC durch sukzessives Belegen der loci des Kindes mit den zu vererbenden Genen der Eltern erfolgt, wobei die Belegungsentscheidung auch von der Häufigkeit der Kantenbeziehungen in den Genen der an dem Kreuzungsvorgang beteiligten Eltern abhängt.

Von dem für die Reihenfolgeplanung entwickelten OB-ABC unterscheidet sich der CW-ABC zum einen in der Integration der Losgrößenplanung und zum anderen darin, daß die Ausgangspopulation, auf die der Operator angewandt wird, mit Hilfe eines stochastischen Konstruktionsverfahrens, dem *PDZ*, und nicht - wie beim OB-ABC - zufällig erzeugt wird. Die Integration der Losgrößenplanung wirkt sich insofern auf den Kreuzungsoperator aus, als berücksichtigt werden muß, daß die Fitness eines Individuums nicht wie bei der reinen Reihenfolgeplanung nur von den Kantenbeziehungen, sondern aufgrund der unterschiedlichen Lagerkosten der Produktlose auch von den absoluten Positionen der Gene auf dem Chromosom abhängt. Beim CW-ABC werden daher die Belegungsentscheidungen anhand der Lagerkosten getroffen, wenn das Kriterium der Häufigkeit bestimmter Kantenbeziehungen nicht greift. Zudem bedingt die Integration der Losgrößenplanung die zusätzliche Berücksichtigung von Zulässigkeitsbedingungen bei der Erzeugung eines Kindes. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der CW-ABC eine Kantenorientierung mit einer Positionsorientierung kombiniert. Die Losgrößen selbst werden durch den CW-ABC aufgrund der durch die Termine gegebenen strengen Zulässigkeitsbedingungen nicht verändert.¹⁰⁴

Neben der Überprüfung der Zulässigkeit des erzeugten Kindes schließt an die Kreuzung eine Routine zur Bewahrung der Einzigartigkeit jedes Individuums in der Population an.¹⁰⁵ Wird also ein Kind erzeugt, welches bereits in der erzeugenden Population enthalten oder einem in derselben Generation zuvor erzeugten Kind gleich ist, wird das betrachtete Kind nicht in die Kindgeneration aufgenommen und mit der Erzeugung des Kindes von vorn begonnen, solange nicht eine vorzuziehende Anzahl an Wiederholungsversuchen erreicht ist.

Der genetische Algorithmus endet, wenn ein vorzuziehendes Abbruchkriterium erfüllt ist, z. B. in Form einer Zeitbegrenzung oder einer Begrenzung der Anzahl zu erzeugender Generationen.

4.4.3.2 Beschreibung der verwendeten Symbole

Die Menge der Individuenindizes R umfaßt nach Erzeugung der Ausgangspopulation R Individuen, sofern mit dem *PDZ* alle R Individuen erzeugt werden konnten. Das erste zu erzeugende Kind erhält in dem *AGO* den Index $r=R+1$. Zum besseren Verständnis sind alle Symbole, die sich nur auf in dem Evolutionsprozeß erzeugte Individuen und nicht auf Individuen der Ausgangspopulation beziehen können, entsprechend nur für die Indizes $r > R$, $r \in R$, definiert.

¹⁰³ Vgl. Aufsätze von Tsutsui/Ghosh (1998), Eiben/Van Kemenade/Kok (1995), Tsutsui (1998), Eiben/Raué/Ruttkay (1994). Vgl. auch den Überblick über weitere multi-parent-Ansätze bei Eiben (1999).

¹⁰⁴ Das von Brüssau vorgeschlagene Verfahren „Losteilung“ zur simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung teilt ausgehend von einem die Produktarten zunächst jeweils in einem Los einlastenden Belegungsplan die Produktlose auf und ordnet die geteilten Lose Positionen eines genetischen Vektors zu, vgl. Brüssau (2002), S. 156-160 (zu dem Prinzip der Losteilung vgl. auch Zäpfel (2001), S. 181f.) In dem dann angeführten - für den hier betrachteten Fall übertragbaren - Reihenfertigungsproblem aus der Filtertechnik geht Brüssau bei dem Problem entsprechender Gestaltung der Zielfunktion dann allerdings davon aus, daß die einzuplanenden Fertigungsaufträge keine festen Liefertermine haben, sondern nur innerhalb des betrachteten Planungszeitraums gefertigt werden müssen, vgl. Brüssau (2002), S. 178 (und in diesem Zusammenhang auch S. 165, 174).

¹⁰⁵ Vgl. auch Rubin/Ragatz (1995), S. 91.

Indizes

gIndex der Generationen, $g \in G$
 r', r''weitere Individuenindizes, $r', r'' \in R$

Parameter

KAnzahl der zu erzeugenden Individuen in jeder Kindgeneration, [-]
 MAX_VAnzahl der Wiederholungen je Generation bei der Erzeugung eines gleichen oder eines unzulässigen Individuums (Vielfaches von K), [-]
 PAnzahl der Individuen der Elternpopulation, [-]

Variablen/Vektoren

m_iHäufigkeit, mit welcher Produktart i in einer Multimenge Δ_e^+ vorkommt
(Multiplizität von i), $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$, [-]
 $\min_{r'}, \max_{r'}$Grenzen des die Fitness des Individuums r' in einem $[0;1[$ Intervall wider-
spiegelnden Intervalls $[\min_{r'}; \max_{r'}[$, $r' \in R$, [-]
 P', P'', P''', rElemente (Individuen) einer Population
 qVariable, welche die Anzahl der erzeugten und in die Kindgeneration aufge-
nommenen Individuen zählt, $q=1(1)K$, [-]
 r_{mut}^{impl}implizite Mutationsrate, [-]
 uVariable, welche die Anzahl der erzeugten aber nicht in die Kindgeneration
aufgenommenen Individuen zählt, $u=0(1)MAX_V$, [-]
 yLaufvariable für die Schleife zur Fitnessberechnung, $y = 0(1)|P_g| - 1$, $g \in G$
 $W_{gr}(P^{r'})$Wahrscheinlichkeit, daß das Individuum $P^{r'} \in P_g^f$ an der Erzeugung des
Individuums r beteiligt ist, $P^{r'} \in P_g^f$, $r > R$, $r, r' \in R$, $g \in G$, [-]

Mengen

GMenge der Generationenindizes, $G \subset \mathbb{N}$
 I_e^lMenge derjenigen Produktarten $i \in I_{r,a}$, deren Einplanung an der Position e
zu minimalen Lagerkosten führt, $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$
 I_e^mMenge derjenigen Produktarten $i \in \Delta_e^+$, deren Multiplizität m_i maximal ist,
 $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$
 I_e^{ml}Menge derjenigen Produktarten $i \in I_e^m$, deren Einplanung an der Position e
zu minimalen Lagerkosten führt, $e=1(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$
 K_gMenge der erzeugten Individuen in der Generation g , $g \in G$
 P_{END}Endpopulation nach Vereinigung der letzten erzeugten Kindgeneration mit
der Elternpopulation
 P^*Menge der hinsichtlich der Fitness besten gefundenen Individuen,
 $P^* \subset P_{END}$

- P_g Menge der potentiell für die Elternpopulation in dem g -ten Generations-
schritt zur Verfügung stehenden Individuen, $g \in G$
- P_g^f Elternpopulation in der g -ten Generation, P_g^f entspricht einer Teilmenge
von P_g , welche diejenigen Individuen umfaßt, die aufgrund ihrer Fitness-
Werte zur Erzeugung der nächsten Generation in Frage kommen, $g \in G$
- P_{gr}^f aus jeweils vier Elternteilen bestehende Teilmenge zur Erzeugung des Indi-
viduums r in der g -ten Generation, $P_{gr}^f \subset P_g^f$, $r > R$, $r \in R$
- P_{gr}^{\max} Menge derjenigen Individuen aus P_{gr}^f , welche die beste Fitness aufweisen,
 $r > R$, $r \in R$
- Δ_e^+ endliche Multimenge derjenigen Produktarten, welche in der gerade be-
trachteten Menge von zu kreuzenden Eltern auf die in dem Individuum r auf
die Position $e-1$ gesetzte Produktart i folgen, $e=2(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$
- Δ_e^* Teilmenge derjenigen Produktarten aus der Multimenge Δ_e^+ , welche zur
Belegung von e zur Verfügung stehen und somit nur solche Produktarten
umfaßt, die in dem betrachteten Abschnitt noch nicht positioniert wurden,
 $e=2(1)E^r$, $r > R$, $r \in R$

Hilfsfunktionen

- $fitmax(P_g, P)$... gibt aus der Menge P_g die hinsichtlich ihrer Fitness besten P Individuen
zurück
- $nextel(X, x)$ gibt aus der Menge X das relativ zu x nächst größere Element zurück

Definition einer endlichen Multimenge:¹⁰⁶

- A Multimenge
- A_{erz} erzeugende Menge der Multimenge A
- D ganze Zahl, [-]
- a_w wohlunterscheidbare Elemente der Multimenge A , $w=1(1)W$, [-]
- m_w Multiplizität (oder Zähler), des w -ten Elements a_w in der Multimenge A ,
 $w=1(1)W$, [-]
- w Index der Elemente der Multimenge A
- W Anzahl der unterscheidbaren Elemente in der Multimenge A , d. h. Mächtigkeit
der erzeugenden Menge A_{erz} , $W = |A_{erz}|$, [-]

Eine Multimenge ist eine sich von der klassischen, nach *Cantor* definierten Menge¹⁰⁷ in dem Kriterium der Forderung nach Unterscheidbarkeit der Elemente der betrachteten Menge unterscheidende Menge, deren Elemente selbst Multimengen sein können. Symbolisieren a_1, a_2, \dots, a_w im *Cantorschen* Sinne wohlunterscheidbare Elemente, sind m_1, m_2, \dots, m_w positive ganze Zahlen und sind W und m_w , $w = 1(1)W$, endlich, dann kann eine endliche Multimenge A wie folgt beschrieben werden:

¹⁰⁶ Vgl. auch im folgenden Ziegler (1986), S. A1-4.

¹⁰⁷ Vgl. Cantor (1980), S. 282. (Beiträge zur Begründung der transfiniten Mengenlehre, 1. Seite).

$$A = \left\{ \begin{array}{ccc} a_1 & a_2 & a_w \\ m_1 - \text{mal} & m_2 - \text{mal} & m_w - \text{mal} \end{array} \right\} = \{m_1 \cdot a_1, m_2 \cdot a_2, \dots, m_w \cdot a_w\}$$

Die sogenannte Multiplizität (oder auch Zähler) m_w gibt an, wie oft das Element a_w in A vorkommt, $w=1(1)W$. Die Elemente a_w , $w=1(1)W$, heißen erzeugende Elemente der Multimenge A und die Menge $A_{\text{erz}} = \{a_1, \dots, a_w \mid m_w = 1, w=1(1)W\}$, welche jedes erzeugende Element genau einmal enthält, wird als erzeugende Menge von A bezeichnet. A_{erz} ist eine Menge im Cantorschen Sinne. Eine Multimenge mit $m_w \leq D$, $D \in \mathbb{N}$, $w=1(1)W$, wird als D -Multimenge bezeichnet.

4.4.3.3 Erläuterung der einzelnen Schritte des AGO

Der AGO wird durch die folgenden 23 Schritte beschrieben und in die Hauptteile Initialisierungen (Schritte 1–3), Selektion (Schritte 4–8), Kreuzung (Schritte 9–21) und Erzeugung weiterer Individuen und Generationen (Schritte 22–23) gegliedert.

Initialisierung

- 1) Betrachtung der ersten Generation, $g=1$.
- 2) Die mit Hilfe des PDZ ermittelten Individuen P^r , $r=1(1)R$, bilden die Ausgangspopulation P_1 , die zur Erzeugung der ersten Generation zur Verfügung steht, $P_1 = \{P^r \mid r=1(1)R\}$.
- 3) Die zur Erzeugung der Kindgeneration K_1 heranzuziehende Elternpopulation P_1^f wird mit der Ausgangspopulation gleichgesetzt, $P_1^f = P_1$. Initialisierung der Menge der Kinder als leere Menge, $K_1 = \emptyset$. Das Verfahren geht über zu Schritt 7.

Selektion

Stufe 1

Da sich die Fitness eines Individuums in Abhängigkeit von dem schlechtesten Zielfunktionswert aller Individuen in der betrachteten Population berechnet, muß in der ersten Stufe darauf geachtet werden, daß sich die Fitness eines Individuums immer auf die relevante Population bezieht.

- 4) Die Menge der potentiellen Eltern P_g wird als Vereinigungsmenge von der in dem letzten Generationsschritt $g-1$ herangezogenen Elternpopulation P_{g-1}^f und der daraus erzeugten Kindgeneration K_{g-1} gebildet, $P_g = K_{g-1} \cup P_{g-1}^f$. Der Umfang der Elternpopulation ist mit P gegeben und somit in jedem Generationsschritt gleich. Der Umfang der

Kindgeneration K_{g-1} ist davon abhängig, wie viele zulässige Individuen in $g-1$ erzeugt werden konnten. Demzufolge kann auch $|P_g|$ von Generation zu Generation variieren.

- 5) Berechnung nicht nur der Fitness der Individuen $P^r \in K_{g-1}$, sondern auch die der Individuen $P^r \in P_{g-1}^f$ nach der Vereinigung beider Mengen zu der Menge P_g ,
 $fit(P^r) = Z^{\max} - Z(P^r)$, $P^r \in P_g$, mit $Z^{\max} = \max\{Z(P^r) \mid P^r \in P_g\}$.
- 6) Die Elternpopulation P_g^f wird aus der Menge der potentiellen Eltern P_g gebildet, indem der Menge P_g^f die hinsichtlich ihrer Fitness besten P Individuen $P^r \in P_g$ zugewiesen werden, $P_g^f = fitmax(P_g, P)$.

Stufe 2

Die Bildung einer aus vier Elternteilen bestehenden Menge zur Erzeugung eines neuen Individuums erfolgt mit von der Fitness abhängiger Wahrscheinlichkeit.¹⁰⁸ Die Auswahl erfolgt als zufällige Stichprobe mit variierenden Auswahlwahrscheinlichkeiten.¹⁰⁹

- 7) Wenn es sich bei der betrachteten Generation um die erste handelt, $g=1$, wird das zu erzeugende Individuum mit $r=R+1$ indiziert.¹¹⁰ Ansonsten erfolgt die Indizierung mit dem größten in der Population P_g^f vorkommenden Index+1, $r := \max_{R} + 1$. Initialisierung der die Anzahl der Wiederholungsversuche in der betrachteten Generation zählenden Variable, $u=0$, und der die Anzahl der zu erzeugenden Individuen zählenden Laufvariablen, $q=1$.
- 8) Aus der Menge P_g^f werden über ein Zufallsverfahren vier Elemente zur Erzeugung des Individuums r gezogen und in der Menge P_{gr}^f zusammengefaßt, wobei ausgeschlossen wird, daß dasselbe Individuum mehrfach in P_{gr}^f vorkommt.¹¹¹ Das Zufallsverfahren funktioniert wie folgt: Jedem Individuum $P^{r'} \in P_g^f$ wird eindeutig ein Intervall

$$[\min_{r'}; \max_{r'}[\subset [0;1[\text{ zugeordnet mit } \max_{r'} = \frac{\sum_{r'' \in P_g^f \wedge r'' \leq r'} fit(P^{r''})}{\sum_{r \in P_g^f} fit(r)} \text{ und}$$

¹⁰⁸ Durch die vorgenommene zweistufige Selektion ist die eindeutige Zuordnung der im englischen Original verwendeten Begriffe schwierig. Die proportionale Abhängigkeit (*fitness proportional reproduction*) ist sowohl in der ersten Stufe direkt ohne die Verwendung von Wahrscheinlichkeiten gegeben, als auch in der zweiten Stufe der Auswahl der zur Erzeugung eines Kindes heranzuziehenden Elternteile mit von der Fitness abhängigen Wahrscheinlichkeiten. Zur Selektion mit von der Fitness abhängiger Wahrscheinlichkeit in einem Schritt vgl. z. B. Starkweather/Whitley/Cookson (1992), S. 570, Lima et al. (1996), S. 208, Potvin/Guertin (1997), S. 430. Die zweite Stufe der hier vorgenommenen zweistufigen Selektion kann als *fitness based scanning* bezeichnet werden. Vgl. hierzu Eiben (1999), S. 490.

¹⁰⁹ In Abgrenzung zur *systematischen Stichprobe mit variierenden Auswahlwahrscheinlichkeiten*, vgl. hierzu Ladders (1998), S. 56.

¹¹⁰ Dies erfolgt in Anlehnung an die Definition der Symbole für $r > R$ (vgl. 4.4.3.2 v. A.) und stellt somit sicher, daß die Symbole auch dann definiert sind, wenn mit dem PDZ nicht alle R Individuen erzeugt werden konnten.

¹¹¹ Dies ist bei der *systematischen Stichprobe mit variierenden Auswahlwahrscheinlichkeiten* nicht gewährleistet.

$$\min_{r'} = \max_{r'} - \frac{fit(P^{r'})}{\sum_{r \in P_g^f} fit(r)}$$

Durch einen Zufallszahlengenerator, der mit gleicher Wahrscheinlichkeit in dem Intervall $[0;1[$ Zahlen erzeugt, wird dann ein Intervall und somit ein Element aus P_g^f mit zu der Fitness proportionaler Wahrscheinlichkeit selektiert. Für die jeweils nachfolgend auszuwählenden Elemente werden schon gezogene Elemente aus P_g^f entfernt und die Intervalle für die verkleinerte Menge neu bestimmt.

Berechnung der Selektionswahrscheinlichkeit

Die Selektionswahrscheinlichkeit $W_{gr}(P^{r'})$ des Individuums $P^{r'} \in P_g^f$ zur Erzeugung des Individuums r herangezogen zu werden, berechnet sich als Summe der disjunkten Ereignisse beim ersten, zweiten, dritten oder vierten Mal selektiert zu werden. Beschreiben P', P'', P''' jeweils das beim ersten, zweiten und dritten Mal selektierte Individuum, dann berechnet sich $W_{gr}(P^{r'})$ wie folgt:

Wahrscheinlichkeit, daß $P^{r'}$ beim ersten Mal gezogen wird

- + Summe der Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ereignisse der ersten Ziehung unter Ausschluß des Individuums $P^{r'}$, multipliziert mit dem Ereignis, daß $P^{r'}$ beim zweiten Mal gezogen wird
- + Summe der Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ereignisse der zweiten Ziehung unter jeweiligem Ausschluß der Individuen $P^{r'}$ und P' , multipliziert mit allen möglichen Ereignissen der ersten Ziehung und dem Ereignis, daß $P^{r'}$ beim dritten Mal gezogen wird
- + Summe der Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ereignisse der dritten Ziehung unter jeweiligem Ausschluß der Individuen $P^{r'}$, P' und P'' , multipliziert mit allen möglichen Ereignissen der ersten und der zweiten Ziehung und dem Ereignis, daß $P^{r'}$ beim vierten Mal gezogen wird:

$$\begin{aligned} W_{gr}(P^{r'}) &= \frac{fit(P^{r'})}{\sum_{r \in P_g^f} fit(r)} \\ &+ \sum_{P \in P_g^f \setminus \{P^{r'}\}} \frac{fit(P)}{\sum_{r \in P_g^f} fit(r)} \cdot \frac{fit(P^{r'})}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P\}} fit(r)} \\ &+ \sum_{P \in P_g^f \setminus \{P^{r'}\}} \sum_{P'' \in P_g^f \setminus \{P^{r'}, P'\}} \frac{fit(P)}{\sum_{r \in P_g^f} fit(r)} \cdot \frac{fit(P')}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P\}} fit(r)} \cdot \frac{fit(P^{r'})}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P, P''\}} fit(r)} \\ &+ \sum_{P \in P_g^f \setminus \{P^{r'}\}} \sum_{P'' \in P_g^f \setminus \{P^{r'}, P'\}} \sum_{P''' \in P_g^f \setminus \{P^{r'}, P', P''\}} \frac{fit(P)}{\sum_{r \in P_g^f} fit(r)} \cdot \frac{fit(P')}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P\}} fit(r)} \cdot \frac{fit(P'')}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P, P''\}} fit(r)} \cdot \frac{fit(P^{r'})}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P, P', P''\}} fit(r)} \\ &= \frac{fit(P^{r'})}{\sum_{r \in P_g^f} fit(r)} \cdot \left(1 + \sum_{P \in P_g^f \setminus \{P^{r'}\}} \frac{fit(P)}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P\}} fit(r)} \left(1 + \sum_{P'' \in P_g^f \setminus \{P^{r'}, P'\}} \frac{fit(P')}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P, P''\}} fit(r)} \left(1 + \sum_{P''' \in P_g^f \setminus \{P^{r'}, P', P''\}} \frac{fit(P''')}{\sum_{r \in P_g^f \setminus \{P, P', P''\}} fit(r)} \right) \right) \right) \end{aligned}$$

Kreuzung (CW-ABC)

Der CW-ABC ist ein mit der Belegung der ersten Position des zu erzeugenden Kindvektors beginnender, abschnittsweise und innerhalb der Abschnitte positionsweise vorgehender Kreuzungsoperator. Die Basis für die Belegung des Ablaufvektors E^r des zu erzeugenden Individuums r bilden die Ablaufvektoren $E^{r'}$ der Elternindividuen $P^{r'} \in P_{gr}^f$. Zunächst wird aus der Menge P_{gr}^f dasjenige Individuum, welches die beste Fitness aufweist, als sogenanntes Orientierungselternteil P^{r*} bestimmt. Die Funktion des Orientierungselternteils besteht darin, zu gewährleisten, daß die Kreuzung der verschiedenen Elternteile wieder hinsichtlich der hergestellten Mengen zu zulässigen Lösungen führt. Dies ist erforderlich, da die Losgrößen der einzelnen Produktarten der verschiedenen Abschnitte sich in den Elternteilen voneinander unterscheiden. Die Menge der in jedem Abschnitt a des Individuums r einzuplanenden Produktarten $I_{r,a}$ entspricht der Menge $I_{r*,a}$ des Orientierungselternteils, analog die zugehörigen Losgrößen. Die Aufgabe des CW-ABC besteht also darin, die Produktlose in dem Individuum anzuordnen, nicht die Losgrößen zu variieren.

Für jede Produktart $i \in I_{r,a}$ und für die jeweils auf der letzten Position in dem Kindvektor des zuletzt betrachteten Abschnitts positionierte Produktart wird die Multimenge aus denjenigen Produktarten gebildet, die in den beteiligten Eltern auf die betrachtete Produktart unmittelbar folgen. Bei der Belegung der jeweils nächsten Position des Kindvektors erhält die in der Multimenge am häufigsten vorkommende Produktart höchste Priorität. Ist eine eindeutige Belegung anhand der Häufigkeit nicht möglich, wird diejenige mit den geringsten Lagerkosten gewählt, und wenn auch dieses Kriterium nicht eindeutig ist, wird eine Produktart zufällig ausgewählt. Sind alle Positionen eines Abschnitts belegt, wird mit der Belegung des jeweils nächsten Abschnitts des zu erzeugenden Kindvektors fortgefahren, bis alle Positionen des Ablaufvektors E^r belegt sind.

9) Bestimmung des Orientierungselternteils P^{r*} :

Als Orientierungselternteil dient dasjenige Individuum $P^{r'} \in P_{gr}^f$ mit der besten Fitness.

Die Menge P_{gr}^{\max} der Individuen mit der jeweils besten Fitness wird gemäß

$P_{gr}^{\max} = \arg \max \left\{ \text{fit}(P^{r'}) \mid P^{r'} \in P_{gr}^f \right\}$ bestimmt. Ist die Menge P_{gr}^{\max} einelementig,

$|P_{gr}^{\max}| = 1$, wird dieses eine in P_{gr}^{\max} enthaltene Individuum als Orientierungselternteil

P^{r*} herangezogen. Ist das Kriterium der besten Fitness nicht eindeutig, $|P_{gr}^{\max}| > 1$, wird

ein Individuum aus der Menge P_{gr}^{\max} mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig als

Orientierungselternteil bestimmt, $P^{r*} = \text{random}(P_{gr}^{\max})$.

10) Initialisierung der ersten Position des Kindvektors, $e = 1$, und Belegung mit der Produktart 0, $E_1^r = 0$. Initialisierung des Abschnittszählers, $a=1$ (da die Lagerbestände zu Fertigungsbeginn 0 betragen, muß der Abschnitt $a=1$ in jedem Ablaufvektor und somit auch in dem des Orientierungselternteils existieren).

- 11) Zuweisung der Menge der Produktarten in dem Abschnitt a des Orientierungselternteil zu der Menge der in dem betrachteten Individuum r einzuplanenden Produktarten, $I_{r,a} = I_{r^*,a}$.
- 12) Inkrementieren der Positionen des Ablaufvektors $e := e + 1$, und Zuweisen der Position e zu der Position des Abschnittsanfangs, $e_{r,a}^A = e$, sowie Bestimmung der Position des Abschnittsendes des aktuellen Abschnitts a auf dem zu belegenden Kindvektor E^r , $e_{r,a}^\Omega = e_{r,a}^A + (|I_{r,a}| - 1)$.
- 13) Erzeugung der Multimenge Δ_e^+ :

Die Multimenge Δ_e^+ umfaßt diejenigen Produktarten, die in den Elternindividuen $P^{r'} \in P_{gr}^f$ in dem Abschnitt a auf diejenige Produktart folgen, welche in dem zu erzeugenden Individuum r auf $e-1$ positioniert ist, sofern der Abschnitt a in dem Elternteil existiert, $\Delta_e^+ = \left\{ E_{e'}^{r'} \mid E_{e'-1}^{r'} = E_{e-1}^r, e' \in \{e_{r',a}^A, \dots, e_{r',a}^\Omega\}, I_{r',a} \text{ existiert}, P^{r'} \in P_{gr}^f \right\}$.

Jede Produktart, die in mindestens einem der Elternteile $P^{r'} \in P_{gr}^f$ auf die in dem Individuum auf die $e-1$ positionierte Produktart folgt, ist erzeugendes Element der Multimenge Δ_e^+ . Hierbei handelt es sich um eine 4-Multimenge, da P_{gr}^f vier Elternteile enthält, und somit eine bestimmte paarweise Losfolge in der Menge P_{gr}^f höchstens viermal vorkommen kann.

- 14) Ist die Multimenge Δ_e^+ leer, $\Delta_e^+ = \emptyset$, geht das Verfahren über zu Schritt 17. Die Multimenge Δ_e^+ kann allerdings immer nur dann leer sein, wenn nicht der erste Abschnitt betrachtet wird, $a > 1$, es sich bei der aktuellen Positionsbelegung um die erste in dem Abschnitt zu belegende Position handelt, und die letzte Position des vorherigen Abschnitts in dem Kindstring mit einer Produktart belegt ist, die in der Menge der in dem betrachteten Abschnitt einzuplanenden Produktarten $i \in I_{r,a}$ nicht vorkommt.

Ansonsten, $\Delta_e^+ \neq \emptyset$, wird aus der Multimenge Δ_e^+ die Menge Δ_e^* derjenigen Produktarten gebildet, welche auf keiner der Position e vorangehenden Position in dem a -ten Abschnitt bereits eingeplant sind. Handelt es sich bei der betrachteten Position um die erste in dem Abschnitt zu belegende Position, $e = e_{r,a}^A$, entspricht $\Delta_e^* = \Delta_e^+$. Ansonsten, $e > e_{r,a}^A$, entspricht $\Delta_e^* = \Delta_e^+ \setminus \left\{ E_{e'}^{r'} \mid e' = e_{r,a}^A (1)e - 1 \right\}$. Ist die Menge Δ_e^* leer, $\Delta_e^* = \emptyset$, geht das Verfahren über zu Schritt 17. Ist die Menge Δ_e^* einelementig, $|\Delta_e^*| = 1$, wird die Position e mit dieser einen in Δ_e^* enthaltenen Produktart belegt, und das Verfahren geht über zu Schritt 18. Ansonsten, $|\Delta_e^*| > 1$, geht das Verfahren weiter zu Schritt 15.

- 15) Aus der Multimenge Δ_e^* und der Menge der in dem betrachteten Individuum r in dem Abschnitt a einzuplanenden Produktarten $I_{r,a}$ werden die Schnittmenge gebildet und hieraus diejenigen Produktarten bestimmt, deren Multiplizität maximal ist,

$$I_e^m = \arg \max \{m_i \mid i \in \Delta_e^* \cap I_{r,a}\}.$$
 Trifft dies auf genau eine Produktart zu, $|I_e^m| = 1$, wird die Position e mit dieser einen in I_e^m enthaltenen Produktart belegt. Das Verfahren geht über zu Schritt 18. Ansonsten, $|I_e^m| > 1$, geht das Verfahren weiter zu Schritt 16.
- 16) Aus der Menge I_e^m wird die Menge derjenigen Produktarten bestimmt, deren Einplanung an der Position e zu minimalen Lagerkosten pro [ZE] führt, wobei berücksichtigt wird, daß die Einplanung mit der Losgröße des Orientierungselternteils erfolgt,

$$I_e^{ml} = \arg \min \left\{ N_{e'}^{r*} \cdot k_{E_{e'}^{r*}} \mid E_{e'}^{r*} = i, e' \in \{e_{r',a}^A, \dots, e_{r',a}^\Omega\}, i \in I_e^m \right\}.$$
 Ist diese Menge einelementig, $|I_e^{ml}| = 1$, wird die Position e mit dieser einen in I_e^{ml} enthaltenen Produktart belegt. Ansonsten, $|I_e^{ml}| > 1$, wird aus der Menge I_e^{ml} eine Produktart mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt und eingeplant, $E_e^r = \text{random}(I_e^{ml})$. Das Verfahren geht über zu Schritt 18.
- 17) Ist die Menge Δ_e^+ oder Δ_e^* leer, werden aus der Menge der in diesem Abschnitt noch nicht zugeordneten Produktarten diejenigen bestimmt, deren Einplanung an der Position e zu minimalen Lagerkosten pro [ZE] führt,

$$I_e^l = \arg \min \left\{ N_{e'}^{r*} \cdot k_{E_{e'}^{r*}} \mid E_{e'}^{r*} = i, e' \in \{e_{r',a}^A, \dots, e_{r',a}^\Omega\}, i \in I_{r,a} \setminus \{E_{e'}^r \mid e' = e_{r,a}^A(1)e - 1\} \right\}.$$
 Ist diese Menge einelementig, $|I_e^l| = 1$, wird die Position e mit dieser einen in I_e^l enthaltenen Produktart belegt. Ansonsten wird aus der Menge I_e^l eine Produktart mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt und eingeplant, $E_e^r = \text{random}(I_e^l)$.

Implizite Mutation

Implizite Mutation tritt immer dann auf, wenn Schritt 17 zur Anwendung kommt, d. h., es wird in dem Individuum eine Kante erzeugt, die in keinem der beteiligten Eltern auftritt.

Die implizite Mutationsrate r_{mut}^{iml} berechnet sich als Summe der Anzahl der Anwendungen von Schritt 17 dividiert durch die Summe der Vektorlängen bzw. der Gene über alle erzeugten Individuen einer Generation. Die experimentellen Analysen zeigen, daß die implizite Mutationsrate im Durchschnitt bei ca. 0,5 beginnt und sich im Verlauf des Evolutionsprozesses auf 0,05 reduziert (vgl. hierzu Kapitel 5.2.3). In Kombination mit dem CW-ABC erübrigt sich aufgrund der hohen impliziten Mutation die zusätzliche Anwendung eines heuristischen Mutationsoperators. Auf einen stochastischen Mutationsopera-

tor¹¹² wird aufgrund der komplexen Planungssituation und der damit verbundenen Schwierigkeit, immer wieder zulässige Lösungen zu erzeugen, verzichtet.

Beispiel CW-ABC:

Das Beispiel veranschaulicht den Prozeß der Belegungsentscheidung beim CW-ABC. Beschrieben wird der Kreuzungsvorgang bei der Belegung des ersten Abschnitts $a=1$ des Individuums r in Generation g . Auf die erste Position in dem Kindvektor wird die Produktart 0 eingeplant. Gegeben ist eine bereits selektierte aus vier Elternteilen bestehende Menge P_{gr}^f . Die betrachteten Abschnitte der einzelnen Individuen stellen Anordnungen von 9 zu fertigenden Produktarten dar, $I_{r,1} = \{1, \dots, 9\}$.

Elternmenge und zugehörige Abschnitte der Ablaufvektoren:

$$P_{gr}^f = \{P^1, P^2, P^3, P^4\},$$

$$E^1 : 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 8 \ 9 \ 1 \ 4 \ 7 | 2$$

$$E^2 : 3 \ 4 \ 2 \ 1 \ 6 \ 8 \ 7 \ 5 \ 9 | 3$$

$$E^3 : 1 \ 4 \ 3 \ 6 \ 7 \ 8 \ 5 \ 9 \ 2 | 1$$

$$E^4 : 3 \ 4 \ 2 \ 1 \ 8 \ 5 \ 7 \ 6 \ 9 | 3$$

~~1 4 4 4 2 4 4 4 3 1 2 3~~
 $a=1$

P^2 ist das Individuum mit der besten Fitness und wird somit als Orientierungselternteil bestimmt. Die Stücklagerkostensätze und die Losgrößen der Produktarten $i \in I_{2,1}$ in dem Abschnitt 1 des Orientierungselternteils werden hier als k_i und N_i bezeichnet und sind folgender Tabelle zu entnehmen:

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N_i	0	100	200	300	200	100	200	150	200	150
k_i	0	10	9	8	7	6	5	4	3	2

1. Belege die erste Position $e = 1$ mit der fiktiven Produktart 0, $E_1^f = 0$.
2. Belege die zweite Position $e = 2$:
 - Die der betrachteten Position unmittelbar vorangehende Position $e = 1$ ist mit der Produktart 0 belegt.
 - Die Multimengen Δ_e^+ und Δ_e^* der auf $e-1$ positionierten Produktart 0 sind identisch: $\Delta_e^+ = \Delta_e^*$, $\Delta_e^* = \{1, 2, 3, 3\}$.
 - Einplanung der Produktart 3 anhand des Kriteriums der maximalen Multiplizität, $m_3 = 2 > m_2 = m_1 = 1$, $E_2^f = 3$.

\Rightarrow Ablaufvektor $E^f : 0 \ 3 \ * \ * \ * \ * \ * \ * \ * \ * \ *$
3. Die Belegung der Positionen 3 bis 5 erfolgt analog:

\Rightarrow Ablaufvektor $E^f : 0 \ 3 \ 4 \ 2 \ 1 \ * \ * \ * \ * \ *$

¹¹² So hat z. B. *Mattfeld* zusätzlich zu dem Auftreten impliziter Mutation eine relativ niedrige stochastische Mutationsrate von 0,03 angesetzt, vgl. *Mattfeld* (1996), S. 102. Vgl. hierzu auch *Stöppler/Bierwirth* (1992), S. 168 f.

4. Belege die sechste Position, $e=6$:

- Die der betrachteten Position unmittelbar vorangehende Position $e-1$ ist mit der Produktart 1 belegt.
- Die Multimengen Δ_e^+ und Δ_e^* der Produktart 1 sind nicht identisch, $\Delta_e^+ = \{4,4,6,8\}$, $\Delta_e^* = \{6,8\}$, da die Produktart 4 bereits positioniert wurde und somit nicht mehr zur Verfügung steht.
- Einplanung anhand der maximalen Multiplizität ist nicht eindeutig, da $m_6 = m_8 = 1$.
- Einplanung der Produktart 8 anhand des Kriteriums der minimalen Lagerkosten von denjenigen Produktarten, deren Multiplizität in der Multimenge Δ_e^* maximal ist, $k_8 \cdot N_8 = 3[\text{GE/ME} \cdot \text{ZE}] \cdot 200[\text{ME}] = 600[\text{GE}] < k_6 \cdot N_6 = 5[\text{GE/ME} \cdot \text{ZE}] \cdot 200[\text{ME}] = 1000[\text{GE}]$
d. h. $E_6^r = 8$.

\Rightarrow Ablaufvektor $E^r : 0\ 3\ 4\ 2\ 1\ 8\ *\ *\ *\ *$.

5. Die Belegung der Positionen 7 und 8 erfolgt analog zu 2 bis 5:

\Rightarrow Ablaufvektor $E^r : 0\ 3\ 4\ 2\ 1\ 8\ 5\ 9\ *\ *$.

6. Belege die neunte Position, $e=9$:

- Die der betrachteten Position unmittelbar vorangehende Position $e-1$ ist mit der Produktart 9 belegt.
- Die Multimengen Δ_e^+ und Δ_e^* der auf $e-1$ positionierten Produktart 9 sind nicht identisch, $\Delta_e^+ = \{1,2\}$, $\Delta_e^* = \emptyset$, da die Produktarten 1 und 2 bereits positioniert wurden und somit nicht mehr zur Verfügung stehen.
- Einplanung der Produktart 7 anhand des Kriteriums der minimalen Lagerkosten von denjenigen Produktarten, die noch nicht positioniert wurden, $k_7 \cdot N_7 = 4[\text{GE/ME} \cdot \text{ZE}] \cdot 150[\text{ME}] = 600[\text{GE}] < k_6 \cdot N_6 = 5[\text{GE/ME} \cdot \text{ZE}] \cdot 200[\text{ME}] = 1000[\text{GE}]$
d. h. $E_9^r = 7$.

\Rightarrow Ablaufvektor $E^r : 0\ 3\ 4\ 2\ 1\ 8\ 5\ 9\ 7\ *$.

7. Belege die zehnte Position, $e=10$:

- Die der betrachteten Position unmittelbar vorangehende Position $e-1$ ist mit der Produktart 7 belegt.
- Die Belegung der Position 10 erfolgt mit der Produktart 6, da die Multimenge Δ_e^* der auf $e-1$ positionierten Produktart 7 nur noch diese eine Produktart umfaßt, $\Delta_e^* = \{6\}$,
d. h. $E_{10}^r = 6$.

\Rightarrow Ablaufvektor $E^r : 0\ 3\ 4\ 2\ 1\ 8\ 5\ 9\ 7\ 6$.

Die folgende Tabelle zeigt den Abschnitt 1 des Individuums r nach den einzelnen Belegungsschritten und in welchem Verfahrensschritt die Entscheidung für die Belegung getroffen wird, wobei diejenigen Positionen, die nach einem Belegungsschritt noch nicht beplant sind, mit * belegt werden:

e	Entscheidung in Verfahrensschritt	Abschnitt 1 des Vektors E^r nach dem e -ten Belegungsschritt
2	15	3 * * * * * * *
3	15	3 4 * * * * * * *
4	15	3 4 2 * * * * * * *
5	15	3 4 2 1 * * * * * * *
6	16	3 4 2 1 8 * * * * * *
7	15	3 4 2 1 8 5 * * * * * *
8	15	3 4 2 1 8 5 9 * * * * * *
9	17	3 4 2 1 8 5 9 7 * * * * * *
10	15	3 4 2 1 8 5 9 7 6 * * * * * *

Ende Beispiel CW-ABC.

18) Der auf e positionierten Produktart E_e^r wird die Losgröße dieser Produktart in dem Abschnitt a des Orientierungselternteils zugewiesen,

$$N_e^r = N_{e'}^{r*}, \text{ wobei } E_{e'}^{r*} = E_e^r \text{ und } e' \in \{e_{r',a}^A, \dots, e_{r',a}^\Omega\}. \text{ Für das auf } e \text{ eingeplante}$$

$$\text{Produktlos wird das Fertigungsende berechnet, } F_e^r = \sum_{e'=2}^e \left(t_{E_{e'-1}^r E_e^r} + c_{E_e^r} \cdot (N_{e'}^r - 1) \right).$$

19) Solange nicht die letzte Position in dem betrachteten Abschnitt belegt ist, $e < e_{r,a}^\Omega$, wird die nächste Position betrachtet, $e := e + 1$. Das Verfahren geht zurück zu Schritt 13.

20) Wenn der betrachtete Abschnitt nicht der letzte der zu betrachtenden Abschnitte ist, $a < \max_{A_{r*}}$, wird der nächste Abschnitt bestimmt, $a := nextel(A_{r*}, a)$. Das Verfahren geht zurück zu Schritt 11. Sonst, $a = \max_{A_{r*}}$, wird die Vektorposition inkrementiert und mit der

fiktiven Produktart 0 belegt, $e := e + 1$, $E_e^r = 0$. Die Position e entspricht der Länge des Ablaufvektors, $E^r = e$.

21) Zulässigkeitsprüfung:

a) Ist das erzeugte Individuum mit keinem Individuum der Elterpopulation identisch, $P^r \neq P^{r'}$, $P^{r'} \in P_g^f$, geht das Verfahren weiter zu b), sonst zu f).

b) Initialisierung des Aktualisierungszählers und des aktuellen Zeitpunkts, $n=1$, $t_1^{\text{akt}} = 0$.

c) Zuweisung des Aktualisierungszählers zu dem Abschnittszähler, $a=n$. Es wird geprüft, ob die in dem Individuum r erzeugte Reihenfolge hinsichtlich der Einhaltung der Termine zulässig ist. Welcher Termin jeweils zu betrachten ist, ist für jedes n mit t_n^{min} bekannt.

$$\text{Wenn } t_n^{\text{akt}} + \sum_{e=e_{r,a}^A}^{e_{r,a}^\Omega} \left(t_{E_{e-1}^r E_e^r} + c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1) \right) > t_n^{\text{min}}, \text{ geht das Verfahren über zu f),}$$

sonst weiter zu d).

$$d) \text{ Wenn } n < t, t_{n+1}^{\text{akt}} = t_n^{\text{akt}} + \sum_{e=e_{r,a}^A}^{\Omega} \left(t_{E_{e-1}^r E_e^r} + c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1) \right).$$

Bestimmung der nächsten Aktualisierung, für die ein Abschnitt existiert, $n = \text{nextel}(A_{r,*}, a)$. (Da sich die Abschnittsindizes des erzeugten Individuums r nicht von denen des Orientierungselternteils unterscheiden, kann hier auf die Menge $A_{r,*}$ zugegriffen werden, um den nächsten zu betrachtenden Abschnitt zu ermitteln.)

Das Verfahren geht zurück zu c)

Sonst, d. h. $n = t$, $t_n^{\text{akt}} := t_n^{\text{akt}} + t_{E_{e-1}^r} 0$. Das Verfahren geht weiter zu e).

- e) Das erzeugte Individuum P^r ist zulässig und mit keinem Individuum aus P_g^f identisch. Auf den Ablaufvektor E^r wird der Time-Opt-Operator (vgl. Schritt 24 im PDZ) angewandt, um die jeweiligen Zeitpunkte des Fertigungsendes und des Fertigungsbeginns der Produktlose neu zu positionieren, und der Zielfunktionswert $Z(P^r)$ berechnet, wobei zur Berechnung der Lagerungskosten die Lagerbestände des Orientierungselternteils herangezogen werden können (zur Fitness-Berechnung vgl. Schritt 26 im PDZ). Die Erzeugung des Individuums P^r ist abgeschlossen. P^r wird in die Menge K_g aufgenommen, $K_g := K_g \cup \{P^r\}$, und der Index r der Menge der Indizes hinzugefügt, $R := R \cup \{r\}$. Das Verfahren geht über zu Schritt 22.
- f) Das erzeugte Individuum P^r ist nicht zulässig oder mit mindestens einem Individuum $P^r \in P_g^f$ identisch. P^r wird nicht in die Menge K_g aufgenommen. Ist die Anzahl der maximalen Wiederholungen in der betrachteten Generation noch nicht überschritten, $u < \text{MAX_V}$, wird u inkrementiert, $u := u + 1$, und die Menge der zur Erzeugung des Individuums heranzuziehenden Eltern P_{gr}^f erneut selektiert, d. h. das Verfahren geht zurück zu Schritt 8. Ist die Anzahl der Wiederholungsversuche in der betrachteten Generation bereits erreicht, $u = \text{MAX_V}$, wird die Erzeugung der Generation g abgebrochen. Das Verfahren geht über zu Schritt 23.

Erzeugung weiterer Individuen und Generationen

- 22) Solange nicht alle Individuen erzeugt sind, $q < K$, wird das nächste Individuum betrachtet, $r := r + 1$, und die die Anzahl der zu erzeugenden Individuen zählende Laufvariable inkrementiert, $q := q + 1$. Das Verfahren geht zurück zu Schritt 8. Ansonsten, $q = K$ ist die Erzeugung der Generation g abgeschlossen. Das Verfahren geht weiter zu Schritt 23.
- 23) Solange ein vorzugebendes Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, wird die nächste Generation betrachtet, $g := g + 1$. Das Verfahren geht zurück zu Schritt 4. Ansonsten wird die Endpopulation durch Vereinigung der zuletzt erzeugten Kindgeneration und der Elternpopulation gebildet, $P_{\text{END}} = K_g \cup P_g^f$, und die Fitness der Individuen berechnet, $\text{fit}(P^r) = Z^{\text{max}} - Z(P^r)$, $P^r \in P_{\text{END}}$, mit $Z^{\text{max}} = \max \{ Z(P^r) \mid P^r \in P_{\text{END}} \}$.

Die Individuen mit der besten Fitness aus der Menge P_{END} stellen die Menge der besten gefundenen Lösungen dar, $P^* = \arg \max \{ \text{fit}(P^r) \mid P^r \in P_{\text{END}} \}$. Das Verfahren endet.

4.4.3.4 AGO als Pseudokode

Der Pseudokode zur Darstellung des AGO ist in gleicher Weise wie der Pseudokode zur Darstellung des PDZ in Abschnitt 4.4.2.5 aufgebaut.

1. Setze $g=1$.
2. Bilde die Ausgangspopulation P_1 als Menge von Individuen, die mit dem PDZ erzeugt wurden, $P_1 = \{P^r \mid r=1(1)R\}$.
3. Initialisiere $P_1^f = P_1$, $K_1 = \emptyset$, und gehe über zu Schritt 7.
4. Bilde die Vereinigungsmenge $P_g = K_{g-1} \cup P_{g-1}^f$.
5. Berechne $Z^{\max} = \max \{Z(P^r) \mid P^r \in P_g\}$, setze $r=0$.
Für $(y = 0, y < |P_g|, r := \text{nextel}(R, r))$, $\text{fit}(P^r) = Z^{\max} - Z(P^r)$.
6. Bestimme die Menge $P_g^f = \text{fitmax}(P_g, P)$.
7. Wenn $g=1$, dann $r=R+1$.
Sonst, $r = \max_{R} + 1$.
Initialisiere $u=0, q=1$.
8. Erzeuge die Menge P_{gr}^f aus der Menge P_g^f mit zu der Fitness der Individuen proportionaler Wahrscheinlichkeit.
9. Bestimme $P_{gr}^{\max} = \arg \max \{ \text{fit}(P^{r'}) \mid P^{r'} \in P_{gr}^f \}$, sowie
 $P^{r*} = \text{random}(P_{gr}^{\max})$.
10. Initialisiere $e=1, a=1$, belege $E_1^r = 0$.
11. Setze $I_{r,a} = I_{r*,a}$.
12. Inkrementiere $e := e + 1$, setze $e_{r,a}^A = e$, $e_{r,a}^\Omega = e_{r,a}^A + (|I_{r,a}| - 1)$.
13. Erzeuge die Multimenge Δ_e^+ gemäß
$$\Delta_e^+ = \left\{ E_{e'}^{r'} \mid E_{e'-1}^{r'} = E_{e-1}^r, e' \in \{e_{r',a}^A, \dots, e_{r',a}^\Omega\}, I_{r',a} \text{ existiert}, P^{r'} \in P_{gr}^f \right\}.$$
14. Wenn $\Delta_e^+ = \emptyset$, dann gehe über zu Schritt 17.
Sonst
{
 Wenn $e = e_{r,a}^A$, dann $\Delta_e^* = \Delta_e^+$
 Sonst, $\Delta_e^* = \Delta_e^+ \setminus \{E_{e'}^{r'} \mid e' = e_{r,a}^A(1)e - 1\}$
 Wenn $\Delta_e^* = \emptyset$, dann gehe über zu Schritt 17.

- Sonst
 {
 wenn $|\Delta_e^*| = 1$, dann
 {
 $E_e^r = \text{random}(\Delta_e^*)$
 gehe über zu Schritt 18
 }
 }
 }
15. Bestimme $I_e^m = \arg \max \{m_i | i \in \Delta_e^* \cap I_{r,a}\}$.
 Wenn $|I_e^m| = 1$, dann
 {
 $E_e^r = \text{random}(I_e^m)$
 gehe über zu Schritt 18
 }
16. Bestimme $I_e^{ml} = \arg \min \left\{ N_{e'}^{r^*} \cdot k_{E_{e'}^{r^*}} \mid E_{e'}^{r^*} = i, e' \in \{e_{r,a}^A, \dots, e_{r,a}^\Omega\}, i \in I_e^m \right\}$, sowie
 $E_e^r = \text{random}(I_e^{ml})$.
 Gehe über zu Schritt 18.
17. Bestimme
 $I_e^l = \arg \min \left\{ N_{e'}^{r^*} \cdot k_{E_{e'}^{r^*}} \mid E_{e'}^{r^*} = i, e' \in \{e_{r,a}^A, \dots, e_{r,a}^\Omega\}, i \in I_{r,a} \setminus \{E_{e'}^r \mid e' = e_{r,a}^A(1)e - 1\} \right\}$,
 sowie $E_e^r = \text{random}(I_e^l)$.
18. Setze $N_e^r = N_{e'}^{r^*}$, wobei $E_{e'}^{r^*} = E_e^r$ und $e' \in \{e_{r,a}^A, \dots, e_{r,a}^\Omega\}$, und berechne

$$F_e^r = \sum_{e'=2}^e \left(t_{E_{e'-1}^r E_e^r} + c_{E_e^r} \cdot (N_{e'}^r - 1) \right).$$
19. Wenn $e < e_{r,a}^\Omega$, dann
 {
 $e := e + 1$
 gehe zurück zu Schritt 13
 }
20. Wenn $a < \max_{A_r^*}$, dann
 {
 $a := \text{nextel}(A_r^*, a)$
 gehe zurück zu Schritt 11
 }
- Sonst
 {
 $e := e + 1$
 $E_e^r = 0$
 $E^r = e$
 }
21. a) Wenn $P^r \neq P^{r'}$, $P^{r'} \in P_g^f$, dann gehe weiter zu b).
 Sonst, gehe über zu f).

b) Initialisiere $n=1, t_1^{\text{akt}} = 0$.

c) Setze $a=n$.

Wenn $t_n^{\text{akt}} + \sum_{e=e_{r,a}^A}^{e_{r,a}^{\Omega}} \left(t_{E_{e-1}^r E_e^r} + c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1) \right) > t_n^{\text{min}}$, dann gehe zu f).

d) Wenn $n < t$, dann

{

$$t_{n+1}^{\text{akt}} = t_n^{\text{akt}} + \sum_{e=e_{r,a}^A}^{e_{r,a}^{\Omega}} \left(t_{E_{e-1}^r E_e^r} + c_{E_e^r} \cdot (N_e^r - 1) \right)$$

 $n = \text{nextel}(A_{r,*}, a)$
 gehe zurück zu c)
 }

Sonst, $t_n^{\text{akt}} := t_n^{\text{akt}} + t_{E_{e-1}^r} 0$.

e) Wende den Operator TOO auf das erzeugte Individuum P^r an (vgl. Schritt 24 im PDZ) und berechne $Z(P^r)$ (vgl. Schritt 26 im PDZ).

Nimm P^r in die Kindgeneration auf, $K_g := K_g \cup \{P^r\}, R := R \cup \{r\}$.

Gehe über zu Schritt 22.

f) Wenn $u < \text{MAX_V}$, dann

{
 $u := u + 1$
 gehe zurück zu Schritt 8
 }

Sonst, gehe über zu Schritt 23.

22. Wenn $q < K$, dann

{
 $r := r + 1$
 $q := q + 1$
 gehe zurück zu Schritt 8
 }

23. Wenn Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, dann

{
 $g := g + 1$
 gehe zurück zu Schritt 4
 }

Sonst

{

$$P_{\text{END}} = K_g \cup P_g^f$$

$$Z^{\text{max}} = \max \left\{ Z(P^r) \mid P^r \in P_{\text{END}} \right\}$$

 $r = 0$
 Für $(y = 0, y < |P_{\text{END}}|, r := \text{nextel}(R, r), \text{fit}(P^r) = Z^{\text{max}} - Z(P^r))$

$$P^* = \arg \max \left\{ \text{fit}(P^r) \mid P^r \in P_{\text{END}} \right\}$$

 }

4.4.4 Verfahrensvarianten des GA

Der genetische Algorithmus wird zum einen hinsichtlich des Umfangs und der Struktur der Ausgangspopulation und zum anderen hinsichtlich der Entwicklungsstruktur im Evolutionsprozeß und der Ausprägungen der Verfahrensparameter differenziert.

Konfigurationen der Ausgangspopulation

Die Struktur der Ausgangspopulation ist sowohl von dem verwendeten *PDZ*-Verfahren (vgl. Abschnitt 4.4.2.2), d. h. von der zur Erzeugung der Individuen verwendeten Prioritätsregel-Losgrößenmodus-Kombination, als auch davon abhängig, ob bei der Erzeugung der Ausgangspopulation für alle Individuen derselbe Losgrößenmodus (reine Population) oder verschiedene Losgrößenmodi (gemischte Population) verwendet werden. Der Umfang der Ausgangspopulation ist durch die als Verfahrensparameter zu konkretisierende Populationsgröße der Elternpopulation gegeben.

Entwicklungsstruktur

Die Entwicklungsstruktur wird danach differenziert, ob sich der Evolutionsprozeß mit der gesamten Ausgangspopulation startend und in den daraus erzeugten Populationen (gemeinsame Entwicklung) oder ausgehend von einer bereits aufgespaltenen Ausgangspopulation in mehrere Teilpopulationen (getrennte Entwicklung) vollzieht. Bei getrennter Entwicklung wird die Ausgangspopulation in drei Teilpopulationen geteilt, die sich unabhängig voneinander entwickeln. Die aus der Aufspaltung der Ausgangspopulation resultierenden Teilpopulationen können als verallgemeinerte Form von Inselfpopulationen verstanden werden. In klassischen Inselfpopulationen wird unabhängig voneinander die Annäherung zum Optimum gesucht. Individuen werden dann durch Emi- und Immigration ausgetauscht, wenn eine Inselfpopulation degeneriert, d. h., daß aufgrund zu großer Homogenität keine besseren Lösungen mehr gefunden werden, obwohl das Optimum noch nicht erreicht ist.¹¹³ Eine degenerierte Population ist also nichts anderes als eine Population, die gegen ein nur lokales aber nicht gegen das globale Optimum konvergiert ist.¹¹⁴ In dem hier entwickelten GA findet kein Austausch zwischen den Teilpopulationen im Degenerationsfall, sondern eine Zusammenführung der besten Individuen aus den über einen vorzuziehenden Zeitraum entwickelten Teilpopulationen, sowie eine daran anschließende gemeinsame Endentwicklung statt.

Verfahrensparameter

Als Verfahrensparameter sind die Populationsgröße, der Erzeugungsgrad, (üblicherweise) die Mutationsrate und ein Abbruchkriterium festzulegen.

Ein zentrales Problem stellt die Festlegung der *Populationsgröße* dar, über deren optimale Dimensionierung keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann.¹¹⁵ Z. B. haben *Ulder et al.* experimentell herausgefunden, daß für ihren hybriden Algorithmus die ideale Populationsgröße bei nur 8 bis 10 Individuen liegt,¹¹⁶ *Rubin/Ragatz* haben experimentell Populationsgrößen zwischen 20 und 80 Individuen untersucht und festgestellt, daß Populationen

¹¹³ Vgl. z. B. Braun (1991), S. 132.

¹¹⁴ Nach *De Jong* wird ein Gen als konvergiert bezeichnet, wenn in der betrachteten Population 95% der Individuen dieselbe Belegung für das betrachtete Gen haben. Eine Population ist konvergiert, wenn alle Gene konvergiert sind, vgl. *De Jong* (1975). Allgemeiner ist die Definition von *Louis/Rawlins*, nach der eine Population konvergiert ist, wenn die meisten Individuen gleich sind, vgl. *Louis/Rawlins* (1993), S. 141.

¹¹⁵ Vgl. *Mattfeld* (1996), S. 103.

¹¹⁶ Vgl. *Ulder et al.* (1991), S. 113.

mit 80 Individuen keine signifikanten Verbesserungen bezüglich der Konvergenz gegenüber Populationen mit 40 Individuen aufweisen. Aufgrund der niedrigeren Rechenzeit legen Rubin/Ragatz die Populationsgröße auf 40 fest.¹¹⁷ Tang/Leung hingegen arbeiten mit Populationen von 500 oder auch 2000 Individuen.¹¹⁸ Auffallend häufig wird die Populationsgröße 100 verwendet.¹¹⁹ In vorliegender Arbeit werden Verfahrensvarianten mit Populationsgrößen von 100, 200, 400 und 600 untersucht.

Des Weiteren muß der *Erzeugungsgrad*, d. h. die Relation der Populationsgröße zu dem Umfang der Kindgeneration, festgelegt werden. In der Literatur werden Erzeugungsgrade zwischen 0,1 und 1,0 verwendet.¹²⁰ Aus dem Erzeugungsgrad ergibt sich konkludent der *steady-state-Grad*, d. h. der Anteil bzw. der Mindestanteil an Individuen, die unverändert in die Folgegeneration übernommen werden.¹²¹ In vorliegender Arbeit wird der Erzeugungsgrad in den Ausprägungen 0,25, 0,5 und 0,75 untersucht.

Als weiterer Parameter ist üblicherweise die *Mutationsrate* zu bestimmen. Nach Mühlenbein wird die Mutationsrate als Faustregel in umgekehrt proportionalem Verhältnis von der Anzahl der Gene je Kind abgeleitet.¹²² Bäck gibt an, daß sich die Mutationsrate in proportionalem Verhältnis zur Populationsgröße verhalten sollte.¹²³ Asveren/Molitor zeigen, daß die Mutation bei mehrwertiger Kodierung eine wichtige Rolle spielt.¹²⁴ Zusammengefaßt kann auch bezüglich der Mutationsrate lediglich festgestellt werden, daß in der Literatur die Spannweite der Mutationsraten im Rahmen eines nicht nur aus Mutation bestehenden Vererbungsprozesses sehr groß ist.¹²⁵ Wie bereits im Rahmen der Entwicklung der genetischen Operatoren erwähnt, wird die Mutationsrate in dieser Arbeit nicht vorgegeben, sondern ergibt sich implizit. Im Rahmen des Kapitels 5.2.3 wird die Entwicklung der impliziten Mutationsrate im Generationsverlauf anhand eines konkreten Beispiels dargestellt.

Abschließend ist als Parameter ein *Abbruchkriterium* zu definieren. Da der Rechenzeitbedarf – anders als bei den PDZ-Verfahren – ganz erheblich in Abhängigkeit von der Populationsgröße und des Erzeugungsgrades variiert, wird als Abbruchkriterium eine zeitliche Begrenzung anstelle einer vorzugebenden Anzahl an Generationen¹²⁶ gewählt. Die zeitliche Begrenzung wird auf 30 Minuten festgelegt.

¹¹⁷ Vgl. Rubin/Ragatz (1995), S. 88.

¹¹⁸ Vgl. Tang/Leung (1994), S. 185.

¹¹⁹ Vgl. z. B. Jog/Suh/Van Gucht (1989), S. 112 f., Lee/Sikora/Shaw (1993), S. 385, Mattfeld (1996), S. 132, Shiroma (1996), S. 126, Lee/Choi (1995), S. 864.

¹²⁰ So wählen z. B. Tang/Leung einen Erzeugungsgrad von 0,1, Tang/Leung (1994), S. 183, Mattfeld hingegen verwendet einen Erzeugungsgrad von 1,0, vgl. Mattfeld (1996), S. 132.

¹²¹ Auch über den *steady-state-Grad* kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, vgl. De Jong/Sarma (1993), S. 19 f., 26 f.

¹²² Vgl. Mühlenbein (1997), S. 161. Vgl. auch Eiben/Van Kemenade/Kok (1995), S. 938.

¹²³ Vgl. Bäck (1996), S. 113.

¹²⁴ Vgl. Asveren/Molitor (1996), 292; vgl. hierzu auch Downsland (1996), S. 557.

¹²⁵ Lee/Sikora/Shaw wählen z. B. eine Mutationsrate von 0,1, vgl. Lee/Sikora/Shaw (1993), S. 385; die Schwankungen gehen von bspw. 0,005 bei Gorges-Schleuter (1989), S. 425, über 0,01 bei Sannomiya/Iima (1996), S. 526, bis hin zu 0,5 bei Tang/Leung (1994), S. 183 und sogar 0,9 bei Hwang/Sun (1998), S. 2448. Lee/Choi testen Mutationsraten in Abständen von 0,2 in dem Intervall [0,2;1,0] und erzielen die besten Ergebnisse mit 0,4, vgl. Lee/Choi (1995).

¹²⁶ Die Anzahl der vorzugebenden Generationen variiert in der Literatur ganz erheblich. Mit 100 Generationen arbeiten z. B. Lee/Sikora/Shaw (1993), S. 385, Mattfeld (1996), S. 132. Chen/Vempati/Aljaber haben festgestellt, daß nach nur 20 Generationen keine erheblichen Verbesserungen mehr zu erwarten sind, vgl. Chen/Vempati/Aljaber (1995), S. 393; Gorges-Schleuter hingegen testet Läufe für eine TSP-Struktur mit bis zu 2400 Generationen und kommt zu dem Ergebnis, daß nach 1600 Generationen keine erheblichen Verbesserungen mehr zu erwarten sind, vgl. Gorges-Schleuter (1989), S. 425. Shiroma hat bis zu 500 Generationen erzeugt, wobei nach den ersten 200 Generationen keine erheblichen Verbesserungen mehr erreicht wurden, vgl. Shiroma (1996), S. 126.

In folgender Abbildung 4.2. sind die auf Basis der verschiedenen Konfigurationen der Ausgangspopulation, der möglichen Ausprägungen der Verfahrensparameter, sowie der möglichen Entwicklungsstrukturen kombinierten Verfahrensvarianten des GA dargestellt.

Verfahrensvarianten des GA:

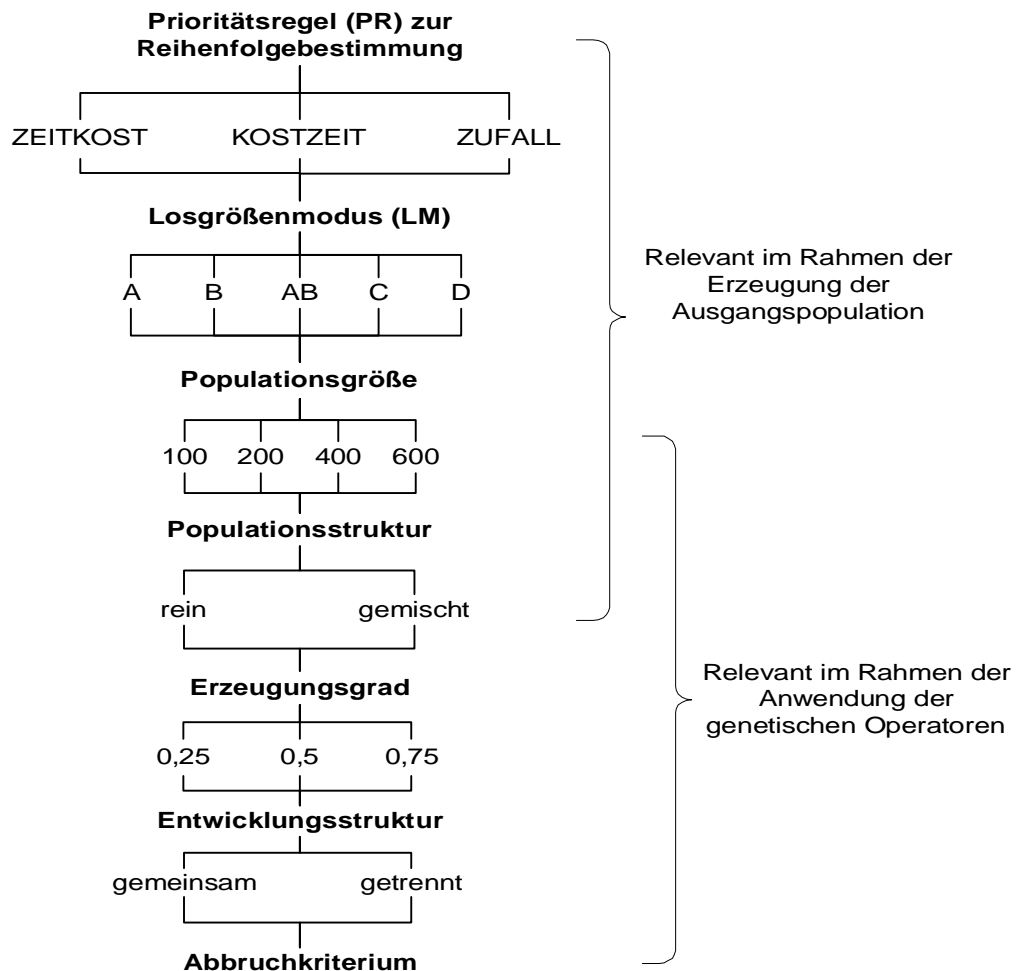


Abbildung 4.2: Verfahrensvarianten des Genetischen Algorithmus

Der genetische Algorithmus wird nicht in allen möglichen Konfigurationen und Ausprägungen der Verfahrensparameter analysiert. Die die einzelnen Varianten konkretisierenden Verfahrenskonfigurationen werden im Abschnitt 5.2.1 in Abhängigkeit von den Ergebnissen der PDZ-Verfahren bestimmt.

Kapitel 5

Experimentelle Analyse

Im folgenden werden die Ergebnisse der in verschiedenen Testfeldern getesteten Varianten des *PDZ*-Verfahrens und die Ergebnisse der auf der Beurteilung der *PDZ*-Verfahren aufbauenden Varianten des genetischen Algorithmus beschrieben. Die Verfahren sind seriell in C++ implementiert.¹

5.1 Analyse der *PDZ*-Verfahren

Die Varianten des *PDZ*-Verfahrens werden hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung der Ausgangspopulation in verschiedenen Testfeldern getestet. In allen Testfeldern werden 30 Probleminstanzen erzeugt.² Die *PDZ*-Verfahren werden mit einer Populationsgröße von 100 Individuen getestet. Die Eignung eines Verfahrens zur Erzeugung der Ausgangspopulation wird zum einen hinsichtlich der Zielfunktionswerte und zum anderen hinsichtlich des Streuungsmaßes der Zielfunktionswerte über die 30 Probleminstanzen untersucht. Zunächst wird die Erzeugung der verschiedenen Testfelder beschrieben. Anschließend erfolgt die Auswertung der Ergebnisse.

5.1.1 Erzeugung von Testfeldern

Ein Testfeld wird durch bestimmte Ausprägungen der Problemparameter erzeugt. Im folgenden wird kurz erläutert, welche und inwiefern bestimmte Parameterwerte variieren. Dann werden die Ausprägungen konkretisiert und zusammenfassend eine Übersicht der verschiedenen Ausprägungen und der daraus resultierenden Testfelder gegeben.

5.1.1.1 Variation der Parameterausprägungen

Die Parameter sind zum einen hinsichtlich ihrer absoluten und zum anderen hinsichtlich ihrer relativen Ausprägungen festzulegen. Die *absoluten Ausprägungen* der Parameter werden durch die Festlegung des Planungszeitraums, der insgesamt in dem Planungszeitraum möglichen Termine, der Produktartenanzahl, sowie durch das Niveau der Intervallgrenzen, aus denen die Anzahl der Termine je Produktart, die Taktzeiten, die Loswechselzeiten und -kosten, die externen Bedarfe zu den Terminen und die produktartenindividuellen Lagerkostensätze bestimmt werden, beschrieben. Die *relativen Ausprägungen* der Parameter werden jeweils durch das Verhältnis von maximaler zu minimaler Ausprägung des betrachteten Parameters beschrieben. Aus dem Zusammenspiel von absoluten und relativen Ausprägungen lassen sich die Mittelwerte der Parameterwerte ableiten. Die Betrachtung der Mittelwerte ist insofern

¹ Sofern die Operatoren des genetischen Algorithmus unabhängig voneinander angewandt werden, kann der Algorithmus als paralleler genetischer Algorithmus bezeichnet werden (vgl. Johnson/McGeoch (1997), S. 286). Vorliegender Algorithmus erfüllt zwar dieses Kriterium, interessant ist dieser Aspekt jedoch nur dann, wenn die zur Verfügung stehenden Rechner eine parallele Implementierung gestatten. Diese ist hier nicht erfolgt.

² Vgl. z. B. auch Jordan/Drexel (1998), S. 708.

relevant, als sich das durchschnittliche Niveau bestimmter Parameterausprägungen nach den zu treffenden Vorgaben anderer Parameterausprägungen richten muß, um lösbare Probleminstanzen erzeugen zu können. Ausgehend von einem gegebenen Planungszeitraum hängt z. B. das Niveau der durchschnittlich zu den einzelnen Terminen nachgefragten Mengeneinheiten der Produktarten von der Anzahl der Produktarten, der durchschnittlichen Taktzeit, der durchschnittlichen paarweisen Loswechselzeiten und der durchschnittlichen Anzahl der Termine je Produktart ab.

Eine gängige Weise, Testfelder voneinander abzugrenzen, besteht in der Variation der relativen Ausprägung eines Parameters (*intraparametrische Testfeldabgrenzung*). Darüber hinaus kann es auch interessant sein, ein Testfeld von einem anderen abzugrenzen, indem das relative Verhältnis der durchschnittlichen Ausprägung eines Parameters zu der durchschnittlichen Ausprägung eines anderen Parameters variiert (*interparametrische Testfeldabgrenzung*).

Die Vielzahl an Möglichkeiten, Testfelder durch unterschiedliche Parameterausprägungen zu erzeugen, erfordert eine Betrachtung der Variation derjenigen Parameter, deren Veränderung für die betrachtete Problemstellung am interessantesten erscheint.

Nicht variiert werden:

- Die Länge des Planungszeitraums und die Anzahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Termine über alle Produktarten.
- Das Verhältnis von maximaler zu minimaler Taktzeit und das absolute Niveau der Intervallgrenzen.
- Das Verhältnis von maximaler zu minimaler terminbezogener externer Auftragsmenge.
- Der als e bezeichnete Faktor zur Simulation der nicht-proportionalen Abhängigkeit der paarweisen Loswechselkosten von den paarweisen Loswechselzeiten.

*Variiert werden:*³

- Die Anzahl der Produktarten (*intraparametrische Testfeldabgrenzung*).
- Das Verhältnis von maximaler zu minimaler paarweiser Umrüstzeit (*intraparametrische Testfeldabgrenzung*).
- Das Verhältnis von maximalem zu minimalem Lagerkostensatz (*intraparametrische Testfeldabgrenzung*) mit entsprechender Verschiebung des Niveaus der durchschnittlichen Lagerkostensätze (zur Bestimmung der absoluten Intervallgrenzen müssen keine weiteren Abhängigkeiten berücksichtigt werden).
- Der als Regulationskonstante reg bezeichnete Faktor zur Dimensionierung der Loswechselkosten und somit des Verhältnisses der Loswechselkosten zu den Lagerkosten (*interparametrische Testfeldabgrenzung*).

Von der variierenden Produktartenanzahl abhängig sind:

- Die durchschnittliche Anzahl der Termine je Produktart.
- Das Niveau der durchschnittlichen externen Auftragsmengen je Produktart und Auftrag.
- Das Niveau der durchschnittlichen paarweisen Loswechselzeiten unter Berücksichtigung der ebenfalls variierenden *relativen* Ausprägung der Loswechselzeiten.

Von der variierenden relativen Ausprägung der paarweisen Loswechselzeiten abhängig ist:

- Das Verhältnis von maximalen zu minimalen paarweisen Loswechselkosten.

³ Vgl. zu den ersten drei der im folgenden aufgeführten Parameter auch Popp (1993), S. 235. Popp untersucht auch unterschiedliche Kapazitätsauslastungen. Aufgrund des Schwerpunktes der Kostenorientierung in vorliegender Arbeit, wird hierauf verzichtet.

Von der variierenden Produktartenanzahl, der variierenden relativen Ausprägung der paarweisen Loswechselzeiten und des Faktors *reg* abhängig ist:

- Das Niveau der durchschnittlichen paarweisen Loswechselkosten.

5.1.1.2 Konkretisierung der Parameterausprägungen

Zur Konkretisierung der Parameterausprägungen werden zunächst die verwendeten Symbole beschrieben. Anschließend wird - gegliedert nach nicht-variierenden, variierenden und von den variierenden abhängigen Ausprägungen - erläutert, wie die Parameterwerte erzeugt werden. Abschließend wird eine Übersicht über die Parameterausprägungen und die daraus resultierenden Testfelder gegeben. Die absoluten Parameterwerte sind in allen Testfeldern jeweils so bemessen, daß die Kapazitätsauslastung ca. 80% beträgt. Die Berechnung der Kapazitätsauslastung wird im Anschluß an die Übersicht der Parameterausprägungen erläutert.

Beschreibung der verwendeten Symbole

\bar{c}_i	Mittelwert der Taktzeiten über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$, [ZE/ME]
\bar{c}_{ij}	durchschnittliche paarweise Loswechselkosten von der Produktart i auf die Produktart j , $i, j \in I$, [GE]
c_{ij}^t	aus der e -Umgebung um die Loswechselzeiten mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählte Werte als Basis zur Bestimmung der Loswechselkosten, $i, j \in I, i \neq j$, [ZE]
e	Faktor zur Dimensionierung der Umgebung der Loswechselkosten um die Loswechselzeiten, [-]
\bar{k}_i	Mittelwert der Stücklagerkostensätze über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$, [GE/(ZE*ME)]
k	theoretische Kapazitätsauslastung, [-]
reg	regulierender Faktor zur Dimensionierung der Loswechselkosten, [GE/ZE]
$rel(c_i)$	Verhältnis von maximaler zu minimaler Taktzeit über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$, [-]
$rel(c_{ij})$	Verhältnis von maximalen zu minimalen Loswechselkosten über alle Produktartenwechsel von i auf j , $i, j \in I$, [-]
$rel(k_i)$	Verhältnis von maximalem zu minimalem Stücklagerkostensatz über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$, [-]
$rel(t_{ij})$	Verhältnis von maximalen zu minimalen Loswechselzeiten über alle Produktartenwechsel von i auf j , $i, j \in I$, [-]
$rel(x_s^{ext})$	Verhältnis von maximaler zu minimaler externer Auftragsmenge über alle Aufträge, [-]
\bar{t}_{ij}	Mittelwert der Loswechselzeiten über alle Produktartenwechsel von i auf j , $i, j \in I$, [ZE]
\bar{t}_s	Mittelwert der Anzahl der Termine über alle Produktarten, [-]
\bar{x}_s^{ext}	Mittelwert der externen Auftragsmengen über alle Aufträge, [ME]

Mit Ausnahme der absoluten Werte für die Länge des Planungszeitraums, der Anzahl der insgesamt möglichen Termine und der Produktartenanzahl werden die einzelnen Parameterwerte anhand von gleichverteilten Zufallszahlen⁴ aus den vorzugebenden Intervallen bestimmt.

Nicht variierende Parameterausprägungen

1. Länge des Planungszeitraums und Anzahl der unterscheidbaren Termine:
Die Länge des Planungszeitraums T beträgt 518.400 Zeiteinheiten [ZE]. Die Anzahl der unterscheidbaren Termine t , zu denen externe Aufträge bestehen können, beträgt 24. Die 24 zur Verfügung stehenden Termine sind über den Planungszeitraum gleichverteilt und für jede Instanz gleich. Der letzte mögliche Termin entspricht dem Ende des Planungszeitraums. Der eigentlich „erste Termin“ der Produktart 0 wird über die Initialisierung mit dem Zeitpunkt 0 erzeugt und nicht explizit in die Menge der insgesamt möglichen Termine aufgenommen.
2. Relative und absolute Ausprägungen der Taktzeiten:
Das als $rel(c_i)$ bezeichnete Verhältnis von maximaler zu minimaler Taktzeit über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$ wird für 2/3 der Produktarten auf 3, und für 1/3 der Produktarten auf 2 festgelegt. Bei der Festlegung des Verhältnisses wird also davon ausgegangen, daß die Arbeitsvorräte der in gemeinsamer Produktion auf demselben Fließband gefertigten Produktarten sich höchstens um das Dreifache voneinander unterscheiden.⁵ Die Aufteilung der Menge der Produktarten steht in Zusammenhang mit der ebenfalls vorgenommenen Teilung dieser Menge im Rahmen der Zuteilung der Termine (vgl. Punkt 9). Die absoluten Intervallgrenzen des Intervalls, aus denen die Taktzeiten c_i derjenigen Produktarten $i = 1(1)I - 1$ gewählt werden, deren Verhältnis von maximaler zu minimaler Taktzeit über alle Produktarten, $rel(c_i)$, gleich 3 ist, betragen $4[ZE/ME]$ und $12[ZE/ME]$, die c_i derjenigen Produktarten $i = 1(1)I - 1$, deren Verhältnis von maximaler zu minimaler Taktzeit über alle Produktarten gleich 2 ist, betragen $6[ZE/ME]$ und $12[ZE/ME]$, d. h. $\bar{c}_i = 8,3 [ZE/ME]$. Für die Produktart 0 beträgt die Taktzeit $0[ZE/ME]$.
3. Relative Ausprägung der externen Auftragsmengen:
Das als $rel(x_s^{ext})$ bezeichnete Verhältnis von maximaler zu minimaler externer Auftragsmenge über alle Aufträge wird auf 2 festgelegt.⁶ Die absoluten Intervallgrenzen, aus denen die externen Auftragsmengen x_s^{ext} gewählt werden, variieren in Abhängigkeit von der Produktartenanzahl.
4. Ermittlung der Basiswerte zur Bestimmung der Loswechselkosten:
Im Rahmen der Beschreibung des betrachteten Produktionssystems in Abschnitt 2.1.1 wurde erläutert und in Abschnitt 2.3.2 formal dargestellt, daß die Loswechselkosten zwar in funktionaler Abhängigkeit von den Umrüstzeiten in den einzelnen Stationen stehen,

⁴ Mit gleichverteilten Losgrößen und Bearbeitungszeiten arbeiten Shanker/Tzen (1985), S. 587 f., und in Anlehnung an Shanker/Tzen auch Gupta/Goyal (1992), S. 531. Gleichverteilte Rüstkostensätze innerhalb eines bestimmten Wertebereichs finden sich bei Popp (1993), S. 233.

⁵ Ohne Bindung an die Fließbandfertigung, werden in der Literatur auch deutlich größere Verhältnisse angenommen, vgl. z. B. Gupta/Goyal (1992), S. 531, Lee/Sikora/Shaw (1993), S. 385.

⁶ Das Verhältnis von maximaler zu minimaler Anzahl der Termine je Produktart beträgt 2 bei $I=31$ und 1,67 bei $I=61$ (vgl. absolute Intervallgrenzen der Anzahl der Termine in Abhängigkeit von der Produktartenanzahl). Da das Verhältnis von maximaler zu minimaler Auftragsmenge 2 beträgt, kann über den Planungszeitraum gesehen das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Nachfrage 4 bzw. 3,34 betragen. Lee/Sikora/Shaw wählen für diese Intervallgrenzen ein Verhältnis von 5, vgl. Lee/Sikora/Shaw (1993), S. 385.

daß diese Abhängigkeit aufgrund der unterschiedlichen Stationslohnsätze in Summe über alle Bearbeitungsstationen jedoch nicht (streng) monotonen Charakter haben muß. Um eine genaue Bewertung der Umrüstzeiten vornehmen zu können, müßten zur Erzeugung eines Testproblems weitere Annahmen getroffen werden: zum einen bezüglich der Anzahl der Stationen und zum anderen bezüglich der Stationslohnsätze sowie der konkreten Zeiteinheiten, welche in den einzelnen Stationen bei der Umrüstung von i auf j anfallen. Hierfür würden die den einzelnen Stationen im Rahmen der Leistungsabstimmung zugeordneten Verrichtungen bzw. die jeweiligen Auf- und Abrüstzeiten der einzelnen Verrichtungen herangezogen werden. Aus Vereinfachungsgründen werden die Loswechselkosten von der Produktart i auf die Produktart j zufällig aus einer e -Umgebung um die Loswechselzeiten von der Produktart i auf die Produktart j hergeleitet, wobei letztere neben den Umrüstzeiten auch die durch den Loswechsel induzierten Leerzeiten umfassen (vgl. Abschnitt 2.3.1 v. A.). Die zufällige Auswahl aus einem bestimmten Intervall um die Loswechselzeiten simuliert die nicht-proportionale Abhängigkeit der Loswechselkosten von den in den Loswechselzeiten enthaltenen Umrüstzeiten (wären die Stationslohnsätze in allen Stationen des Fließbandes gleich und hätten sämtliche Produktarten dieselbe Taktzeit, müßte e auf 0 gesetzt werden). Die e -Umgebung um die Loswechselzeiten wird auf 0,5 festgelegt.

Die für die Simulation erforderlichen in Zeiteinheiten gemessenen Basiswerte werden als c_{ij}^t bezeichnet und aus der beschriebenen e -Umgebung um die Loswechselzeiten t_{ij} mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig gewählt. Die Werte c_{ij}^t gehen neben dem regulierenden Faktor reg in die Berechnung der paarweisen Loswechselkosten c_{ij} ein, $i, j \in I, i \neq j$. Die Werte c_{ij}^t werden wie folgt ermittelt:

$$c_{ij}^t = \text{random}(t_{ij} \cdot (1 - e); t_{ij} \cdot (1 + e)), \quad i, j \in I, i \neq j.$$

Eine Ermittlung der Werte $c_{ii}^t, i \in I$, ist nicht erforderlich.

Variierende Parameterausprägungen

5. Produktartenanzahl:

Die Produktartenanzahl I wird in den Ausprägungen 31 und 61 (inklusive der fiktiven Produktart 0) untersucht.

6. Relative Ausprägung der paarweisen Loswechselzeiten:

Die Spannweite zwischen in den Loswechselzeiten enthaltenen maximalen und minimalen Umrüstzeiten variiert in der Literatur ganz erheblich. So haben Lee/Sikora/Shaw Verhältnisse von 2 und von 5 gewählt,⁷ bei Pack hingegen beträgt das Verhältnis von maximaler zu minimaler Umrüstzeit über 30.⁸ Das als $rel(t_{ij})$ bezeichnete relative Verhältnis von maximalen zu minimalen paarweisen Loswechselzeiten zwischen allen Produktarten $i, j \in I, i \neq j$, wird in den Ausprägungen 2 und 8 untersucht. Die absoluten Intervallgrenzen, aus denen die paarweisen Loswechselzeiten t_{ij} zwischen allen Produktarten $i, j \in I, i \neq j$, gewählt werden, variieren in Abhängigkeit von $rel(t_{ij})$ und von der Produktartenanzahl. Unabhängig von der Produktartenanzahl und der relativen

⁷ Vgl. Lee/Sikora/Shaw (1993), S. 385 f.

⁸ Vgl. Pack (1998), S. 509.

Ausprägung $rel(t_{ij})$ entsprechen alle paarweisen Loswechselzeiten t_{ij} einem Auflegeintervall der Produktart i , $t_{ij} = c_i$, $i \in I$.

7. Relative und absolute Ausprägungen der Lagerkostensätze:

Aufgrund der hohen Relevanz der Lagerhaltungskosten in den hier entwickelten Verfahren wird die häufig unterstellte Annahme, daß die Lagerhaltungskosten für alle Produktarten gleich seien,⁹ hier nicht betrachtet. Das als $rel(k_i)$ bezeichnete relative Verhältnis von maximalem zu minimalem Lagerkostensatz über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$ wird in den Ausprägungen 3 und 8 untersucht. Die absoluten Intervallgrenzen, aus denen die Lagerkostensätze k_i der Produktarten $i = 1(1)I - 1$ gewählt werden, variieren in Abhängigkeit von $rel(k_i)$:

für $rel(k_i) = 3$ wird das Intervall auf $[0,002; 0,006][GE/(ZE * ME)]$, d. h. $\bar{k}_i = 0,004[GE/(ZE * ME)]$, und für $rel(k_i) = 8$ auf $[0,001; 0,008][GE/(ZE * ME)]$, d. h. $\bar{k}_i = 0,0045[GE/(ZE * ME)]$, festgelegt. Für die Produktart 0 beträgt der Lagerkostensatz $0[GE/(ZE * ME)]$.

8. Verhältnis der Loswechselkosten zu den Loswechselzeiten und zu den Lagerkosten:

Mit Hilfe des als $reg [GE/ZE]$ bezeichneten regulierenden Faktors wird eine Gewichtung der von den Loswechselzeiten abgeleiteten Werte c_{ij}^t vorgenommen. Je höher das Niveau von reg ist, um so höher ist auch der Stellenwert der Loswechselkosten. Konkret könnten die unterschiedlichen Ausprägungen von reg Fließbänder mit unterschiedlich vielen Stationen abbilden,¹⁰ ohne die Einhaltung der nicht-proportionalen Abhängigkeit der Loswechselkosten von den Loswechselzeiten aufzugeben.

Für alle paarweisen Produktfolgen $i, j \in I, i \neq j$, erfolgt die Bestimmung der Parameterwerte der paarweisen Loswechselkosten c_{ij} gemäß: $c_{ij} = reg \cdot c_{ij}^t$, $i, j \in I, i \neq j$, und $c_{ii} = 0$, $i \in I$.

Der regulierende Faktor reg wird in den Ausprägungen 4 $[GE/ZE]$ und 10 $[GE/ZE]$ untersucht. Die Festlegung auf die sehr hohe Ausprägung von 10 dient der Analyse des Einflusses der anhand der Rüstkosten bzw. Lagerkosten getroffenen Entscheidungen im Algorithmus, wobei das Wählen von Extremwerten zu Analyse-Zwecken nicht unüblich ist.¹¹

Ausprägungen in Abhängigkeit von der variierenden Produktartenanzahl

9. Durchschnittliche Anzahl der Termine je Produktart:

Da der „erste Termin“ der Produktart 0 im Rahmen der Erzeugung der Probleminstanzen nicht explizit in die Menge der Termine aufgenommen wird, hat die fiktive Produktart 0 genau einen Termin, welcher dem Ende des Planungszeitraums entspricht und auch anderen Produktarten zugeteilt werden kann.

Für $I=31$ werden jeder Produktart $i=1(1)10$ zwischen 12 und 24 Termine, jeder Produktart $i=11(1)20$ zwischen 12 und 20 Termine und jeder Produktart $i=21(1)30$ zwischen 12

⁹ Vgl. z. B. Drexl/Kimms/Jordan (1998), S. 549, Popp (1993), S. 233.

¹⁰ So betrachten z. B. Gupta/Goyal Fließbänder mit 4 bzw. mit 10 Stationen, vgl. Gupta/Goyal (1992), S. 534.

¹¹ Vgl. auch Gupta/Gupta/Evans (1993), S. 873.

und 16 Termine zugeteilt, wobei derselbe Termin nicht häufiger als 22 Mal zugeteilt werden darf. Demzufolge beträgt $\overline{t_s} \approx 16$.

Für $I=61$ werden jeder Produktart $i=1(1)20$ zwischen 12 und 20 Termine, jeder Produktart $i=21(1)40$ zwischen 12 und 16 Termine und jeder Produktart $i=41(1)60$ genau 12 Termine zugeteilt, wobei derselbe Termin über alle Produktarten hinweg nicht häufiger als 40 Mal zugeteilt werden darf. Demzufolge beträgt $\overline{t_s} \approx 14$.

Exkurs: Zuteilung der Termine

Im Rahmen der Zuteilung der Termine wird die Menge der Produktarten $\{i | i = 1(1)I - 1\}$ aus dem folgenden Grund gedrittelt: Da die einzelnen Parameter gleichverteilte Zufallszahlen aus den jeweiligen Intervallen zwischen Minimum und Maximum sind, muß bei der Erzeugung der Parameterwerte, die bei extrem großen Probleminstanzen zwar das Rechnen mit Durchschnittswerten erlauben, für konkrete Anwendungen diese Sicherheit jedoch nicht gewährleisten,¹² dafür gesorgt werden, daß die erzeugten Probleme unter Berücksichtigung der Kapazitätsauslastung überhaupt lösbar sind. Für $I=31$ wird ein Durchschnitt von annähernd 16 Terminen über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$ realisiert, indem in der den Produktarten die Termine aus 24 möglichen Terminen zuordnenden Funktion die maximale Anzahl der möglichen Zuordnungen nach jedem Drittel um 4 Termine reduziert wird. Für $I=61$ wird analog ein Durchschnitt von annähernd 14 Terminen über alle Produktarten $i = 1(1)I - 1$ realisiert, indem die maximale Anzahl aus den 24 möglichen Terminen bereits für das erste Drittel auf 20 Termine beschränkt wird. Diese Methodik wird mit einem „kompensierenden Zufall“¹³ kombiniert, d. h., daß bei der Erzeugung der Termine einer Produktart für jeden Termin, der für die betrachtete Produktart ausgewählt ist, vor der definitiven Zuordnung dieses Termins zu der Produktart geprüft wird, wie häufig der betrachtete Termin bereits einer Produktart zugeordnet wurde. Ist eine experimentell ermittelte Grenze (bei $I=31$ beträgt die Grenze 22 und bei $I=61$ beträgt sie 40) für die einem bestimmten Termin zuordenbaren Produktarten bereits erreicht, steht dieser Termin nicht mehr für eine Zuordnung zur Verfügung.¹⁴ Demjenigen Drittel der Produktarten, dessen durchschnittliche Terminanzahl am niedrigsten ist, wird die durchschnittlich höhere Taktzeit zugeteilt.

Ende Exkurs.

10. Durchschnittliche Auftragsmengen:

Für $I=31$ werden die Auftragsmengen für jeden Auftrag mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall $[65;130][ME]$ gewählt, d. h. $\overline{x_s^{ext}} = 97,5$.

Für $I=61$ werden die Auftragsmengen für jeden Auftrag mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall $[37;74][ME]$ gewählt, d. h. $\overline{x_s^{ext}} = 55,5$.

Für die Produktart 0 beträgt die Auftragsmenge $0[ME]$.

¹² Vgl. auch Nelson (1996), S. 123.

¹³ In Anlehnung an Nelson (1996), S. 124. Nelson bezeichnet so eine Zufallsauswahl (im original „compensatory randomization“), die die Wahrscheinlichkeiten der möglichen Ereignisse A und B entsprechend der aktuellen relativen Häufigkeit neu ermittelt, um eine Gleichverteilung zu erreichen.

¹⁴ Ohne den Zusatz der über dem Mittel liegenden Grenzen verwendet Helber diese Form der Regulierung der Zufallszahlen zur Erzeugung lösbarer Probleminstanzen bei der Bestimmung der Bedarfsmengen in den einzelnen Perioden, vgl. Helber (1994), S. 121.

11. Durchschnittliche paarweise Loswechselzeiten:

Für $I=31$ - und $rel(t_{ij})=2$ werden die paarweisen Loswechselzeiten zwischen den Produktarten $i, j \in I, i \neq j$, mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall $[18;36][ZE]$ gewählt, d. h. $\overline{t_{ij}}=27$.

- und $rel(t_{ij})=8$ werden die paarweisen Loswechselzeiten zwischen den Produktarten $i, j \in I, i \neq j$, mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall $[6;48][ZE]$ gewählt, d. h. $\overline{t_{ij}}=27$.

Für $I=61$ - und $rel(t_{ij})=2$ werden die paarweisen Loswechselzeiten zwischen den Produktarten $i, j \in I, i \neq j$, mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall $[12;24][ZE]$ gewählt, d. h. $\overline{t_{ij}}=18$.

- und $rel(t_{ij})=8$ werden die paarweisen Loswechselzeiten zwischen den Produktarten $i, j \in I, i \neq j$, mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig aus dem Intervall $[4;32][ZE]$ gewählt, d. h. $\overline{t_{ij}}=18$.

Ausprägungen in Abhängigkeit von der variierenden relativen Ausprägung der paarweisen Loswechselzeiten

12. Verhältnis von maximalen zu minimalen paarweisen Loswechselkosten:

Das als $rel(c_{ij})$ bezeichnete Verhältnis von maximalen zu minimalen paarweisen Loswechselkosten ist abhängig von $rel(t_{ij})$ und wird wie folgt berechnet:

$$rel(c_{ij}) = \frac{1+e}{1-e} \cdot rel(t_{ij}). \text{ Somit ergibt sich}$$

- für $rel(t_{ij})=2$ ein Verhältnis von $rel(c_{ij})=6$ und

- für $rel(t_{ij})=8$ ein Verhältnis von $rel(c_{ij})=24$.¹⁵

Ausprägungen in Abhängigkeit von der variierenden Produktartenanzahl, der variierenden relativen Ausprägung der paarweisen Loswechselzeiten und des Faktors reg

13. Durchschnittliche paarweise Loswechselkosten:

Wird die von I und $rel(t_{ij})$ abhängige untere Intervallgrenze des Intervalls, aus denen die paarweisen Loswechselzeiten gewählt werden, als t_{ij}^u und die zugehörige obere Grenze als t_{ij}^o bezeichnet, dann läßt sich das Intervall, in dem die paarweisen Loswechselkosten c_{ij} theoretisch liegen können, wie folgt beschreiben: $[(1-e) \cdot t_{ij}^u; (1+e) \cdot t_{ij}^o] \cdot reg$. Im Rahmen der Berechnung der durchschnittlichen paarweisen Loswechselkosten $\overline{c_{ij}}$ muß jedoch berücksichtigt werden, daß die Bestimmung der paarweisen Umrüstwerte c_{ij}^t nach der Festlegung der Loswechselzeiten für eine bestimmte Produktfolge (i,j) , aus der e -Umgebung erfolgt. D. h. die Loswechselkosten werden in dem Fall, daß

¹⁵ Popp legt ein Verhältnis von 12:1 zugrunde, vgl. Popp (1993), S. 233

I=31 und $rel(t_{ij})=2$ für die kleinste mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [9;27]·reg und für die größte mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [18;54]·reg bestimmt.

- $rel(t_{ij})=8$ für die kleinste mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [3;9]·reg und für die größte mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [24;72]·reg bestimmt.

I=61 und $rel(t_{ij})=2$ für die kleinste mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [6;18]·reg und für die größte mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [18;36]·reg bestimmt.

- $rel(t_{ij})=8$ für die kleinste mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [2;6]·reg und für die größte mögliche Ausprägung der Loswechselzeiten aus dem Intervall [16;48]·reg bestimmt.

Die Summe der Abweichungen von dem jeweiligen Mittelwert müßte also bei gleichverteilten Zufallszahlen in beiden Ausprägungen des Verhältnisses $rel(t_{ij})$ jeweils gleich groß sein, da sowohl der absolute Wert der Mittelwerte der Loswechselzeitenintervalle gleich ist (bei I=31 beträgt $\bar{t}_{ij} = 27$ [ZE], bei I=61 beträgt $\bar{t}_{ij} = 18$ [ZE]), als auch die e-Umgebung konstant bleibt. Demzufolge werden die \bar{c}_{ij} wie folgt berechnet:

$$\bar{c}_{ij} = reg \cdot \bar{c}_{ij}^t, \text{ mit } \bar{c}_{ij}^t = \frac{1}{2} \left((1 - e) \cdot \bar{t}_{ij} + (1 + e) \cdot \bar{t}_{ij} \right)$$

Die konkreten Werte für \bar{c}_{ij} in Abhängigkeit von I und von $rel(t_{ij})$, sowie die anderen Parameterausprägungen finden sich in folgender Tabelle 5.1:

Parameter			I=31	I=61
T [ZE]			518.400	518.400
t [-]			24	24
\bar{t}_s [-]			16	14
\bar{c}_i [ZE/ME]	$rel(c_i)=3$		8,3	8,3
x_s^{ext} [ME]	$rel(x_s^{ext})=2$		97,5	55,5
\bar{t}_{ij} [ZE]	$rel(t_{ij})=2$		27	18
	$rel(t_{ij})=8$		27	18
\bar{k}_i [GE/(ZE*ME)]	$rel(k_i)=3$		0,004	0,004
	$rel(k_i)=8$		0,0045	0,0045
\bar{c}_{ij} [GE]	reg=4 [GE/ZE]	$rel(t_{ij})=2$	108	72
		$rel(t_{ij})=8$	108	72
	reg=10[GE/ZE]	$rel(t_{ij})=2$	270	180
		$rel(t_{ij})=8$	270	180

Tabelle 5.1: Parameterausprägungen

Berechnung der Kapazitätsauslastung

Wird die als k bezeichnete *theoretische Kapazitätsauslastung* als Verhältnis der benötigten zu der zur Verfügung stehenden Kapazität definiert,¹⁶ sind zu der benötigten Kapazität auch die für die Umrüstungen benötigten Zeiträume zu zählen. Wird die Kapazitätsauslastung als Verhältnis der Gesamtbearbeitungszeit zu der Gesamtbelegungszeit definiert,¹⁷ werden die für die Umrüstungen benötigten Zeiträume hierin nicht berücksichtigt. Welcher Definition gefolgt wird, ist in diesem Zusammenhang für die Dimensionierung der Kapazitätsauslastung erheblich. *Salomon et al.* definieren die Kapazitätsauslastung im Rahmen ihres DLSPSD zwar explizit ohne Einbeziehung der Umrüstzeiten als Summe über alle Nachfragen in allen Zeitintervallen über alle Produktarten geteilt durch die Anzahl der Zeitintervalle.¹⁸ Probleminstanzen mit Umrüstzeiten werden – um genügend Spielraum zu haben – allerdings auch nur mit Kapazitätsauslastungen zwischen 0,5 und 0,75 untersucht.¹⁹ *Helber* definiert unterschiedliche Kapazitätsauslastungen, je nachdem, ob für die betrachtete Problemstellung Umrüstzeiten berücksichtigt werden müssen oder nicht. Bei den Problemstellungen, die Umrüstzeiten berücksichtigen, werden letztere in die Berechnung der Kapazitätsauslastung aufgenommen. Hierbei wird unterstellt, daß in jeder Periode für jede Produktart umgerüstet werden muß. *Helber* untersucht Kapazitätsauslastungen, die zwischen 0,55 und 0,95 liegen.²⁰

In der Praxis wird eine Kapazitätsauslastung inklusive der Umrüstzeiten von 0,8 als angemessen bzw. günstig angesehen.²¹ In allen betrachteten Testfeldern sind die absoluten Intervallgrenzen so bemessen, daß die inklusive der Loswechselzeiten theoretisch benötigte Kapazität zwischen 78% und 80% von der zur Verfügung stehenden Kapazität beträgt. Die theoretische Kapazitätsauslastung k wird aus den Mittelwerten von:

- der Anzahl der Termine $\overline{t_s}$
- den externen Auftragsmengen $\overline{x_s^{ext}}$
- den Taktzeiten $\overline{c_i}$ und
- den paarweisen Loswechselzeiten $\overline{t_{ij}}$

berechnet.

Bei der Berechnung von k wird unterstellt, daß in jeder Periode für so viele Produktarten umgerüstet wird, wie durchschnittlich pro Periode nachgefragt werden. Die Anzahl der Umrüstvorgänge berechnet sich als Durchschnitt der Anzahl der betrachteten Produktarten multipliziert mit der durchschnittlichen Terminanzahl je Produktart im Planungszeitraum – zuzüglich der Ein- und der Ausrüstung des Fließbandes. Jeder Umrüstvorgang wird mit der durchschnittlichen Umrüstzeit angesetzt. Die Ermittlung der durchschnittlichen Bearbeitungszeiten erfolgt als Produkt der Anzahl der Produktarten, der durchschnittlichen Terminanzahl je Produktart, dem durchschnittlichen externen Bedarf je Termin und Produktart und der durchschnittlichen Taktzeit je Produktart.

¹⁶ In Anlehnung an Holthaus (1996), S. 65.

¹⁷ Vgl. Zäpfel (1982), S. 250.

¹⁸ *Salomon et al.* arbeiten – wie üblich für DLSPs – nicht mit reellen „Nachfragemengen“, sondern mit periodenbezogenen Entscheidungsvariablen, die angeben, ob für eine Periode für eine Produktart Nachfrage besteht oder nicht, vgl. *Salomon et al.* (1997), S. 496.

¹⁹ Vgl. *Salomon et al.* (1997), S. 508, sowie die Auswertungen auf S. 510 f.

²⁰ Vgl. *Helber* (1994), S. 122.

²¹ Vgl. *Zeile* (1992), S. 41.

Die Berechnung der theoretischen Kapazitätsauslastung k erfolgt gemäß:

$$k = \frac{2 \cdot \overline{t_{ij}} + \overline{t_s} \cdot \overline{t_{ij}} \cdot (I-1) + \overline{t_s} \cdot \overline{x_s^{ext}} \cdot \overline{c_i} \cdot (I-1)}{T} = \frac{2 \cdot \overline{t_{ij}} + \overline{t_s} \cdot (I-1) \cdot \left(\overline{t_{ij}} + \overline{x_s^{ext}} \cdot \overline{c_i} \right)}{T}$$

Testfelder

Bei einem vollfaktoriellen Vergleich ergeben sich für die *PDZ*-Verfahren $2^4 = 16$ Testfelder, die wie folgt numeriert werden:

Nr.	I	reg	rel(k_i)	rel(t_{ij})
1	31	10	3	2
2	31	10	3	8
3	31	10	8	2
4	31	10	8	8
5	31	4	3	2
6	31	4	3	8
7	31	4	8	2
8	31	4	8	8
9	61	10	3	2
10	61	10	3	8
11	61	10	8	2
12	61	10	8	8
13	61	4	3	2
14	61	4	3	8
15	61	4	8	2
16	61	4	8	8

Tabelle 5.2: Testfelder der *PDZ*-Verfahren

5.1.2 Testläufe der *PDZ*-Verfahren

Die Bewertung der *PDZ*-Verfahren bezieht sich auf das mit dem betrachteten Verfahren in jeder der 30 erzeugten Probleminstanzen je Testfeld hinsichtlich des Zielfunktionswertes beste gefundene Individuum der jeweiligen Population. Von den 30 gespeicherten Individuen wird jeweils der kleinste und größte Zielfunktionswert, sowie der Mittelwert und das Streuungsmaß über die 30 Probleminstanzen betrachtet, wobei das Streuungsmaß jeweils das Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert der Zielfunktionswerte beschreibt. Die Verfahren werden nicht nur anhand der besten gefundenen Lösungen sondern auch anhand des Streuungsmaßes beurteilt. Eine belastbare Beurteilung der Stabilität der betrachteten Verfahren ist hier auf Basis des Streuungsmaßes zwar nicht möglich, da eine hohes Streuungsmaß auf große Unterschiede der erzeugten Instanzen zurückzuführen sein könnte und nicht notwendigerweise auf ein instabiles Verfahren. Da die 30 erzeugten Instanzen jedoch für alle Verfahren identisch sind, dient das Streuungsmaß als Indikator für die Stabilität der betrachteten Verfahren.

Zunächst werden Vorläufe zur Bestimmung der Verfahrensparameter NIVEAU1 und NIVEAU2 bei Anwendung des Losgrößenmodus AB durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse der Testläufe der Varianten des PDZ-Verfahrens tabellarisch und graphisch dargestellt und bewertet.

5.1.2.1 Vorläufe zur Bestimmung von NIVEAU 1 und NIVEAU 2 bei dem Losgrößenmodus AB

Um die Parameter NIVEAU1 und NIVEAU2 bei dem Losgrößenmodus AB festzulegen, wurden Testläufe über je 30 Probleminstanzen in den Testfeldern 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mit dem Prioritätsregelverfahren *KOSTZEIT* für 13 verschiedene Ausprägungs-Konfigurationen von NIVEAU1 und von NIVEAU2 durchgeführt.

Die verschiedenen NIVEAU-Konfigurationen werden wie folgt numeriert:

Nummer	NIVEAU 1	NIVEAU 2
1	0,4	0,2
2	0,5	0,2
3	0,6	0,2
4	0,6	0,3
5	0,6	0,4
6	0,8	0,2
7	0,8	0,3
8	0,8	0,4
9	0,8	0,5
10	0,9	0,4
11	0,9	0,5
12	0,9	0,6
13	0,9	0,7

Tabelle 5.3: NIVEAU-Konfigurationen für den Losgrößenmodus AB

Der Abbildung 5.1 sind die Mittelwerte, und der Abbildung 5.2 das Streuungsmaß der Zielfunktionswerte über die 30 Testläufe je Testfeld in Abhängigkeit von der NIVEAU-Konfiguration zu entnehmen. Die Erläuterungen zu den Ergebnissen finden sich im Anschluß an die Abbildungen.

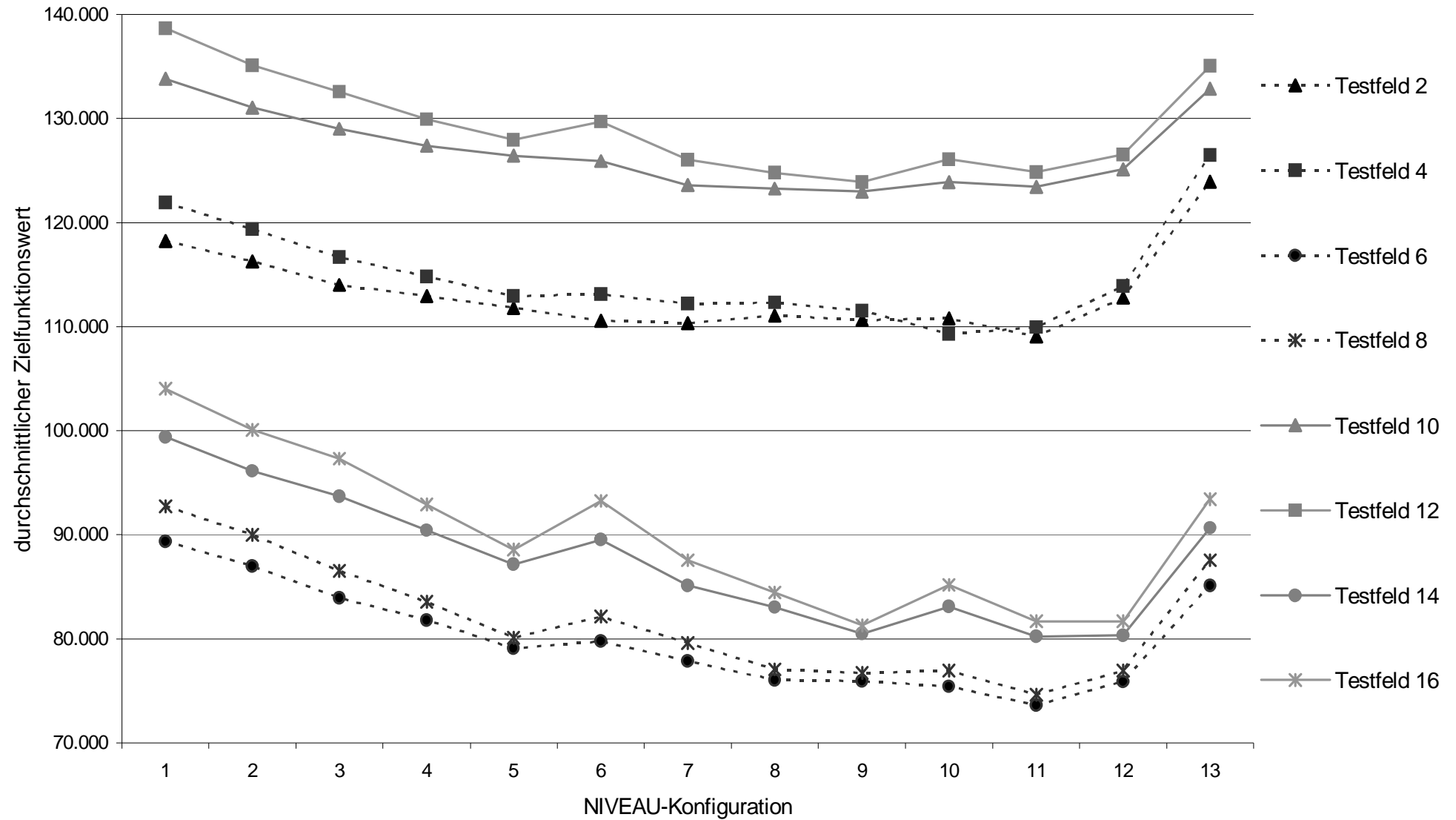


Abbildung 5.1: Mittelwert der mit dem Verfahren PDZ_{AB}^K ermittelten Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der NIVEAU-Konfiguration

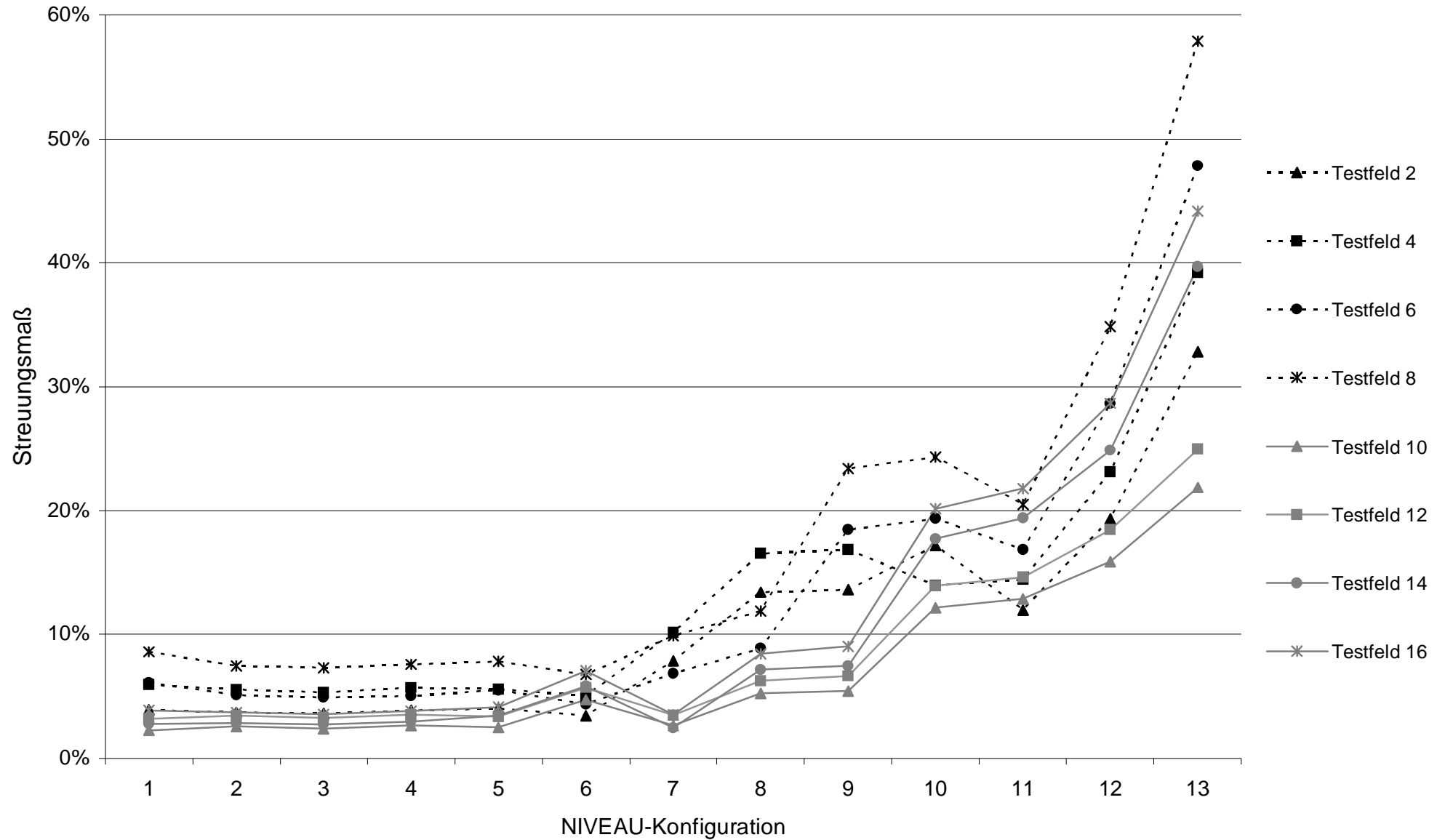


Abbildung 5.2: Streuungsmaß der mit dem Verfahren PDZ_{AB}^K ermittelten Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der NIVEAU-Konfiguration

Erläuterung der Abbildungen

Die Abbildung 5.1 zeigt, daß sich der Mittelwert der Zielfunktionswerte tendenziell bei Erhöhung der NIVEAU-Werte bis zu der Konfiguration 11 verringert und dann steil ansteigt. Die Spannweiten der Mittelwerte ((höchster Mittelwert–niedrigster Mittelwert)/niedrigster Mittelwert) in Abhängigkeit von der NIVEAU-Konfiguration sind in den Testfeldern 6, 8, 14 und 16 deutlich größer (zwischen 21% und 28%) als in den Testfeldern 2, 4, 10 und 12 (zwischen 8% und 16%), was auf den Faktor *reg* zurückzuführen ist. In den Testfeldern 6, 8, 14 und 16 beträgt *reg*=4, in den Testfeldern 2, 4, 10, und 12 hingegen beträgt *reg*=10. Die relative Relevanz der Lagerungskosten ist in dem ersten Fall also höher als in dem zweiten Fall. Hieraus folgt, daß in den Testfeldern 2, 4, 10 und 12 durch das Aufsplitten von Losen, d. h. durch Erhöhung der NIVEAU-Werte, die dadurch erzielbare Reduzierung der Lagerungskosten relativ zu der Erhöhung der Loswechselkosten nicht so schwer wiegt wie in den Testfeldern 6, 8, 14 und 16.¹

Aus Abbildung 5.2 wird deutlich, daß sich das Streuungsmaß bei Erhöhung der NIVEAU1-Werte bis zu der Konfiguration 6 tendenziell konstant verhält und ab der Konfiguration 7 in den Testfeldern 10, 12, 14, und 16, d. h. in den Testfeldern mit $I=61$, kontinuierlich steigt. In den Testfeldern 2, 4, 6 und 8 steigt das Streuungsmaß mit dem Ausnahmereich der Konfigurationen 10 und 11 ebenfalls an. Die durch den Parameter *reg* hervorgerufenen Unterschiede wirken sich auf das Streuungsmaß insofern aus, als in den Testfeldern 6 und 8 relativ zu den Testfeldern 2 und 4 und in den Testfeldern 14 und 16 relativ zu den Testfeldern 10 und 12 die Reaktion des Streuungsmaßes in Abhängigkeit von der NIVEAU-Konfiguration tendenziell stärker ausfällt. Da bei Konfiguration 7 das Streuungsmaß noch in allen Testfeldern nahezu unter 10% bleibt, und bei dem Übergang von Konfiguration 6 auf Konfiguration 7 die Mittelwerte der Zielfunktionswerte zum Teil um fast 6% reduziert werden können, werden die Testläufe derjenigen PDZ-Verfahren, die den Losgrößenmodus AB verwenden, mit der Konfiguration 7, d. h. NIVEAU1=0,8 und NIVEAU2=0,3, durchgeführt.

5.1.2.2 Ergebnisse und Bewertung der PDZ-Verfahren

Die in Kapitel 4.4.2.2 differenzierten Verfahrensvarianten wurden in den Testfeldern 1-16 mit jeweils 30 erzeugten Probleminstanzen untersucht.

In den Feldern der folgenden Tabellen 5.4 - 5.7 stehen für jedes Verfahren (Zeilen) in jedem Testfeld (Spalten) untereinander die Mittelwerte der Zielfunktionswerte (in GE) aus den 30 erzeugten Probleminstanzen, der jeweils beste und schlechteste ermittelte Zielfunktionswert, sowie das Streuungsmaß (in %) über die 30 Testläufe. In jedem Testfeld sind der beste erzielte Mittelwert, der beste absolute Wert, der beste der schlechtesten Werte und das niedrigste Streuungsmaß **fett**, sowie die jeweils schlechtesten Werte *kursiv* gedruckt. Anschließend wird der Einfluß der Verfahrenskonfiguration und der Problem-Parameter auf die Qualität der Verfahren analysiert.

¹ Auf weitere Unterschiede zwischen den einzelnen Testfeldern wird im Rahmen der Ergebnisbewertung der PDZ-Testläufe eingegangen.

Nr.	Bezeichnung	Von den 30 Testläufen	Testfeld 1	Testfeld 2	Testfeld 3	Testfeld 4	Testfeld 5	Testfeld 6	Testfeld 7	Testfeld 8
1	PDZ_A^Z	Mittelwert [GE]	179931,3	143362,6	183125,9	146443,5	116060,8	100900,1	119278,6	104065,3
		Bester Wert [GE]	168936,0	132726,0	170424,0	134167,0	105929,0	91897,0	107755,0	93900,0
		Schlechtester Wert [GE]	193082,0	154160,0	202454,0	159846,0	128619,0	112143,0	137603,0	116038,0
		Streuungsmaß	3,15%	3,50%	4,14%	4,69%	4,54%	4,88%	5,75%	6,14%
2	PDZ_B^Z	Mittelwert [GE]	151494,9	124668,9	160353,9	133498,4	104509,7	93295,9	113130,9	102064,4
		Bester Wert [GE]	141685,0	116756,0	147620,0	122691,0	95256,0	85344,0	100825,0	89835,0
		Schlechtester Wert [GE]	165010,0	134989,0	181614,0	150645,0	117124,0	102500,0	131809,0	118156,0
		Streuungsmaß	3,42%	3,84%	4,63%	5,30%	4,45%	4,66%	6,06%	6,69%
3	PDZ_{AB}^Z	Mittelwert [GE]	142103,0	112032,4	143567,4	113449,9	90228,4	78189,0	91551,7	79588,6
		Bester Wert [GE]	135002,0	104692,0	133425,0	103725,0	83748,0	70169,0	83773,0	70899,0
		Schlechtester Wert [GE]	149900,0	120388,0	153869,0	126083,0	95396,0	83832,0	100869,0	90327,0
		Streuungsmaß	2,89%	3,23%	3,67%	4,51%	3,07%	4,05%	4,91%	6,05%
4	PDZ_C^Z	Mittelwert [GE]	193064,6	158372,6	203326,4	168952,8	130415,2	117172,3	140065,4	128247,8
		Bester Wert [GE]	173300,0	134870,0	177592,0	140080,0	109202,0	92938,0	113462,0	112545,0
		Schlechtester Wert [GE]	207915,0	176294,0	222809,0	195272,0	149243,0	136684,0	165818,0	155831,0
		Streuungsmaß	3,75%	5,54%	4,97%	7,09%	6,37%	7,65%	7,88%	8,65%
5	PDZ_A^K	Mittelwert [GE]	170017,1	139849,9	172887,3	142940,5	112077,1	99899,9	115485,4	103309,2
		Bester Wert [GE]	157664,0	128570,0	159410,0	130898,0	102802,0	90699,0	104459,0	92771,0
		Schlechtester Wert [GE]	180830,0	152046,0	184823,0	155080,0	123915,0	108371,0	130082,0	114647,0
		Streuungsmaß	3,11%	3,66%	4,03%	4,62%	4,68%	5,30%	6,07%	6,25%
6	PDZ_B^K	Mittelwert [GE]	144623,8	122181,2	153478,0	131151,6	101238,7	92519,6	109977,1	101314,2
		Bester Wert [GE]	135987,0	112766,0	140963,0	117917,0	91629,0	82943,0	96657,0	89573,0
		Schlechtester Wert [GE]	156525,0	135591,0	173068,0	151390,0	112253,0	105462,0	128697,0	120918,0
		Streuungsmaß	3,54%	4,51%	4,88%	5,97%	4,37%	4,71%	6,31%	6,52%
7	PDZ_{AB}^K	Mittelwert [GE]	134243,2	108765,0	135759,2	110288,4	87134,4	76937,1	88585,6	78392,0
		Bester Wert [GE]	126625,0	100448,0	124970,0	98523,0	80176,0	68853,0	79984,0	69183,0
		Schlechtester Wert [GE]	143702,0	115527,0	147360,0	122216,0	93000,0	84075,0	98542,0	89778,0
		Streuungsmaß	3,13%	3,46%	3,71%	4,35%	3,62%	4,32%	4,74%	5,98%

Tabelle 5.4: Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 1-7 für die Testfelder 1-8

Nr.	Bezeichnung	Von den 30 Testläufen	Testfeld 1	Testfeld 2	Testfeld 3	Testfeld 4	Testfeld 5	Testfeld 6	Testfeld 7	Testfeld 8
8	PDZ_C^K	Mittelwert [GE]	183163,6	152295,3	193476,9	162576,5	125858,6	114187,3	135773,3	124980,1
		Bester Wert [GE]	162006,0	133541,0	167913,0	136528,0	107569,0	94540,0	113646,0	99738,0
		Schlechtester Wert [GE]	199201,0	171872,0	217059,0	188570,0	143765,0	135665,0	161334,0	154085,0
		Streuungsmaß	4,22%	4,97%	5,52%	6,76%	6,81%	7,68%	8,45%	9,38%
9	PDZ_A^{Zuf}	Mittelwert [GE]	195330,4	172603,6	198282,7	175786,0	122609,9	113262,6	125827,3	116384,3
		Bester Wert [GE]	185019,0	161806,0	185902,0	163425,0	112261,0	104046,0	113924,0	105587,0
		Schlechtester Wert [GE]	209124,0	183682,0	212610,0	190214,0	135117,0	123053,0	138959,0	129688,0
		Streuungsmaß	2,94%	3,45%	3,82%	4,53%	4,05%	4,70%	5,19%	5,93%
10	PDZ_B^{Zuf}	Mittelwert [GE]	163470,6	145807,0	172449,4	154791,9	109505,2	102278,9	118247,0	110988,2
		Bester Wert [GE]	152254,0	131234,0	157897,0	136162,0	98353,0	91710,0	103801,0	96638,0
		Schlechtester Wert [GE]	176740,0	160905,0	192849,0	177542,0	120865,0	113653,0	136974,0	129091,0
		Streuungsmaß	3,55%	3,98%	4,63%	5,39%	4,54%	4,86%	6,22%	6,74%
11	PDZ_{AB}^{Zuf}	Mittelwert [GE]	155412,7	134638,6	156968,2	136212,3	95777,1	87590,3	97243,9	89051,9
		Bester Wert [GE]	145580,0	125403,0	144527,0	124439,0	90112,0	80508,0	88578,0	80053,0
		Schlechtester Wert [GE]	164656,0	145383,0	169649,0	151124,0	102642,0	94084,0	108552,0	100231,0
		Streuungsmaß	3,02%	3,22%	3,76%	4,22%	3,27%	3,75%	5,02%	5,62%
12	PDZ_C^{Zuf}	Mittelwert [GE]	207841,0	184618,8	218264,5	194658,9	135797,9	126643,0	146174,2	136811,8
		Bester Wert [GE]	189606,0	166694,0	195124,0	171432,0	115418,0	106760,0	120514,0	111881,0
		Schlechtester Wert [GE]	221954,0	200874,0	240625,0	219705,0	154554,0	149983,0	175003,0	168814,0
		Streuungsmaß	3,83%	4,48%	5,07%	5,76%	6,27%	6,75%	8,17%	8,39%
13	PDZ_D^{Zuf}	Mittelwert [GE]	246592,1	229933,4	261304,1	246438,4	194479,8	187885,6	210376,0	204128,1
		Bester Wert [GE]	226919,0	194295,0	218772,0	202460,0	171555,0	147553,0	179118,0	155149,0
		Schlechtester Wert [GE]	273567,0	259764,0	303184,0	286871,0	222537,0	220007,0	251566,0	245880,0
		Streuungsmaß	5,47%	6,88%	7,81%	8,69%	8,24%	9,45%	10,16%	11,45%

Tabelle 5.5: Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 8-13 für die Testfelder 1-8

Nr.	Bezeichnung	Von den 30 Testläufen	Testfeld 9	Testfeld 10	Testfeld 11	Testfeld 12	Testfeld 13	Testfeld 14	Testfeld 15	Testfeld 16
1	PDZ_{A}^Z	Mittelwert [GE]	175127,4	152667,1	178872,7	156264,0	107184,2	98308,6	110844,3	101884,5
		Bester Wert [GE]	168083,0	142922,0	168895,0	146304,0	100510,0	90097,0	103679,0	94208,0
		Schlechtester Wert [GE]	182280,0	160467,0	185255,0	164384,0	114816,0	106525,0	117180,0	110442,0
		Streuungsmaß	1,95%	2,56%	2,36%	2,95%	3,09%	3,75%	3,38%	3,98%
2	PDZ_{B}^Z	Mittelwert [GE]	156612,1	141966,8	166964,1	152444,4	110806,0	105009,3	120953,9	115278,6
		Bester Wert [GE]	144462,0	133311,0	148693,0	147506,0	102829,0	97140,0	107645,0	101625,0
		Schlechtester Wert [GE]	164606,0	152614,0	179906,0	168765,0	118792,0	113911,0	134526,0	129857,0
		Streuungsmaß	2,53%	2,85%	3,66%	4,08%	3,05%	3,46%	4,61%	5,08%
3	PDZ_{AB}^Z	Mittelwert [GE]	144643,2	127462,6	147188,1	129967,8	93898,8	86759,7	96430,7	89115,3
		Bester Wert [GE]	135881,0	119684,0	134354,0	117865,0	89017,0	81293,0	88715,0	82159,0
		Schlechtester Wert [GE]	164966,0	134441,0	171182,0	140618,0	111592,0	91264,0	117808,0	96260,0
		Streuungsmaß	4,30%	2,73%	4,23%	3,88%	5,24%	2,81%	6,47%	4,00%
4	PDZ_{C}^Z	Mittelwert [GE]	184225,9	162277,0	192659,7	171093,5	116755,7	108547,2	125307,7	117482,6
		Bester Wert [GE]	170529,0	150347,0	172742,0	153907,0	103689,0	98972,0	105902,0	103352,0
		Schlechtester Wert [GE]	193278,0	173228,0	205696,0	184953,0	125002,0	118543,0	137213,0	132268,0
		Streuungsmaß	2,63%	3,09%	3,59%	4,02%	4,06%	4,29%	5,31%	5,28%
5	PDZ_{A}^K	Mittelwert [GE]	164391,1	147030,4	167922,5	150734	102841,5	96301,4	106370,4	99872,4
		Bester Wert [GE]	156063,0	138486,0	158989,0	142059,0	95591,0	91424,0	98335,0	93783,0
		Schlechtester Wert [GE]	170145,0	155014,0	173765,0	159915,0	111173,0	106011,0	113039,0	106841,0
		Streuungsmaß	2,09%	2,64%	2,52%	3,08%	3,51%	3,61%	3,76%	3,79%
6	PDZ_{B}^K	Mittelwert [GE]	149878,5	138360,9	160275,9	149232,7	107951,0	103468,0	118174,6	113624,9
		Bester Wert [GE]	140643,0	128201,0	145071,0	132813,0	99327,0	95662,0	103214,0	99683,0
		Schlechtester Wert [GE]	159504,0	147435,0	176339,0	163965,0	116656,0	113865,0	132740,0	130211,0
		Streuungsmaß	2,62%	2,77%	3,87%	4,00%	3,12%	3,30%	4,76%	4,99%
7	PDZ_{AB}^K	Mittelwert [GE]	137357,3	123579,4	139795,2	126029,5	90214,9	85137,2	92494,1	87526,7
		Bester Wert [GE]	129689,0	117574,0	127354,0	115763,0	84836,0	80274,0	86351,0	81778,0
		Schlechtester Wert [GE]	157961,0	130894,0	160174,0	136965,0	94129,0	89411,0	99802,0	94565,0
		Streuungsmaß	3,71%	2,64%	4,25%	3,47%	2,48%	2,47%	3,52%	3,53%

Tabelle 5.6: Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 1-7 für die Testfelder 9-16

Nr.	Bezeichnung	Von den 30 Testläufen	Testfeld 9	Testfeld 10	Testfeld 11	Testfeld 12	Testfeld 13	Testfeld 14	Testfeld 15	Testfeld 16
8	PDZ_C^K	Mittelwert [GE]	173302,8	156519,1	182068,9	165368,0	112132,7	106005,6	120903,8	114675,4
		Bester Wert [GE]	162115,0	143611,0	165247,0	147876,0	99527,0	90188,0	105326,0	93695,0
		Schlechtester Wert [GE]	183008,0	169027,0	196010,0	179156,0	123635,0	119627,0	136803,0	130341,0
		Streuungsmaß	2,46%	3,78%	3,44%	4,69%	4,55%	5,48%	5,91%	6,55%
9	PDZ_A^{Zuf}	Mittelwert [GE]	193815,8	192101,4	197283,7	195612,1	114783,8	114814,3	118508,4	118023,6
		Bester Wert [GE]	183296,0	180752,0	185242,0	182210,0	108814,0	109057,0	110587,0	111228,0
		Schlechtester Wert [GE]	198883,0	199266,0	203609,0	203100,0	119606,0	120879,0	123363,0	124114,0
		Streuungsmaß	2,11%	2,46%	2,59%	2,88%	2,80%	2,97%	3,26%	3,34%
10	PDZ_B^{Zuf}	Mittelwert [GE]	169417,4	168357,3	179990,9	179098,3	116102,2	116233,0	126484,9	126746,6
		Bester Wert [GE]	157772,0	155794,0	162489,0	159786,0	107089,0	106371,0	111806,0	110363,0
		Schlechtester Wert [GE]	179150,0	176642,0	195589,0	192953,0	125478,0	124512,0	141446,0	140901,0
		Streuungsmaß	2,39%	2,85%	3,45%	3,88%	3,20%	3,58%	4,67%	5,05%
11	PDZ_{AB}^{Zuf}	Mittelwert [GE]	158137,2	156626,8	160597,1	159123,7	99115,4	98887,8	101439,5	101258,2
		Bester Wert [GE]	149555,0	146174,0	147989,0	144638,0	93284,0	94171,0	94172,0	93510,0
		Schlechtester Wert [GE]	166212,0	165187,0	172070,0	171521,0	103500,0	103668,0	108806,0	108767,0
		Streuungsmaß	2,52%	2,77%	3,20%	3,35%	2,26%	2,46%	3,35%	3,38%
12	PDZ_C^{Zuf}	Mittelwert [GE]	202746,8	201156,5	211636,8	209936,4	124284,2	124021,4	133079,2	132839,9
		Bester Wert [GE]	189614,0	188646,0	192456,0	193584,0	111969,0	113796,0	114811,0	118405,0
		Schlechtester Wert [GE]	213917,0	209884,0	226691,0	220615,0	135931,0	134674,0	148705,0	147328,0
		Streuungsmaß	2,70%	2,64%	3,56%	3,30%	4,17%	3,68%	5,44%	4,90%
13	PDZ_D^{Zuf}	Mittelwert [GE]	256197,7	255273,0	275111,6	273788,7	202303,1	201705,8	220822,4	219552,5
		Bester Wert [GE]	226018,0	226737,0	229848,0	229614,0	171306,0	171375,0	176419,0	174252,0
		Schlechtester Wert [GE]	292599,0	287750,0	326717,0	320169,0	247087,0	244293,0	279358,0	274961,0
		Streuungsmaß	5,46%	5,50%	7,08%	7,06%	8,12%	8,23%	9,78%	9,89%

Tabelle 5.7: Ergebnistabelle der PDZ-Verfahren 8-13 für die Testfelder 9-16

Einfluß der Verfahrenskonfiguration und der Problem-Parameter auf die Zielfunktionswerte**Losgrößenmodus:**

Der Losgrößenmodus AB ist den anderen Modi in jeder der möglichen Kombinationen mit den Prioritätsregeln zur Reihenfolgebestimmung in jedem Testfeld überlegen (siehe auch zu den folgenden Ausführungen die Abbildungen 5.3 bis 5.5). Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Modus AB die beiden Komponenten Orientierung an den Lagerkosten (Modus A) und das Gruppieren von Aufträgen (Modus B) kombiniert.

Mit dem Modus B werden in den Testfeldern 1-12 die zweitbesten Ergebnisse hinsichtlich der Mittelwerte der Zielfunktionswerte erzielt, wobei die relativ zu dem Modus AB schlechtesten Werte mit dem Modus B in denjenigen Testfeldern auftreten, in denen das Verhältnis $rel(k_i)$ hoch ist, da beim Modus B die Losgrößenentscheidung ohne Berücksichtigung der Lagerkostensätze getroffen wird.

Mit dem Modus A werden in den Testfeldern 13-16 die zweitbesten Ergebnisse hinsichtlich der Mittelwerte der Zielfunktionswerte erzielt. Genau gegenteilig zu dem Modus B werden die relativ zu dem Modus AB besten Werte mit dem Modus A in denjenigen Testfeldern erzielt, in denen das Verhältnis $rel(k_i)$ hoch ist, da beim Modus A die Losgrößenentscheidung in Abhängigkeit von den Lagerkosten getroffen wird. Dieser Vorteil ist in denjenigen Testfeldern mit niedrigem reg größer, da der relative Anteil der Lagerkosten an den entscheidungsrelevanten Kosten relativ zu den Testfeldern mit hohem reg größer ist, und somit auch die von den Lagerkosten abhängigen Entscheidungen einen größeren Einfluß auf die Zielfunktionswerte nehmen können.

Mit Ausnahme des Losgrößenmodus D, welcher nur in Kombination mit der Auswahlregel ZUFALL getestet wurde und insofern nicht für einen Vergleich der Losgrößenmodi geeignet ist, liefert der Losgrößenmodus C in jeder der möglichen Kombinationen mit den zur Verfügung stehenden Prioritätsregeln zur Reihenfolgebestimmung in jedem Testfeld das jeweils schlechteste Ergebnis.

Der Unterschied zwischen den durchschnittlichen Zielfunktionswerten ist bei Anwendung der verschiedenen Losgrößenmodi bei jeweils gleicher Prioritätsregel größer als der Unterschied der durchschnittlichen Zielfunktionswerte bei Anwendung der verschiedenen Prioritätsregeln bei jeweils gleichem Losgrößenmodus (siehe im Vergleich zu den Abbildungen 5.3 bis 5.5 hierzu die Abbildungen 5.6 bis 5.9). Dies ist auf den insgesamt größeren Anteil der Lagerungskosten an den entscheidungsrelevanten Kosten, in Abhängigkeit von reg beträgt dieser ca. zwischen 53% und 88% (siehe hierzu auch „Regulierender Faktor reg “, S. 145 v. A.), zurück zu führen.

Prioritätsregel zur Reihenfolgebestimmung:

In allen 16 Testfeldern und bei jedem Losgrößenmodus ist die Prioritätsregel KOSTZEIT der Prioritätsregel ZEITKOST und der Auswahlregel ZUFALL überlegen (siehe auch zu den folgenden Ausführungen die Abbildungen 5.6 bis 5.9).

Der Abstand der mit der Prioritätsregel KOSTZEIT erreichten durchschnittlichen Zielfunktionswerte von den mit der Prioritätsregel ZEITKOST ermittelten durchschnittlichen Zielfunktionswerten ist in den Testfeldern mit hohem reg (Testfelder 1-4, 9-12), insbesondere in Kombination mit einer niedrigen Ausprägung des Verhältnisses $rel(t_{ij})$, größer als in den übrigen Testfeldern. Die von der höheren Ausprägung von reg und des somit insgesamt höheren Niveaus der Umrüstkosten ausgehende verstärkende Wirkung ist zu erwarten gewesen. Der größere Abstand zwischen den durchschnittlichen Zielfunktionswerten bei einem

niedrigeren Verhältnis $rel(t_{ij})$ (Testfelder 1, 3, 9 und 11) ist darauf zurückzuführen, daß in diesem Fall die Ausprägungen der Basiswerte zur Bestimmung der Loswechselkosten, c_{ij}^t , welche aus der e -Umgebung um die Loswechselzeiten zufällig gewählt werden (vgl. Abschnitt 5.1.1.2 v. A.) absolut näher an den Ausprägungen der Loswechselzeiten liegen, als in dem Fall, daß $rel(t_{ij})$ groß ist.

Mit der Regel *ZUFALL* werden in allen Testfelder mit allen möglichen Kombinationen der zur Verfügung stehenden Losgrößenmodi die schlechtesten Werte erreicht.

Produktartenanzahl I:

Die Unterschiede der mit den Losgrößenmodi A, AB und B erzielten Ergebnisse sind relativ zu dem Losgrößenmodus C in den Testfeldern mit kleinerer Produktartenanzahl (Testfelder 1-8) tendenziell größer als in den Testfeldern mit größerer Produktartenanzahl (Testfelder 9-16). (siehe Abb. 5.3 bis 5.6). Insbesondere der Unterschied zwischen den Modi B und C ist in den Testfeldern mit hoher Produktartenanzahl und relativ niedrigem Gewicht der Lagerungskosten (Testfelder 13-16) in allen möglichen Kombination mit den zur Verfügung stehenden Prioritätsregeln zur Reihenfolgebestimmung aus folgendem Grund deutlich geringer als in den übrigen Testfeldern: Sowohl die Losgrößenmodi B als auch C treffen die Losgrößenentscheidung zufällig, der Modus C aus dem zuvor zu bestimmenden Intervall und der Modus B durch zufällige Gruppierung der externen Auftragsmengen. Da bei $I=61$ die Spannweite der externen Auftragsmengen deutlich geringer ist als bei $I=31$, führen beide Modi zu ähnlich schlechten Ergebnissen.

Die relativen Unterschiede zwischen den Zielfunktionsmittelwerten, die mit den verschiedenen Prioritätsregeln zur Reihenfolgebestimmung bei jeweils gleichem Losgrößenmodus ermittelt wurden, sind in den Testfeldern mit größerem I tendenziell höher als in den Testfeldern mit niedrigem I . Ein Erklärungsansatz hierfür besteht darin, daß mit größerer Produktartenanzahl die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten und somit das Potential, gute Reihenfolgen zu bilden, größer ist als bei einer kleineren Produktartenanzahl.

Regulierender Faktor *reg*:

In Abhängigkeit von dem Verfahren liegen die relativen Anteile der Umrüstkosten an den entscheidungsrelevanten Kosten bei $reg=4$ zwischen ca. 12% und 22% und bei $reg=10$ zwischen ca. 23% und 43%. In den Testfeldern 5-8 und 13-16, d. h. bei niedrigerem reg und somit größerem relativen Einfluß der Lagerungskosten auf die durchschnittlichen entscheidungsrelevanten Kosten, ist die Position von Losgrößenmodus A besser als in den Testfeldern 1-4 und 9-12, und entsprechend schlechter die Position der die Lagerkosten nicht berücksichtigenden Losgrößenmodi B und C.

Verhältnis $rel(k_i)$:

Relativ zu dem Losgrößenmodus B begünstigt aufgrund der Orientierung an den Lagerungskosten ein großes Verhältnis $rel(k_i)$ den Losgrößenmodus A, insbesondere in Kombination mit einem ebenfalls großen Verhältnis $rel(t_{ij})$. Zwar liegen die mit Modus A und mit Modus B erreichten Zielfunktionsmittelwerte auch in den Testfeldern 3 und 4 deutlich auseinander, der Unterschied ist jedoch c. p. kleiner als bei einem kleinen Verhältnis $rel(k_i)$, d. h. in Testfeld 4 kleiner als in 2 und in 3 kleiner als in 1. Analog tritt in den Testfeldern 13 und 14 die Situation auf, daß trotz kleinen Verhältnisses $rel(k_i)$ der Modus A dem Modus B überlegen ist, auch hier gilt aber, daß dieser Unterschied c. p. kleiner ist als bei einem großen Verhältnis

von $rel(k_i)$, d. h. in Testfeld 13 kleiner als in 15 und in 14 kleiner als in 16. Das durchschnittliche Kostenniveau ist bei Konstanz von I und reg in den Testfeldern mit $rel(k_i)=3$ bei den Losgrößenmodi B und C niedriger als in den Testfeldern mit $rel(k_i)=8$, d. h. in 3 höher als in 1, in 4 höher als in 2, in 7 höher als in 5, in 8 höher als in 6 etc. Bei den Losgrößenmodi A und AB nimmt die Variation von $rel(k_i)$ nur sehr geringen Einfluß auf das durchschnittliche Kostenniveau.

Verhältnis $rel(t_{ij})$:

Das durchschnittliche Niveau der entscheidungsrelevanten Kosten ist bei Konstanz von I und reg in den Testfeldern mit $rel(t_{ij})=2$ deutlich höher als in den Testfeldern mit $rel(t_{ij})=8$, d. h. in 1 höher als in 2, in 3 höher als 4, etc., wobei der relative Unterschied des durchschnittlichen Kostenniveaus in Abhängigkeit von $rel(t_{ij})$ in den Testfeldern mit höherem I geringer ist. Dieser Effekt wird in den Testfeldern mit hohem reg (Testfelder 1-4 und 9-13) verstärkt. Bei allen Losgrößenmodi ist der Abstand zwischen den Prioritätsregeln $ZEITKOST$, $KOSTZEIT$ und der Prioritätsregel $ZUFALL$ in den Testfeldern mit $rel(t_{ij})=8$ höher als in denen mit $rel(t_{ij})=2$, da das Potential der gezielten Reihenfolgebildung zur Erzeugung besserer Lösungen in den Testfeldern mit höherem $rel(t_{ij})$ entsprechend größer ist.

Zusammenspiel der Verhältnisse $rel(t_{ij})$ und $rel(k_i)$:

Große Verhältnisse $rel(t_{ij})$ und $rel(k_i)$ erhöhen bei den Losgrößenmodi B und C den relativen Unterschied der durchschnittlichen Kosten zu dem Losgrößenmodus AB. Für die Position der mit dem Losgrößenmodus A erzielten Lösungen spielen die Verhältnisse $rel(t_{ij})$ und $rel(k_i)$ eine relativ zu dem von der Produktartenzahl I und von reg ausgehenden Einfluß geringe Rolle.

Vergleich mit dem Zufallsverfahren PDZ_D^{Zuf} :

Die mit dem Zufallsverfahren PDZ_D^{Zuf} erzielten durchschnittlichen Zielfunktionswerte betragen ca. zwischen 180% und 260% der mit dem PDZ_{AB}^K erzielten durchschnittlichen Zielfunktionswerte (siehe Abbildung 5.10). Die niedrigere Ausprägung von reg verstärkt den Abstand, ebenso wie ein größeres Verhältnis $rel(t_{ij})$. Da einerseits die Unterschiede in der Lösungsgüte zwischen dem besten PDZ -Verfahren und dem PDZ_D^{Zuf} so massiv sind, und andererseits die Laufzeitunterschiede der Verfahren durchschnittlich nur bei ca. 0,003% liegen, konnte auf einen Testlauf, der das Zufallsverfahren PDZ_D^{Zuf} für einen Vergleich unter identischen zeitlichen Bedingungen, d. h. mit der exakt gleichen Zeit wie das PDZ_{AB}^K laufen läßt, verzichtet werden, da die zusätzliche Zeit für das Zufallsverfahren vermutlich nicht ausgereicht hätte, auch nur eine weitere Lösung vollständig zu erzeugen.

Graphische Darstellung der Ergebnisse

Zusammenfassend veranschaulichen die folgenden Abbildungen die Ergebnisse. Abbildung 5.3 vergleicht die vier Losgrößenmodi in den 16 Testfeldern bei Verwendung der Prioritätsregel *ZEITKOST*, Abbildung 5.4 respektive bei Verwendung der Prioritätsregel *KOSTZEIT* und Abbildung 5.5 respektive bei Verwendung der Prioritätsregel *ZUFALL*. Die Abbildungen 5.6 bis 5.9 stellen jeweils die verschiedenen Prioritätsregelverfahren zur Reihenfolgebestimmung bei Losgrößenmodus A, B, AB bzw. C gegenüber. In Abbildung 5.10 ist für jedes Testfeld die Abweichung des mit dem Zufallsverfahren PDZ_D^{Zuf} ermittelten Zielfunktionsmittelwertes zu dem mit dem PDZ_{AB}^K erreichten Zielfunktionsmittelwert dargestellt.

In Abbildung 5.11 werden die Streuungsmaße der 13 untersuchten *PDZ*-Verfahren in den 16 Testfeldern gezeigt. In Abbildung 5.12 sind die über die 16 Testfelder ermittelten durchschnittlich mittleren, sowie die durchschnittlich besten und die durchschnittlich schlechtesten Zielfunktionswerte, und in Abbildung 5.13 die über die 16 Testfelder ermittelten durchschnittlichen Streuungsmaße und die durchschnittlichen Worst-Case-Abweichungen für die 13 Verfahrenskonfigurationen dargestellt. Aus Abbildung 5.12 geht hervor, daß sich die Rangfolge der Verfahren in bezug auf die durchschnittlich besten und durchschnittlich schlechtesten Zielfunktionswerte von der Rangfolge der Verfahren der über die 30 Testläufe je Testfeld durchschnittlichen Kosten nur zweimal unterscheidet: Verfahren 6 (Verfahren 8) weist einen über die 16 Testfelder besseren durchschnittlich besten und durchschnittlich mittleren Zielfunktionswert als Verfahren 5 (Verfahren 9) jedoch einen ebenso schlechten durchschnittlich schlechtesten Zielfunktionswert auf. Diese Beobachtung spricht für die Stabilität des Losgrößenmodus A (vgl. hierzu auch Abbildung 5.13).

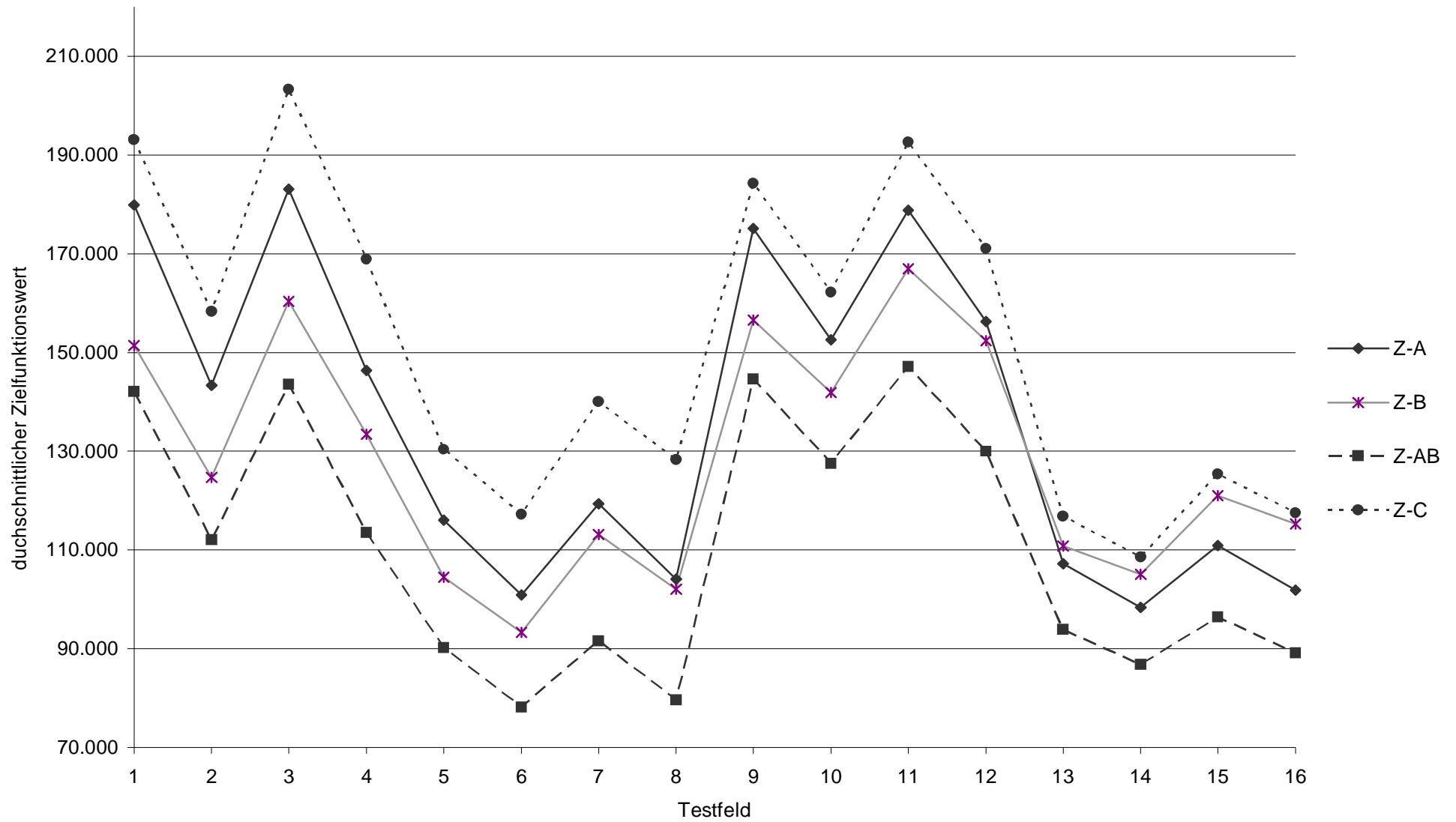


Abbildung 5.3: Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Losgrößenmodi bei Anwendung der Prioritätsregel ZEITKOST

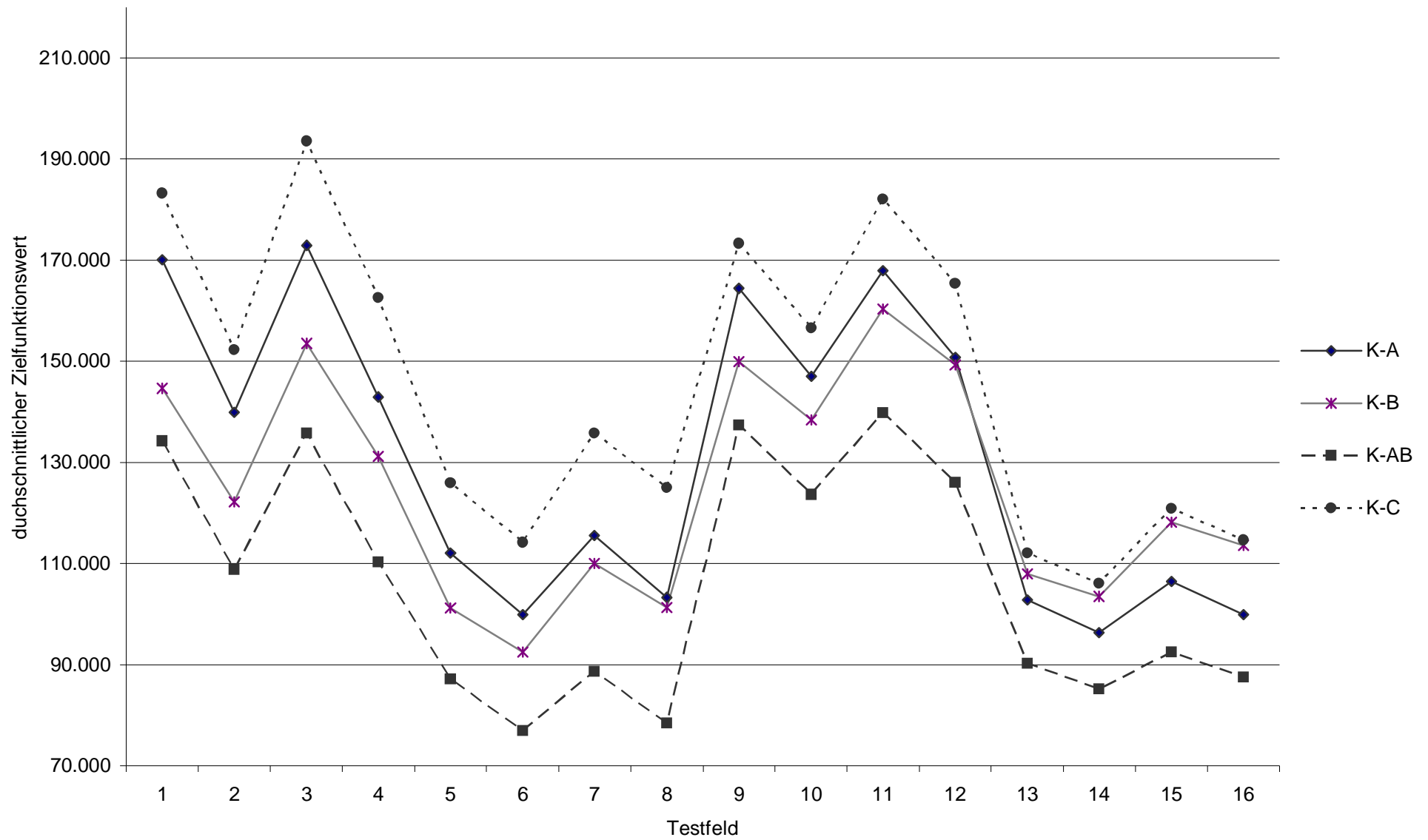


Abbildung 5.4: Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Losgrößenmodi bei Anwendung der Prioritätsregel *KOSTZEIT*

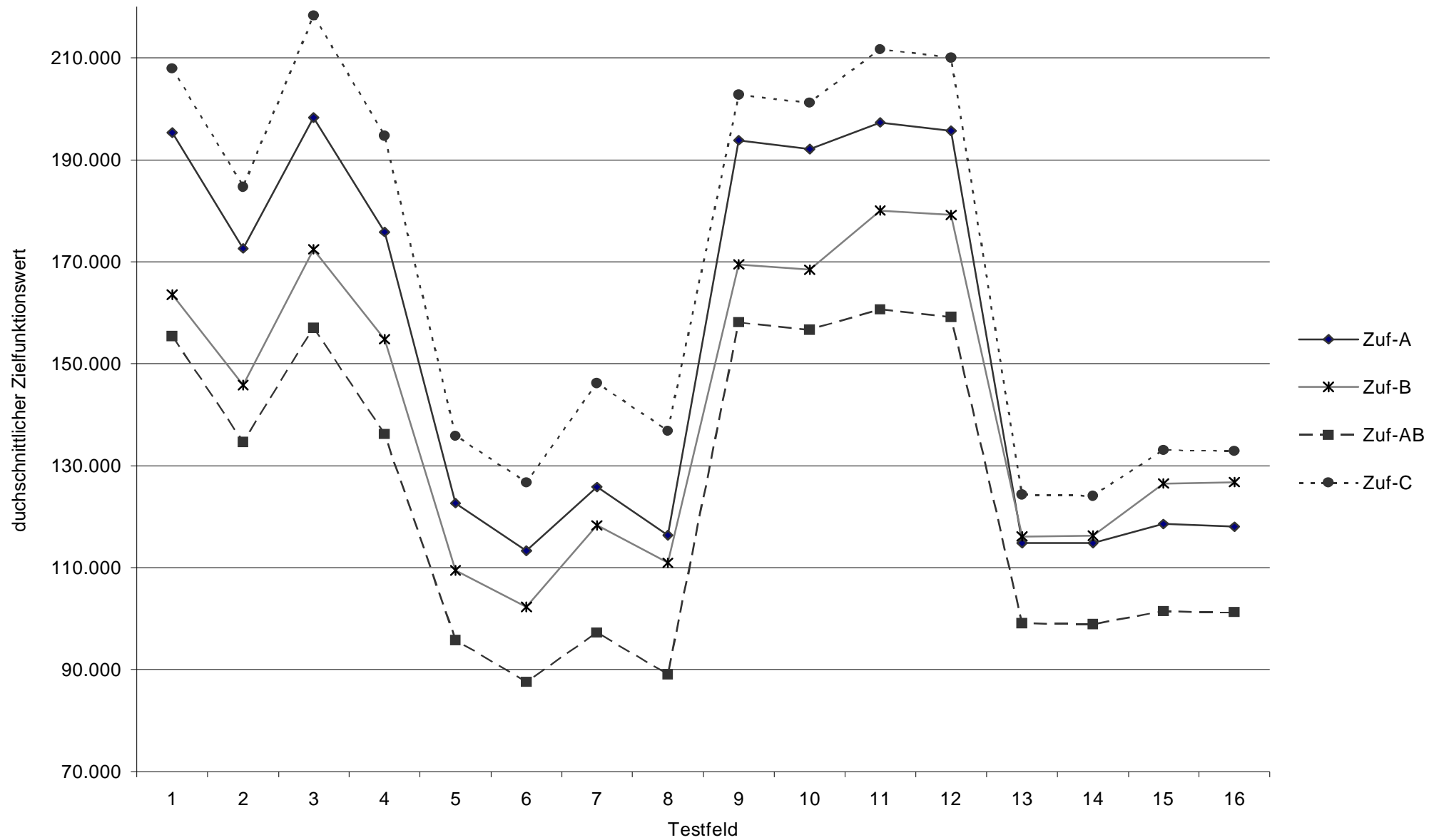


Abbildung 5.5: Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Losgrößenmodi bei Anwendung der Prioritätsregel ZUFALL

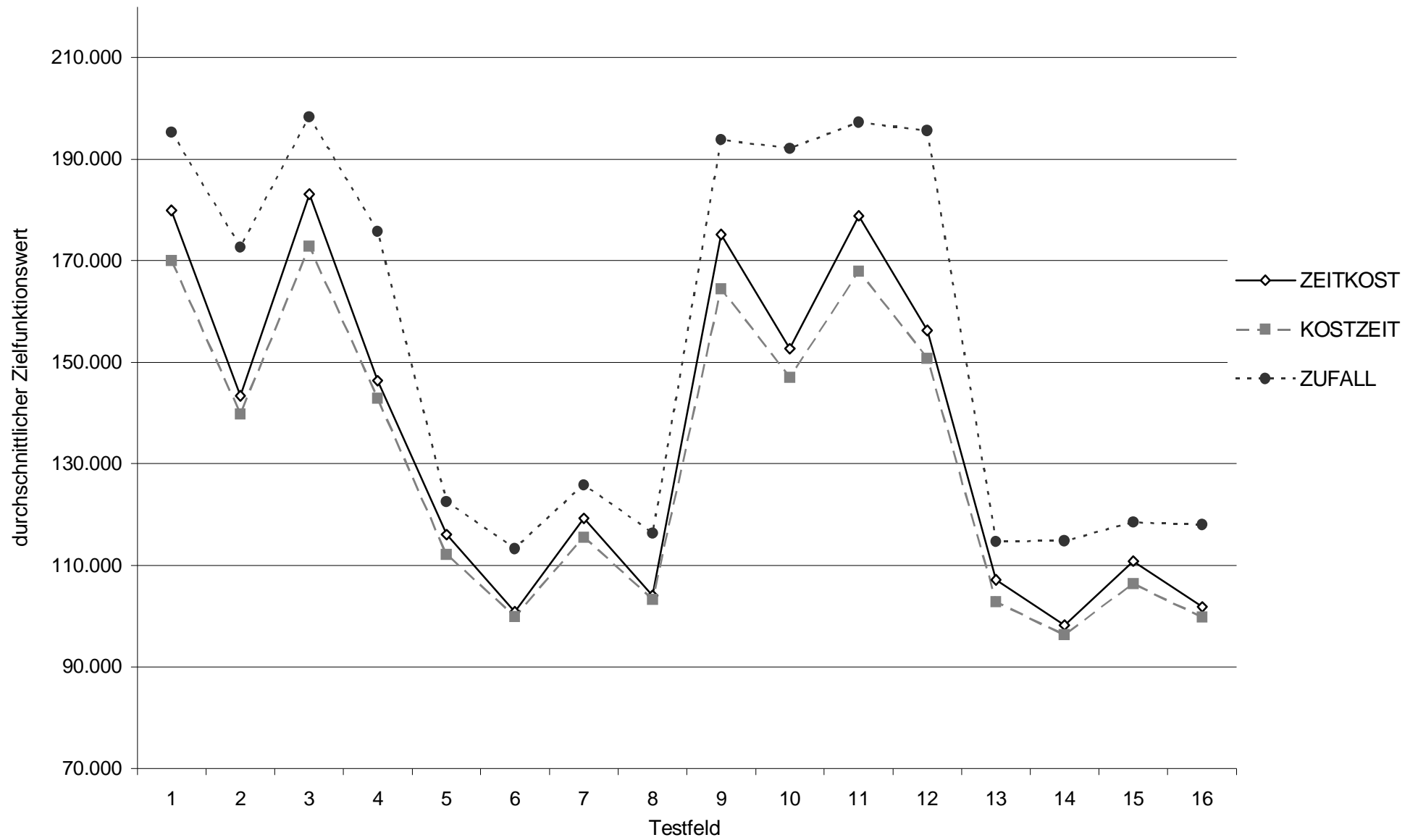


Abbildung 5.6: Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus A

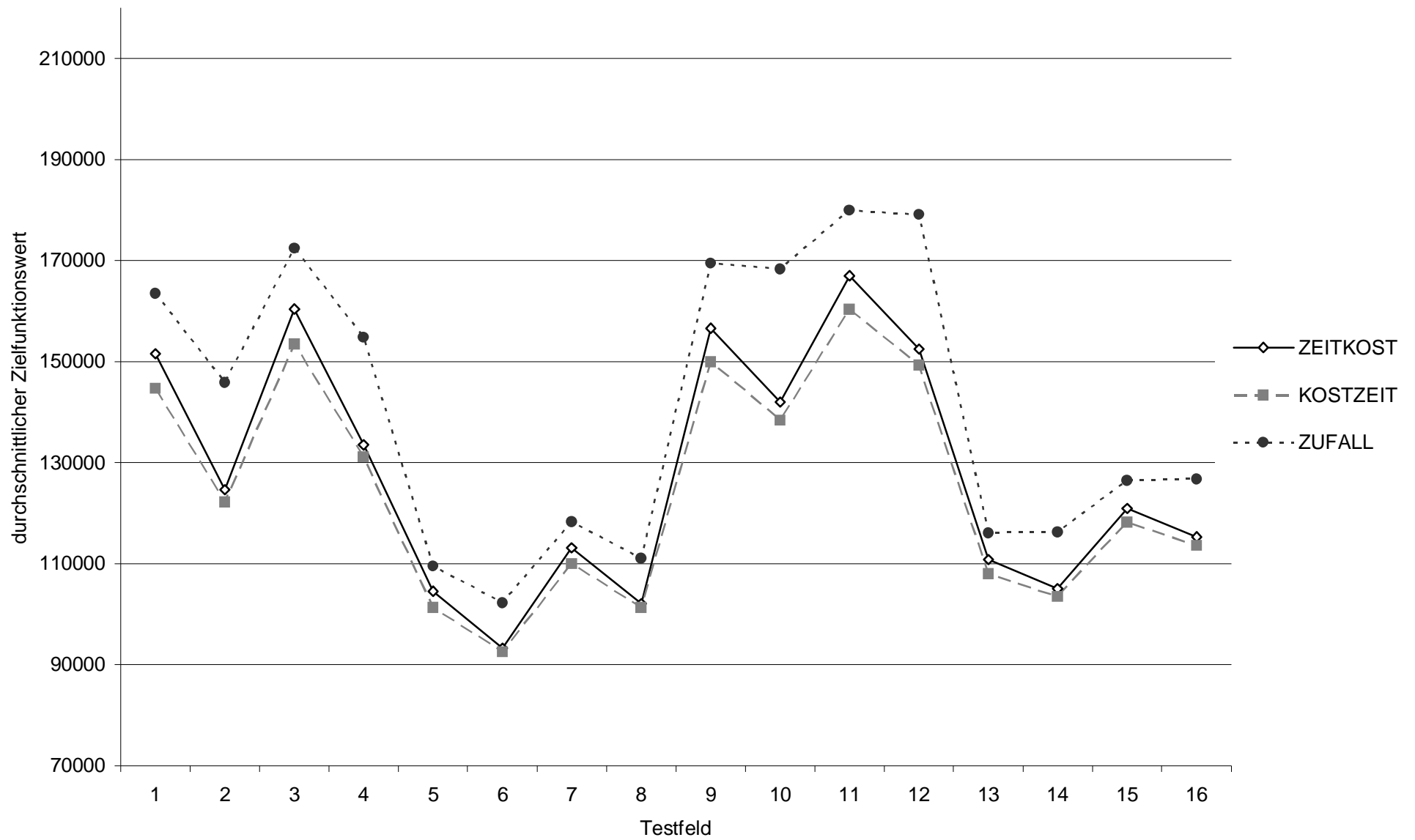


Abbildung 5.7: Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus B

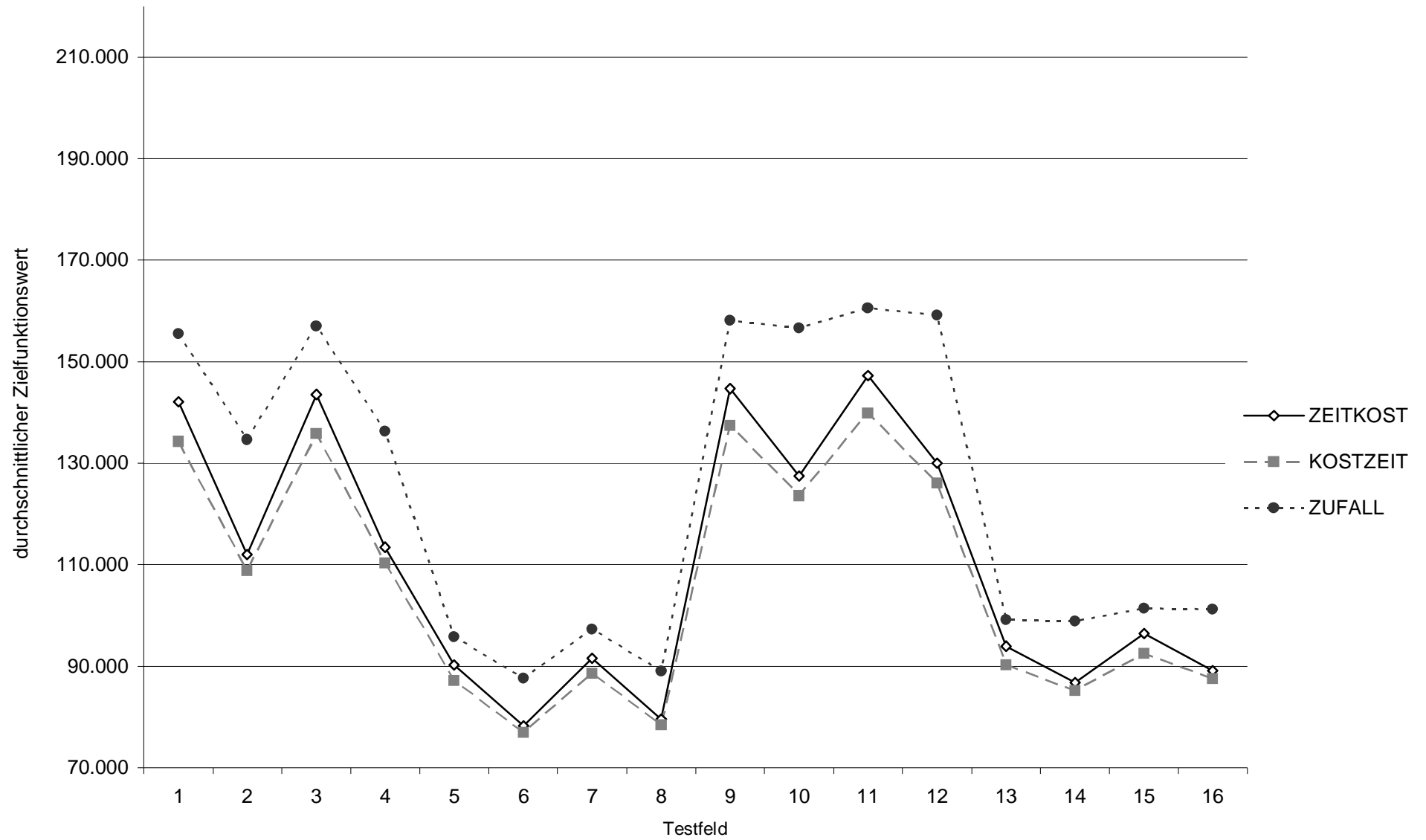


Abbildung 5.8: Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus AB

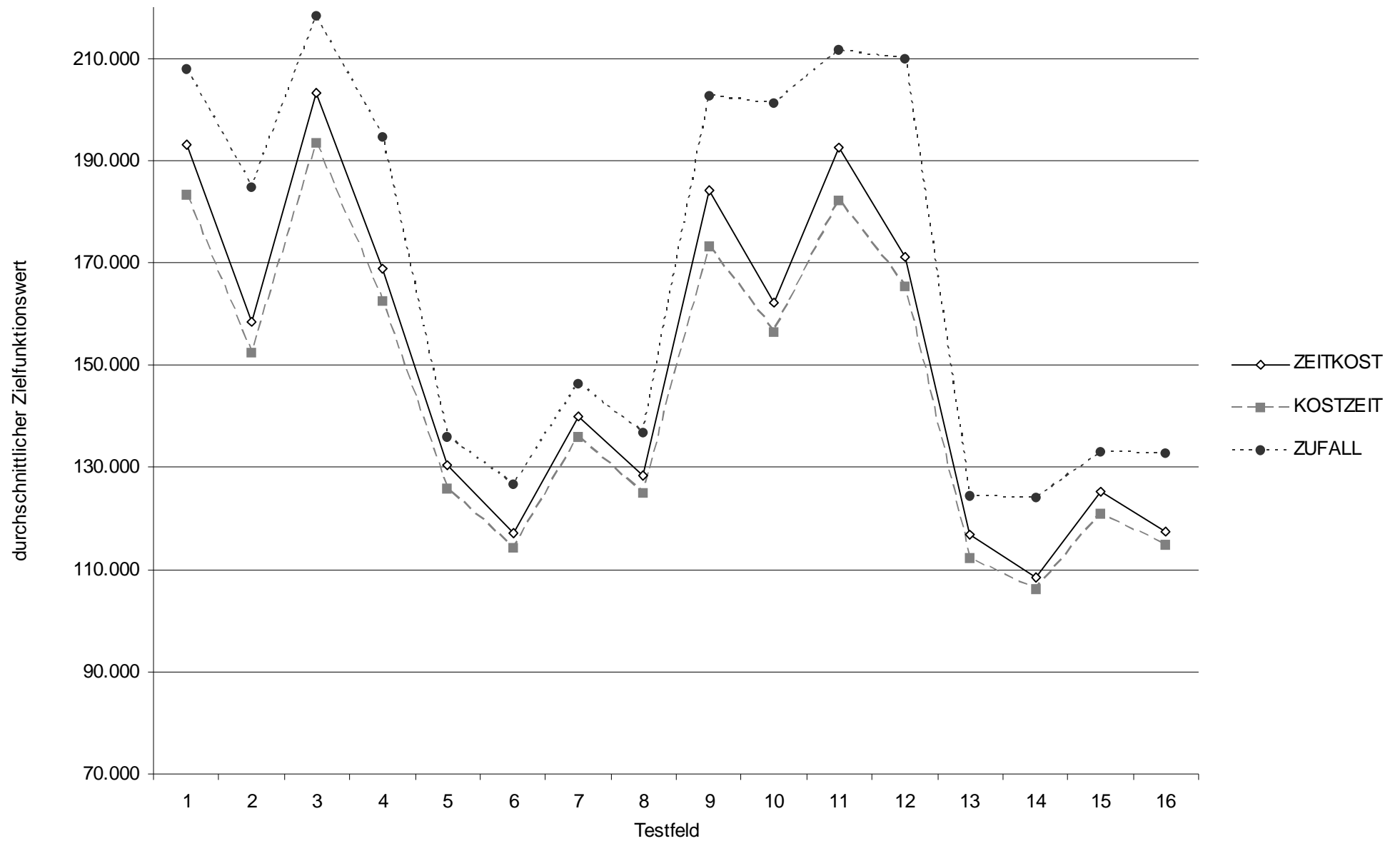


Abbildung 5.9: Zielfunktionsmittelwerte – Vergleich der Prioritätsregeln bei Anwendung des Losgrößen-Modus C

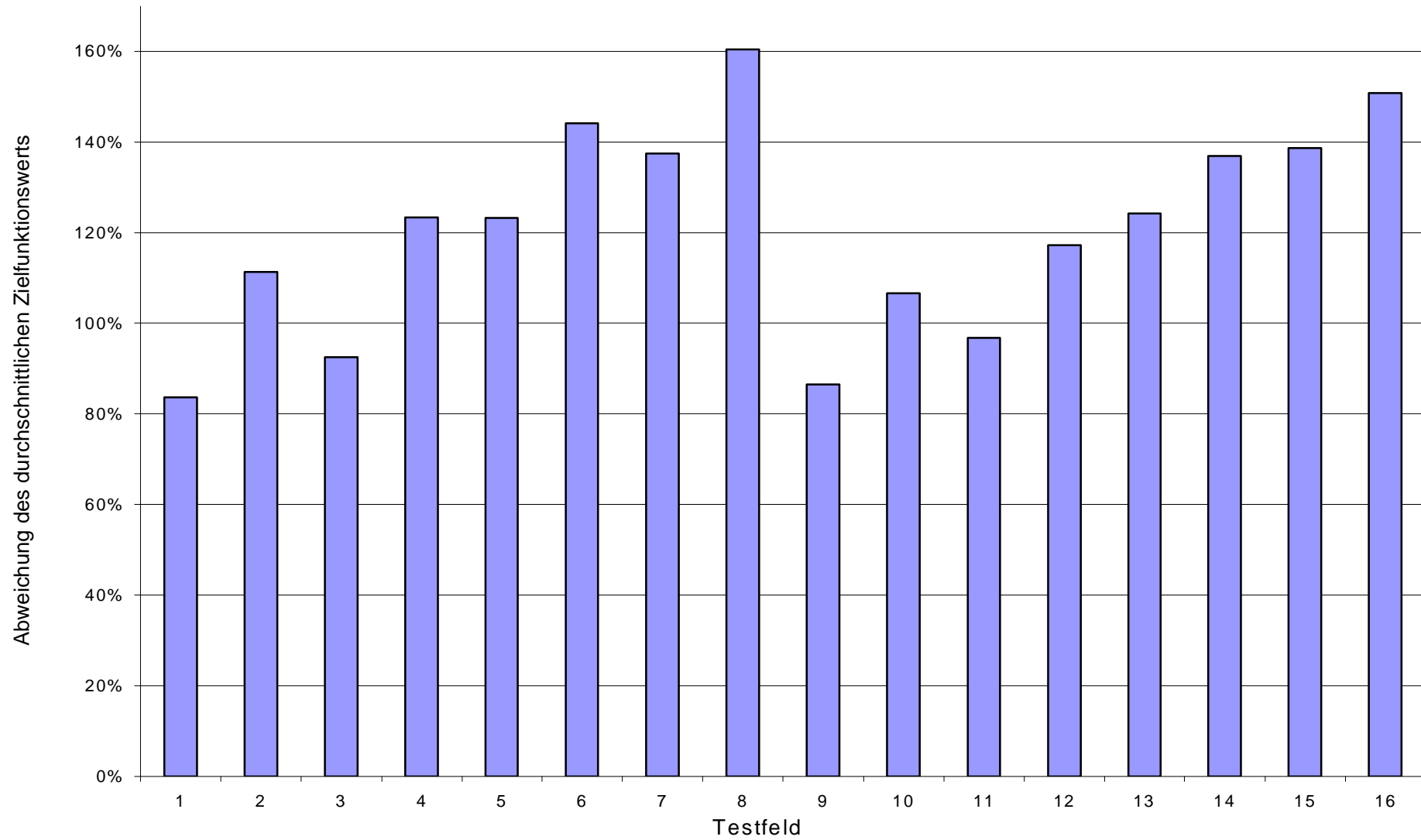


Abbildung 5.10: Abweichung der mit dem Zufallsverfahren ermittelten Zielfunktionsmittelwerte von den mit dem jeweils besten Verfahren ermittelten Zielfunktionsmittelwerten in Abhängigkeit des Testfeldes

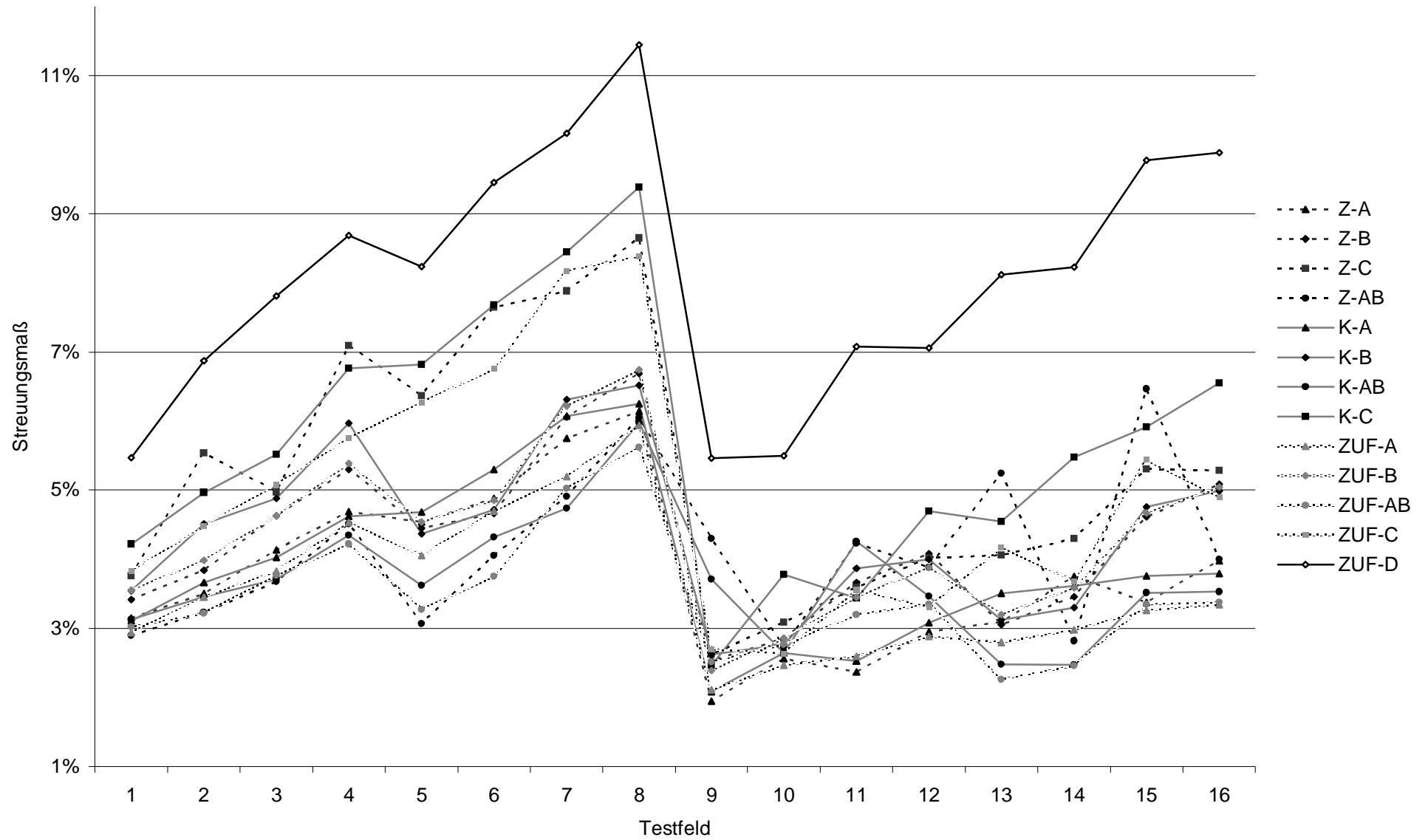


Abbildung 5.11: Streuungsmaß der mit den PDZ-Verfahren ermittelten Zielfunktionswerte in Abhängigkeit des Testfeldes

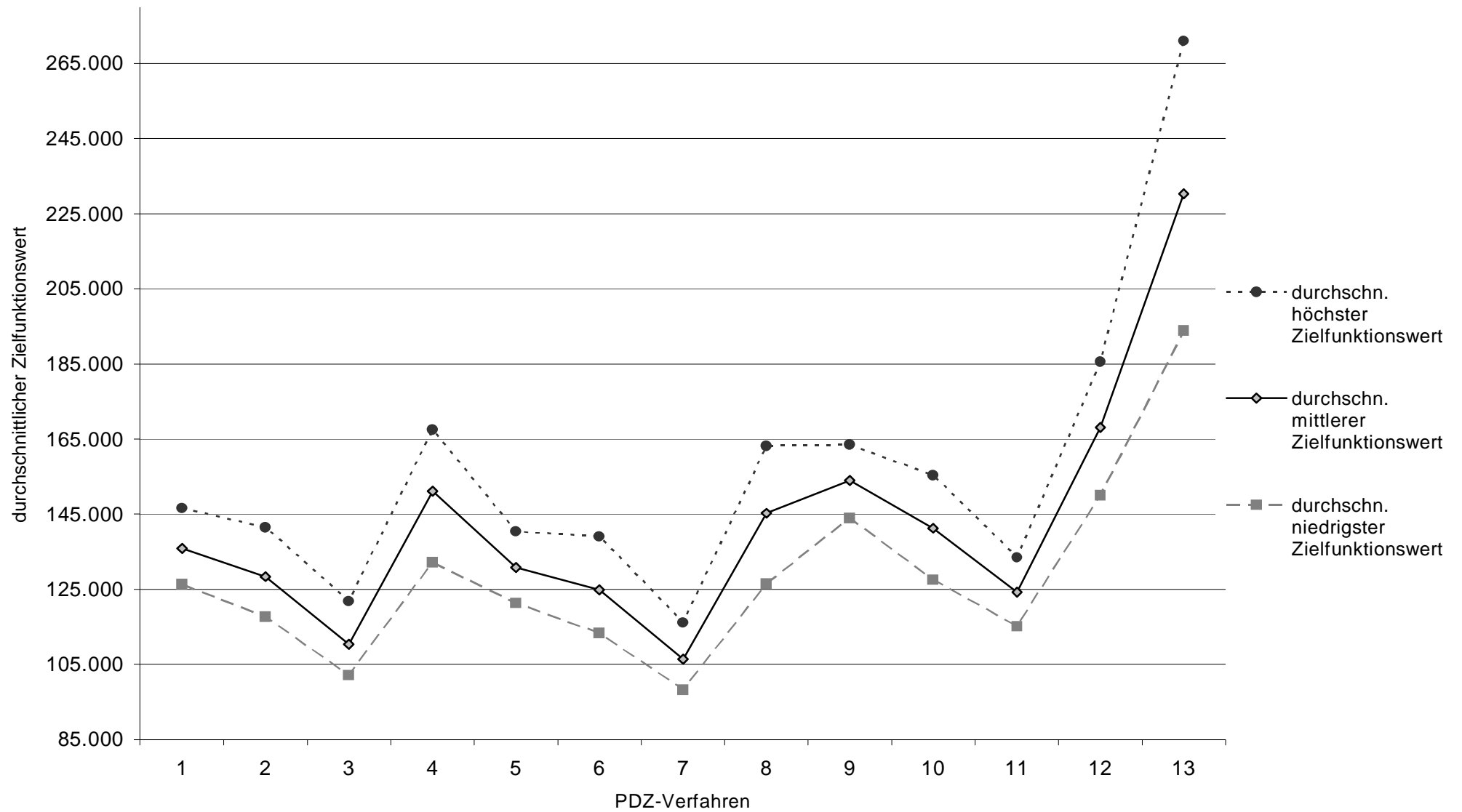


Abbildung 5.12: Über alle Testfelder durchschnittlich höchster, niedrigster und mittlerer Zielfunktionswert in Abhängigkeit des PDZ-Verfahrens

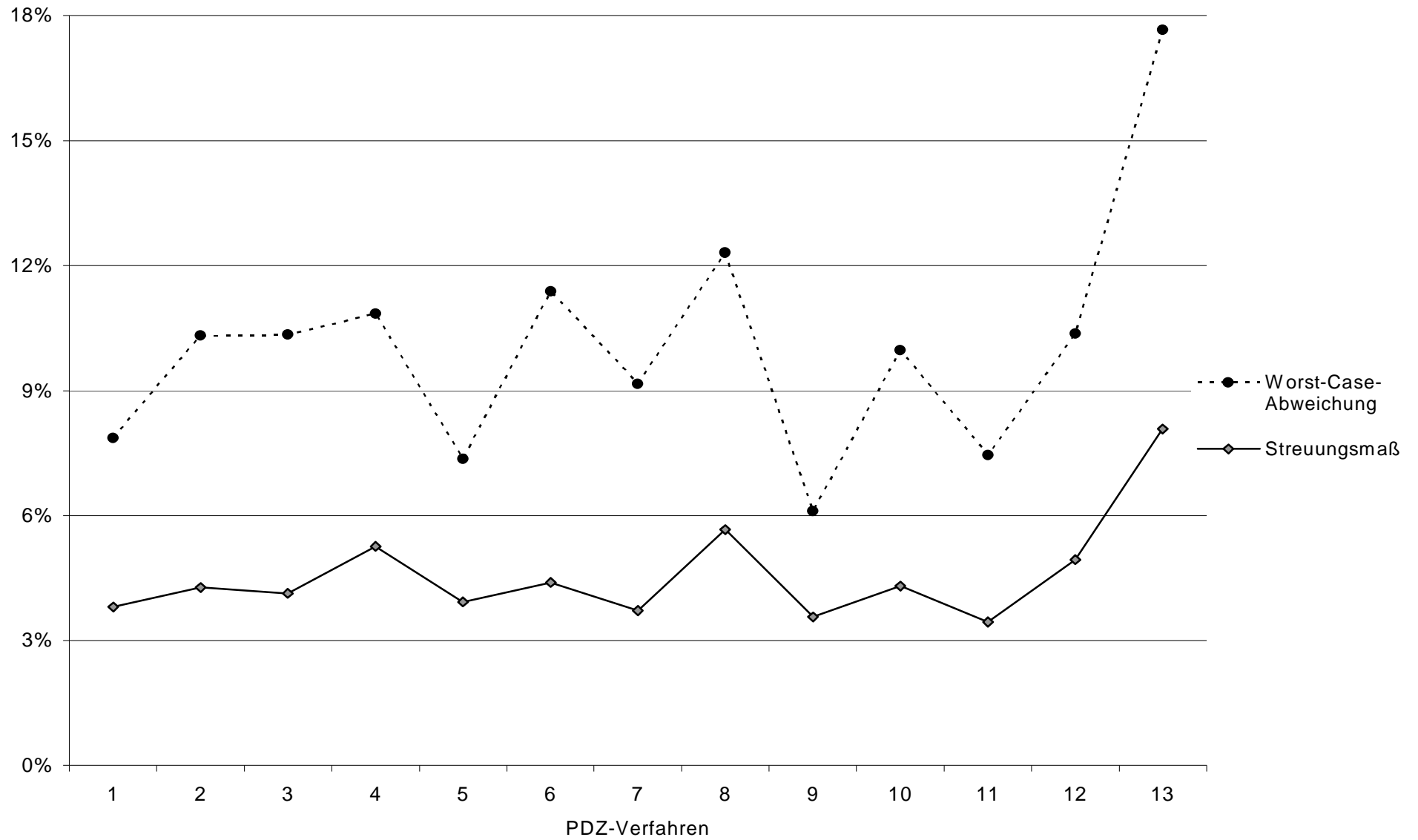


Abbildung 5.13: Über alle Testfelder durchschnittliches Streuungsmaß und durchschnittliche Worst-Case-Abweichung der Zielfunktionswerte in Abhängigkeit des PDZ-Verfahrens

Schlußfolgerung

Die Ergebnisse zeigen deutlich die Überlegenheit des Verfahrens PDZ_{AB}^K . Das Verfahren PDZ_{AB}^K liefert in allen Testfeldern den besten Zielfunktionsmittelwert, den besten Zielfunktionswert und nur mit Ausnahme des Testfeldes 6 auch den besten der schlechtesten Zielfunktionswerte. Das niedrigste Streuungsmaß wird in den Testfeldern 1 bis 8 ausschließlich mit dem Losgrößenmodus AB in Kombination mit der Prioritätsregel *KOSTZEIT* einmal, mit der Prioritätsregel *ZEITKOST* viermal und in Kombination mit der Auswahlregel *ZUFALL* dreimal realisiert. In allen Testfeldern erzeugt das Verfahren PDZ_D^{Zuf} die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse in allen vier Kategorien (Mittelwert, bester Wert, schlechtester Wert, Streuungsmaß). Zudem ist ersichtlich, daß der Losgrößenmodus C in allen 16 Testfeldern und bei jedem Prioritätsregelverfahren den Losgrößenmodi A, AB und B unterlegen ist.

Für die Erzeugung der Ausgangspopulationen des genetischen Algorithmus wird das hinsichtlich der durchschnittlichen Zielfunktionswerte und des Streuungsmaßes beste PDZ -Verfahren herangezogen. Demzufolge wird die Ausgangspopulation in denjenigen Verfahrensvarianten des genetischen Algorithmus mit reiner Populationsstruktur mit dem PDZ_{AB}^K erzeugt und in denjenigen mit gemischter Populationsstruktur aus drei - einer mit Losgrößenmodus A, einer mit Losgrößenmodus B und einer mit Losgrößenmodus AB - je in Kombination mit der Prioritätsregel *KOSTZEIT* erzeugten Teilpopulationen gebildet.

5.2 Analyse der GA-Verfahren

Die Festlegung der zu untersuchenden Varianten des genetischen Algorithmus erfolgt auf Basis der Ergebnisse der getesteten PDZ -Verfahren. Aufgrund des für die Durchführung der Experimente begrenzt zur Verfügung stehenden Zeitraums, werden die verschiedenen Varianten des genetischen Algorithmus in dem Testfeld 8 untersucht, da in Testfeld 8 die durchschnittliche Qualität der Losgrößenmodi A und B ungefähr gleich ist. Die Auswahl eines hinsichtlich der Modi A und B ausgewogenen Testfeldes erfolgt vor dem Hintergrund, daß sich bei gemischter Populationsstruktur die Population aus den drei wie zuvor beschriebenen Teilpopulationen zusammensetzt. Zunächst werden die zu untersuchenden Varianten des genetischen Algorithmus konkretisiert und anschließend die Ergebnisse ausgewertet. Abschließend wird exemplarisch der Evolutionsprozeß im genetischen Algorithmus betrachtet.

5.2.1 Konkretisierung der Varianten des GA

In Kapitel 4.4.4 wurde gezeigt, daß die verschiedenen Varianten des genetischen Algorithmus nicht nur von dem PDZ -Verfahren abhängen, mit dem die Ausgangspopulation erzeugt wird, sondern auch von den beiden Verfahrensparametern Populationsgröße und Erzeugungsgrad, sowie von der Populationsstruktur, rein oder gemischt, und der Entwicklungsstruktur, gemeinsam oder getrennt. Im folgenden werden diejenigen Varianten des genetischen Algorithmus, die von der Populations- oder von der Entwicklungsstruktur abhängig sind, als *Verfahrensvarianten* (VV), und diejenigen, die von den Ausprägungen der Verfahrensparameter abhängen, als *Parametervarianten* (PV) des genetischen Algorithmus bezeichnet. Die Festlegung bezüglich der zur Erzeugung der Ausgangspopulation heranzuziehende Prioritätsregel-Losgrößenmodus-Kombination erfolgt gemäß der Ergebnisse der PDZ -Verfahren.

Den folgenden Tabellen 5.8 und 5.9 sind die zu untersuchenden Kombinationen der Verfahrens- und der Parametervarianten zu entnehmen.

Bezeichnung der Verfahrensvariante	Populationsstruktur		Entwicklungsstruktur	
	gemischt	rein	getrennt	gemeinsam
$GA_{AB}^{K,gem}$		x		x
$GA_{AB}^{K,getr}$		x	x	
$GA_{A,AB,B}^{K,gem}$	x			x
$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	x		x	

Tabelle 5.8: Verfahrensvarianten des genetischen Algorithmus

Nummer der Parametervariante	Populationsgröße	Erzeugungsgrad
1	100	0,25
2	100	0,5
3	100	0,75
4	200	0,25
5	200	0,5
6	200	0,75
7	400	0,25
8	400	0,5
9	400	0,75
10	600	0,25
11	600	0,5
12	600	0,75

Tabelle 5.9: Parametervarianten des genetischen Algorithmus

5.2.2 Ergebnisse und Bewertung der GA-Verfahren

Für die Untersuchung der zuvor in Kapitel 5.2.1 differenzierten Verfahrensvarianten $GA_{AB}^{K,gem}$, $GA_{AB}^{K,getr}$, $GA_{A,AB,B}^{K,gem}$ und $GA_{A,AB,B}^{K,getr}$ wurden für jede der 12 Parametervarianten jeweils 10 Probleminstanzen erzeugt. Die Bewertung der GA-Verfahren bezieht sich auf das mit dem betrachteten Verfahren in jeder der 10 erzeugten Probleminstanzen hinsichtlich des Zielfunktionswertes beste gefundene Individuum der jeweiligen Population.

In den Feldern der folgenden Tabelle 5.10 stehen für jede Verfahrensvariante (Zeilen) mit jeder Parametervariante (Spalten) untereinander die Mittelwerte der Zielfunktionswerte [GE] aus den 10 erzeugten Probleminstanzen, der jeweils beste und schlechteste ermittelte Zielfunktionswert [GE], sowie das Streuungsmaß (in %) – bei analoger Definition des Streuungsmaßes zu der Definition im Rahmen der Analyse der PDZ-Verfahren – über die 10 Testläufe.

VV / PV	Von den 10 Testläufen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Bester Wert mit PV:
$GA_{AB}^{K,gem}$	Mittelwert	67310,4	66937,9	66778	66395,5	65825,1	65426,25	66060,56	66061,1	67586,8	66745,9	68735,5	68446	6
	Best. Wert	60192	59844	59541	59635	59032	58561	59447	59010	59962	60729	62559	62128	6
	Schlecht. Wert	72102	73996	73151	72900	72214	72598	73115	72796	73696	72388	74346	73807	1
	Streuungsmaß	6,69%	7,35%	6,78%	6,84%	7,05%	7,92%	7,35%	7,36%	6,97%	7,06%	5,76%	5,70%	12
$GA_{AB}^{K,getr}$	Mittelwert	66595,5	66050,7	66309,9	65776	65544,2	65302	68063,4	68183,6	68422,5	68221,9	68337,5	68509,5	6
	Best. Wert	60009	59797	59625	59750	58728	59101	61381	62362	62559	61908	62503	62559	5
	Schlecht. Wert	71749	71558	72965	70843	70268	69896	73614	73943	73427	73638	73908	73637	6
	Streuungsmaß	6,39%	6,52%	6,66%	6,32%	6,53%	6,36%	6,30%	6,06%	5,93%	6,07%	5,82%	5,58%	12
$GA_{A,AB,B}^{K,gem}$	Mittelwert	70985,8	70224,4	70174,9	67106	66885,5	66451	67074,3	67064,6	67113,7	67779,9	69437,4	69040,8	6
	Best. Wert	62485	61191	61377	60587	60353	59830	60198	60179	59991	61243	63496	62626	6
	Schlecht. Wert	98616	98100	98346	74484	74342	73474	72291	72712	72913	73448	74253	74148	7
	Streuungsmaß	14,14%	14,40%	14,68%	6,69%	6,65%	6,82%	6,60%	6,73%	6,13%	6,46%	5,96%	5,94%	12
$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	Mittelwert	67573,6	66584,6	67237,3	66577,2	66502,4	66427,8	68638,6	68954	68701,3	68847,5	68907,7	68738,5	6
	Best. Wert	60864	60212	60868	60312	60694	59049	62798	63050	62227	62589	63046	63046	6
	Schlecht. Wert	73444	72392	73890	71436	71894	72262	74015	74426	74426	74145	73384	73370	4
	Streuungsmaß	6,47%	5,98%	6,35%	6,31%	6,23%	6,91%	5,95%	5,92%	5,70%	5,64%	5,51%	5,46%	12
Bester Wert mit VV:	Mittelwert	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{A,AB,B}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,gem}$
	Best. Wert	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,gem}$
	Schlecht. Wert	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,gem}$	$GA_{A,AB,B}^{K,gem}$	$GA_{A,AB,B}^{K,gem}$	$GA_{AB}^{K,gem}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	
	Streuungsmaß	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{AB}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	$GA_{A,AB,B}^{K,getr}$	

Tabelle 5.10: Ergebnistabelle der GA-Verfahren

Einfluß der Verfahrens- und der Parametervariante auf die Zielfunktionswerte

Populationsstruktur:

Die Verfahrensvarianten mit reiner Populationsstruktur, die von einer nur mit dem Verfahren PDZ_{AB}^K erzeugten Ausgangspopulation ausgehen, sind den Verfahren mit gemischter Populationsstruktur, die von einer je zu einem Drittel mit dem Losgrößenmodus A, B und AB in Kombination mit der Prioritätsregel *KOSTZEIT* erzeugten Ausgangspopulation ausgehen, jeweils im Vergleich zu den Verfahren mit identischer Entwicklungsstruktur in Hinblick auf die durchschnittlichen Zielfunktionswerte überlegen (siehe auch im folgenden Abbildung 5.14). Zwar liefert das Verfahren $GA_{A,AB,B}^{K,gem}$ in Kombination mit der Parametervariante 9 den besten durchschnittlichen Zielfunktionswert; bezüglich des Aussagevermögens über die Qualität der Verfahrensvariante $GA_{A,AB,B}^{K,gem}$ besitzt dieser Aspekt jedoch insofern nur eine relativ geringe Bedeutung, als die Parametervarianten nicht mit den durch verschiedene Ausprägungen der Problemparаметer abgegrenzten Testfeldern im Rahmen der Untersuchung der *PDZ*-Verfahren vergleichbar, sondern vielmehr selbst Untersuchungsgegenstand bezüglich der Vorteilhaftigkeit bestimmter Ausprägungen sind.

Entwicklungsstruktur:

Die Vorteilhaftigkeit einer bestimmten Entwicklungsstruktur ist stark von der Parametervariante abhängig. In Kombination mit den Parametervarianten 1-6 sind die Verfahren mit getrennter Entwicklungsstruktur denen mit gemeinsamer – jeweils im Vergleich zu den Verfahren mit identischer Populationsstruktur – überlegen. Relativ ähnlich verändert sich die Vorteilhaftigkeit zu Gunsten der Verfahren mit gemeinsamer Entwicklungsstruktur ab der Parametervariante 7 und dann wiederum zu Gunsten der Verfahren mit getrennter Entwicklung ab der Parametervariante 11 (in Kombination mit der Parametervariante 12 liefern die Verfahren mit getrennter und mit gemeinsamer Entwicklung bei reiner Populationsstruktur annähernd gleiche Ergebnisse).

Der Wechsel zwischen Parametervariante 6 und Parametervariante 7 ist darauf zurückzuführen, daß in den Verfahren mit getrennter Entwicklung die zur Verfügung stehende Rechenzeit von 30 Minuten auf vier getrennte Entwicklungen (Dreiteilung der Ausgangspopulation und Zusammenführung der besten Individuen zur Endentwicklung) aufgeteilt werden muß. Aufgrund des Anstiegs der Populationsgröße von 200 in Parametervariante 6 auf 400 Individuen in Parametervariante 7 können nur wenige Generationen in den kurzen Zeiträumen erzeugt und somit nur geringfügige Verbesserungen erzielt werden. Dieser Nachteil der Verfahren mit getrennter Entwicklung gegenüber den Verfahren mit gemeinsamer Entwicklung relativiert sich erst in den letzten beiden Parametervarianten mit einer Populationsgröße von 600 Individuen und einem Erzeugungsgrad von 0,5 in der Parametervariante 11 bzw. 0,75 in der Parametervariante 12.

Populationsgröße und Erzeugungsgrad:

Der Einfluß der Populationsgröße auf die Qualität der Verfahren ist ganz erheblich. So ist die unter "Entwicklungsstruktur" angesprochene Angleichung der Qualität der Verfahren in Kombination mit den Parametervarianten 11 und 12 darauf zurückzuführen, daß bei einer so großen Population in Kombination mit hohen Erzeugungsgraden auch die Verfahren mit gemeinsamer Entwicklung in der vorgegebenen Rechenzeit nicht mehr so viele Generationen erzeugen und somit Verbesserungen realisieren können. Alle vier Verfahrensvarianten erzielen mit der Parametervariante 6 ihr bestes Ergebnis bezüglich des durchschnittlichen Zielfunktionswertes und mit Ausnahme des Verfahrens $GA_{AB}^{K,geff}$ auch hinsichtlich des besten Zielfunktionswertes. Darüber hinaus läßt sich feststellen, daß die Populationsgröße von 200

Individuen den anderen Populationsgrößen überlegen ist, da mit der Parametervariante 4, 5, und 6, d. h. Populationsgröße 200 in Kombination mit den verschiedenen Erzeugungsgraden, über die vier Verfahrensvarianten durchschnittlich die drei besten Ergebnisse sowohl in Hinblick auf die mittleren- als auch auf die niedrigsten und die höchsten Zielfunktionswerte erzielt werden (siehe Abbildung 5.17). Im Durchschnitt beträgt die prozentuale Überlegenheit der Populationsgröße 200 c. p. maximal 3,46% bei den Mittelwerten der Zielfunktionswerte, 9,66% bei den höchsten und 4,58% bei den niedrigsten Zielfunktionswerten.

Über die Vorteilhaftigkeit einer bestimmten Ausprägung des Erzeugungsgrades läßt sich c. p., d. h. hier verfahrens- und populationsgrößenunabhängig, keine so eindeutige Aussage treffen. Tendenziell wirkt sich bei den Populationsgrößen von 100 und 200 Individuen ein hoher und bei Populationsgrößen von 400 und 600 Individuen ein geringerer Erzeugungsgrad vorteilhaft auf die Güte der Zielfunktionswerte aus. Da der über die vier GA-Verfahren und die vier Populationsgrößen durchschnittliche Einfluß des Erzeugungsgrades c. p. mit einem maximalen Unterschied zwischen den verschiedenen Ausprägungen von 0,09% bei den Zielfunktionsmittelwerten, 0,32% bei den schlechtesten und 0,31% bei den besten Zielfunktionswerten vernachlässigbar gering ist, wird auf eine weitere Analyse verzichtet.

Streuungsmaß und Worst-Case-Abweichung

In Kombination mit allen Parametervarianten weist jeweils mindestens eine der beiden Verfahrensvarianten mit getrennter Entwicklungsstruktur ein niedrigeres Streuungsmaß auf als die Verfahrensvarianten mit gemeinsamer Entwicklungsstruktur (siehe Abbildung 5.16). Mit Ausnahme der Verfahrensvariante $GA_{A,AB,B}^{K,gem}$ liegen die Streuungsmaße der Verfahren mit kleiner und mit großer Populationsgröße tendenziell näher zusammen als bei den Parametervarianten mit mittelgroßen Populationsgrößen, wobei das durchschnittliche Streuungsmaß und die durchschnittliche Worst-Case-Abweichung über die vier Verfahrensvarianten mit steigender Populationsgröße abnehmen (siehe Abbildung 5.18). Die höheren Werte des durchschnittlichen Streuungsmaßes und insbesondere der durchschnittlichen Worst-Case-Abweichung in den ersten drei Parametervarianten sind auf negative Ausreißer des Verfahrens $GA_{A,AB,B}^{K,gem}$ zurückzuführen. Insgesamt ist eine verlässliche Aussage bezüglich des Streuungsmaßes und der Worst-Case-Abweichung erst bei einer größeren Anzahl zu Grunde gelegter Probleminstanzen möglich.

Graphische Darstellung der Ergebnisse

Zusammenfassend veranschaulichen die folgenden Abbildungen 5.14 – 5.19 die Ergebnisse. Abbildung 5.14 zeigt die Mittelwerte der entscheidungsrelevanten Kosten der vier Verfahrensvarianten in Kombination mit den 12 Parametervarianten. Abbildung 5.15 sind die Abweichungen der durchschnittlichen Zielfunktionswerte jeder Verfahrensvariante von dem jeweils besten erzielten Zielfunktionsmittelwert in Kombination mit der betrachteten Parametervariante und Abbildung 5.16 ist für jede Verfahrensvariante das Streuungsmaß der Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Parametervariante zu entnehmen. Die Abbildungen 5.17 und 5.18 zeigen Durchschnittswerte über die vier Verfahrensvarianten. In Abbildung 5.17 wird deutlich, daß im Durchschnitt mit der Parametervariante 6 die besten Ergebnisse erzielt werden, und in Abbildung 5.18 ist erkennbar, daß neben dem durchschnittlichen Streuungsmaß auch die durchschnittliche Worst-Case-Abweichung mit steigender Populationsgröße abnimmt. Die eindeutige Vorteilhaftigkeit der Populationsgröße von 200 Individuen geht aus Abbildung 5.19 hervor, welche die durchschnittlichen Zielfunktionswerte über die vier Verfahrensvarianten und die jeweils drei Erzeugungsgrade je Populationsgröße zeigt.

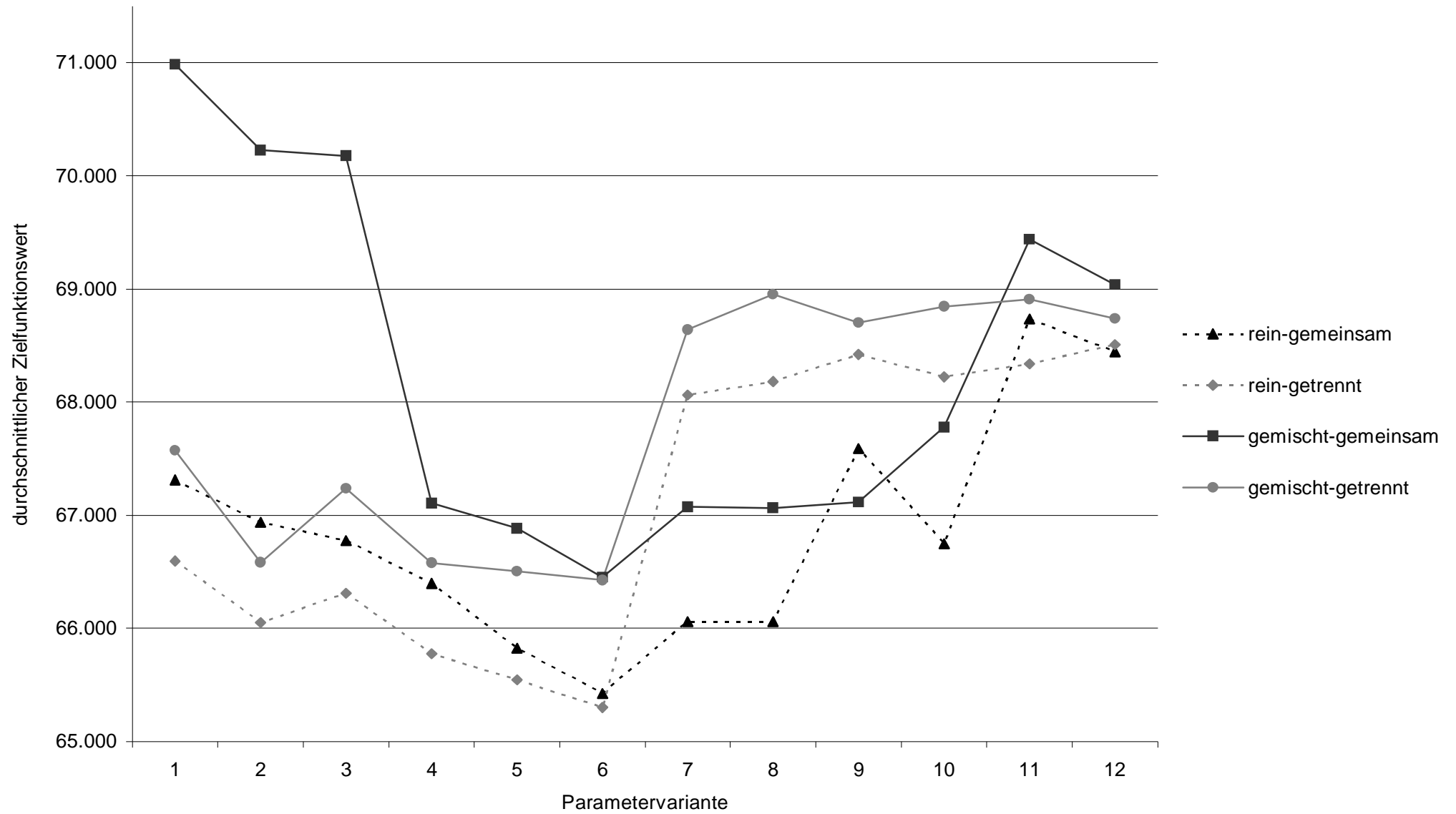


Abbildung 5.14: Durchschnittliche mit den Verfahrensvarianten ermittelte Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Parametervariante

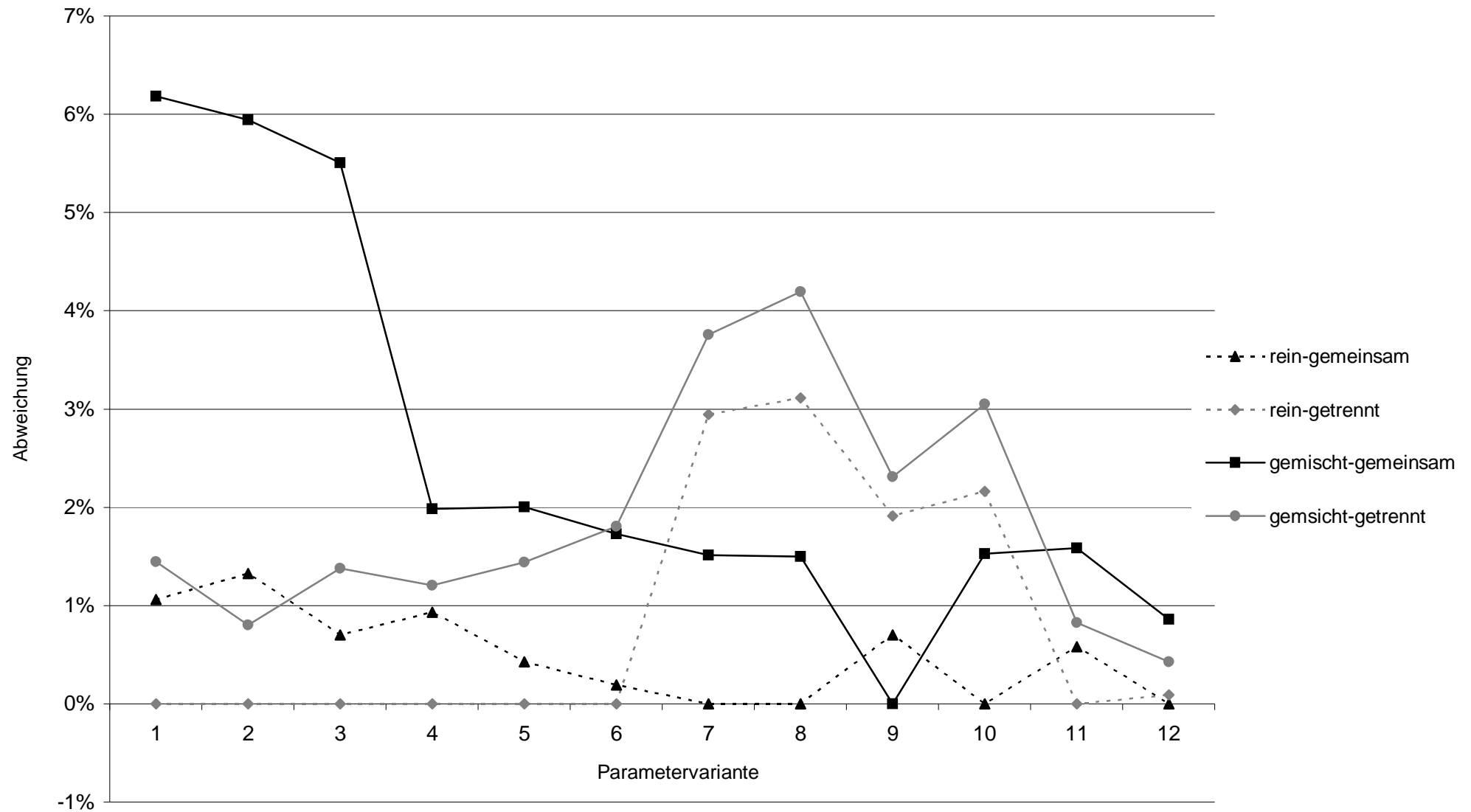


Abbildung 5.15: Abweichungen der mit den Verfahrensvarianten ermittelten durchschnittlichen Zielfunktionswerte von dem Mittelwert der Zielfunktionswerte der jeweils besten Verfahrensvariante in Abhängigkeit von der Parametervariante

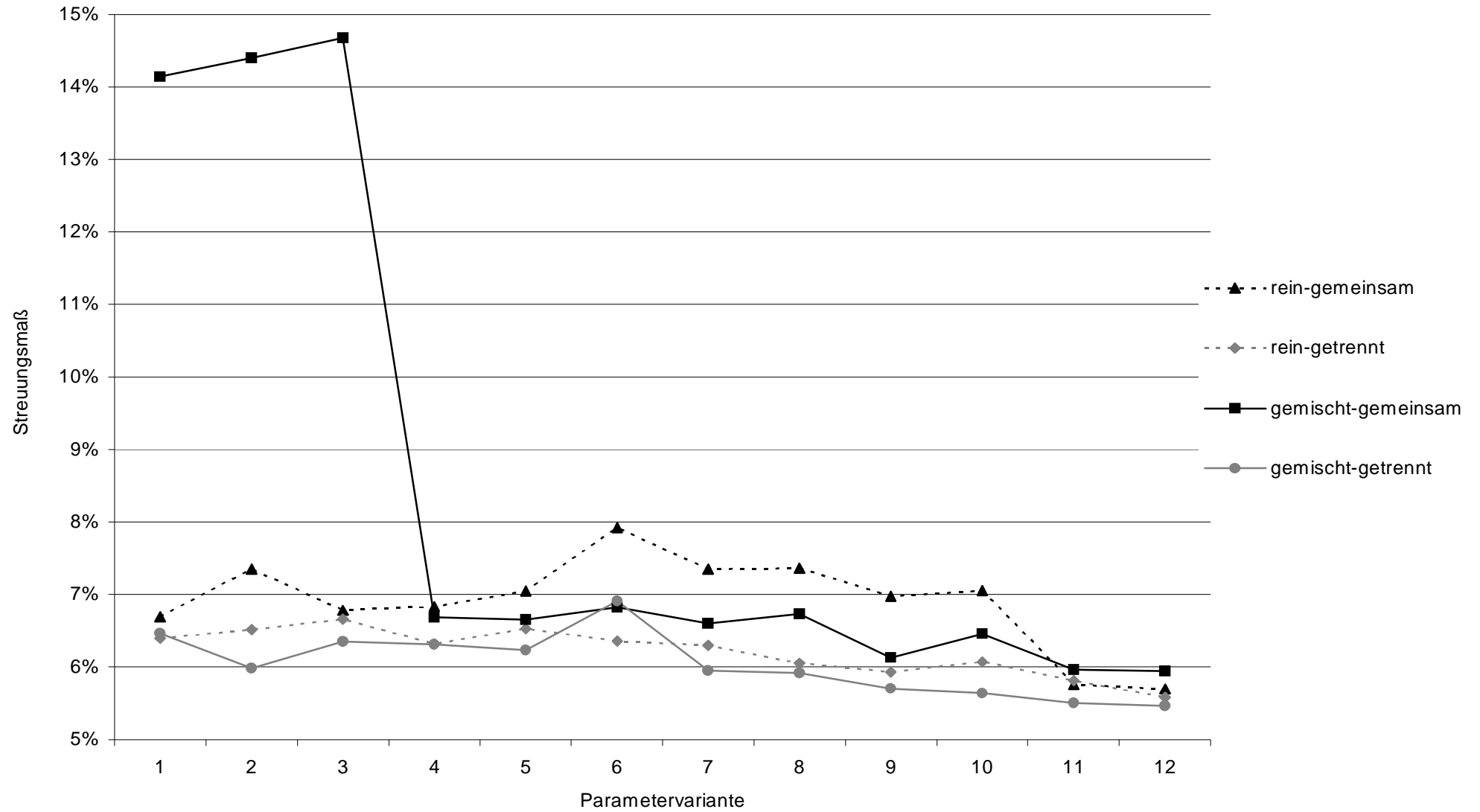


Abbildung 5.16: Streuungsmaß der mit den Verfahrensvarianten ermittelten Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Parametervariante

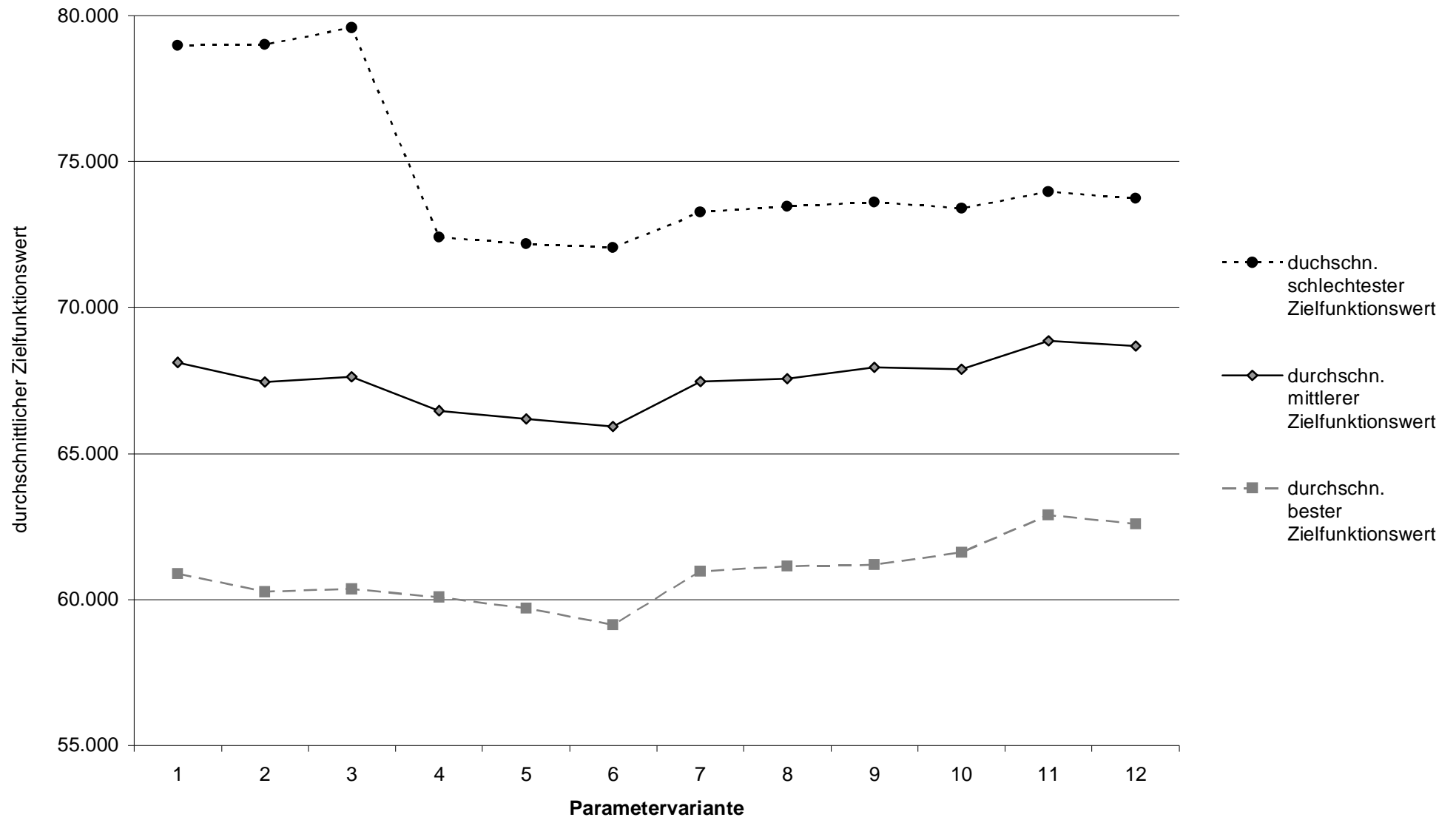


Abbildung 5.17: Über die vier Verfahrensvarianten durchschnittlich höchster, niedrigster und mittlerer Zielfunktionswert in Abhängigkeit von der Parametervariante

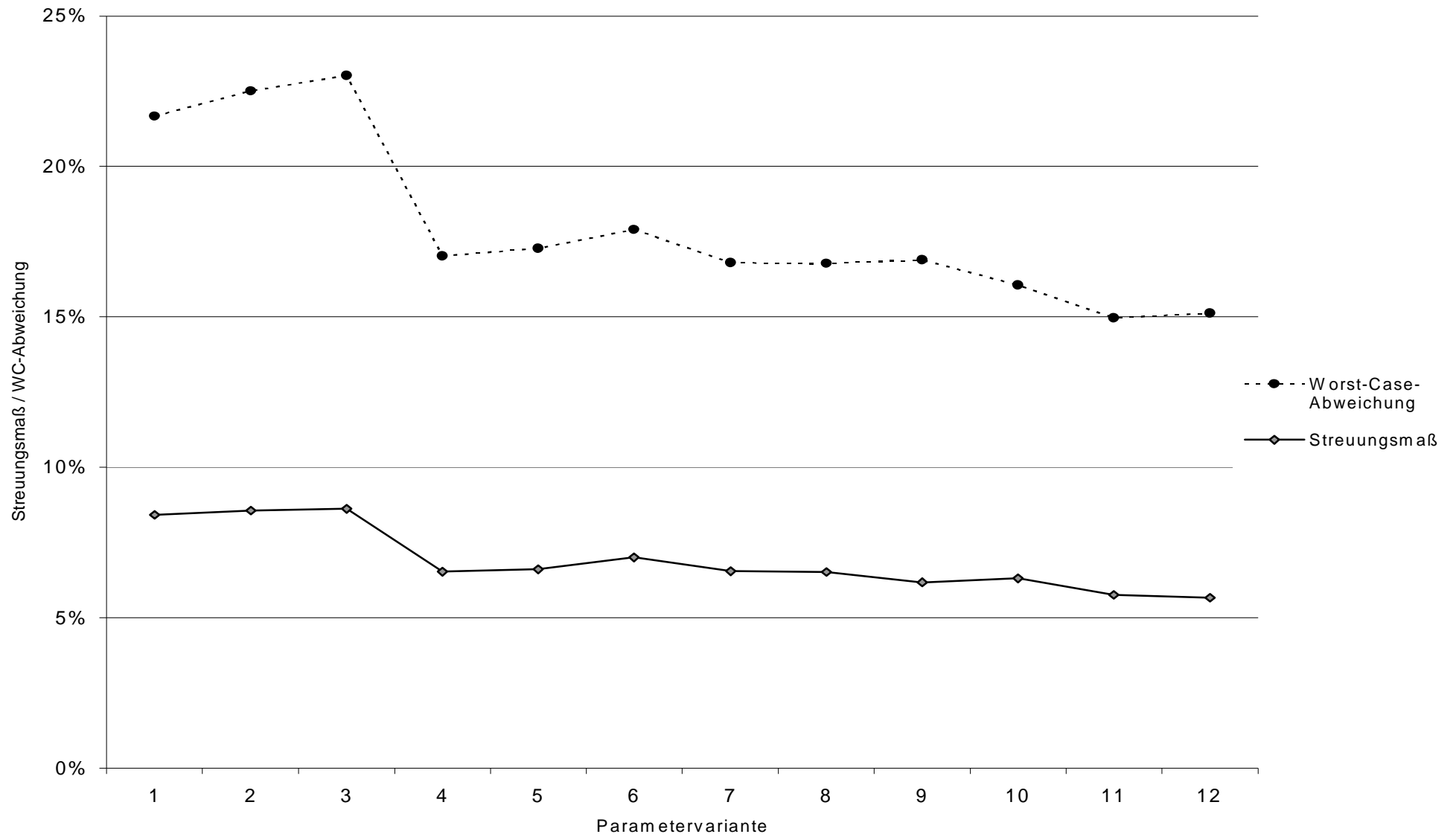


Abbildung 5.18: Über die vier Verfahrensvarianten durchschnittliches Streuungsmaß und durchschnittliche Worst-Case-Abweichung der Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Parametervariante

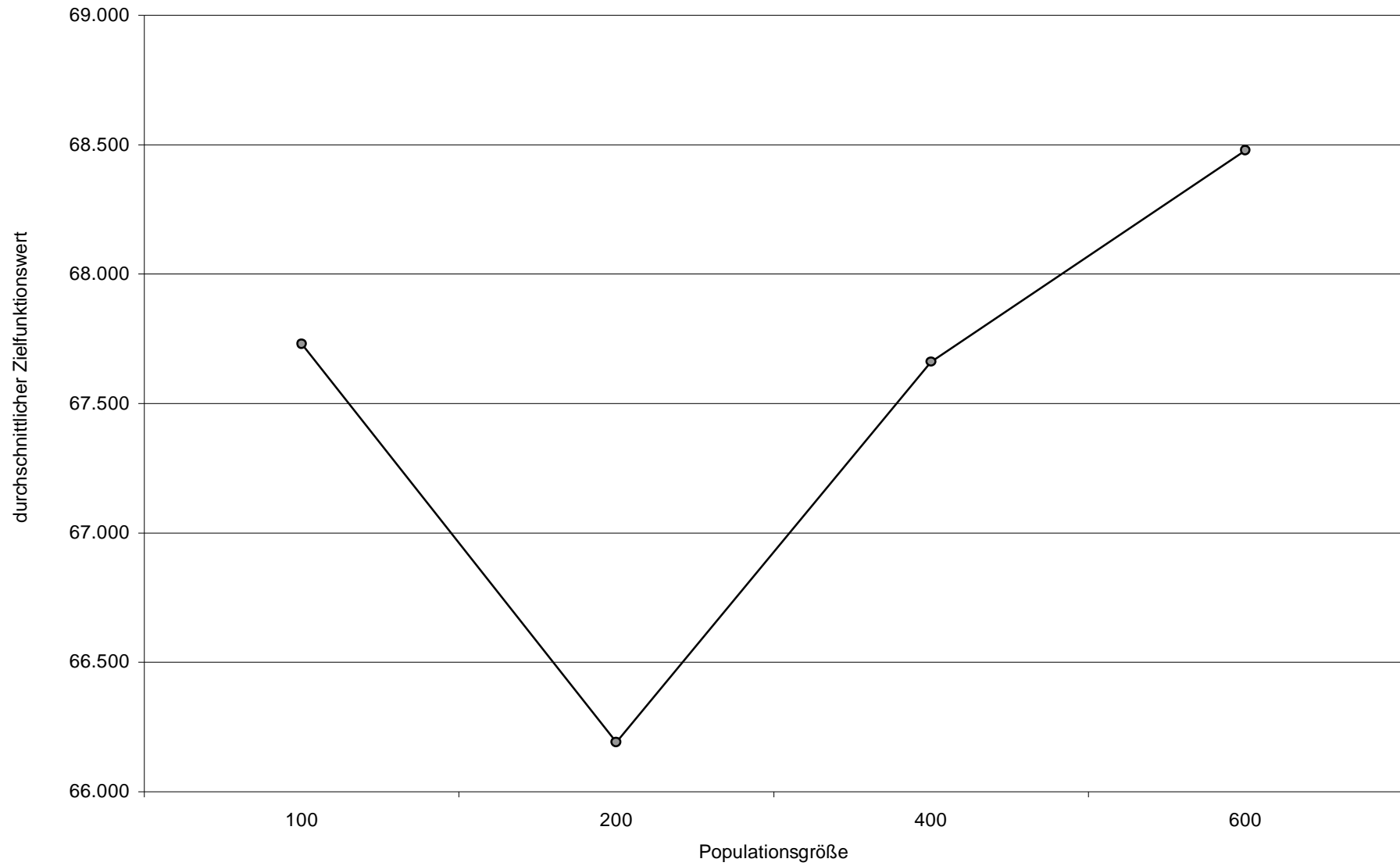


Abbildung 5.19: Über die vier Verfahrensvarianten und die drei Erzeugungsgrade durchschnittliche Zielfunktionswerte in Abhängigkeit von der Populationsgröße

Schlußfolgerung

Im Rahmen der in dem Rechenexperiment vorgegebenen zeitlichen Begrenzung von 30 Minuten kann die Aussage getroffen werden, daß das GA-Verfahren zu empfehlen ist, welches die Verfahrensvariante mit reiner Populationsstruktur und getrennter Entwicklungsstruktur (Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K, getr}$) mit der Parametervariante, die eine Populationsgröße von 200 Individuen mit einem Erzeugungsgrad von 0,75 (Parametervariante 6) kombiniert, da hinsichtlich der Zielfunktionswerte die besten Ergebnisse erzeugt werden und von allen vier Verfahrensvarianten die Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K, getr}$ in Kombination mit Parametervariante 6 das niedrigste Streuungsmaß aufweist.

5.2.3 Evolution im genetischen Algorithmus

Die Evolution oder auch der Evolutionsverlauf oder Evolutionsprozeß beschreibt die Entwicklung der gefundenen Lösungen im Generationsverlauf. Für den entwickelten genetischen Algorithmus wird die Evolution anhand von Beispielen dargestellt.

Exemplarisch untersuchte Evolution

Aus den zuvor in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Testläufen wird exemplarisch der Evolutionsverlauf über 133 Generationen bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K, gem}$ in Kombination mit den Parametervarianten 3 und 6 betrachtet.

Mit der Parametervariante 3 (Populationsgröße 100, Erzeugungsgrad 0,75) konnte der über die 10 Testläufe gebildete Mittelwert der Zielfunktionswerte gegenüber der durchschnittlich mit dem besten PDZ-Verfahren gefundenen Lösung um 7,68%, und mit der Parametervariante 6 (Populationsgröße 200, Erzeugungsgrad 0,75) um 5,56% verbessert werden. Das relativ zu der Kombination mit Parametervariante 6 größere Verbesserungspotential in Kombination mit der Parametervariante 3 ist darauf zurückzuführen, daß der mit dem PDZ-Verfahren gefundene Zielfunktionswert bei der Erzeugung einer Ausgangspopulation von 200 Individuen (Parametervariante 6) bereits besser ist (siehe Abbildung 5.20).

Zur Berechnung des durchschnittlichen Niveaus der Fitness in der Population, im folgenden auch als Populationsniveau bezeichnet, wird von jedem Individuum der relative Anteil seiner Fitness an der besten in der betrachteten Population vorkommenden Fitness berechnet, und anschließend der Mittelwert über alle Anteile gebildet. Das Populationsniveau steigert sich bei der Parametervariante 3 von 65,7% und bei der Parametervariante 6 von 70,2% im Verlauf von bis zu 30 Generationen auf jeweils 99,4%. Im weiteren Evolutionsverlauf kann das Niveau bis zur Generation 82 nur noch ganz leicht auf 99,5% gesteigert werden. Bei beiden Parametervarianten treten nach den ersten 30 Generationen auch hinsichtlich der besten gefundenen Lösungen keine wesentlichen Verbesserungen mehr auf (siehe Abbildung 5.21).

Die Mutationsrate fängt bei Parametervariante 3 mit 0,46 und bei Parametervariante 6 bei 0,52 an. Sie erreicht in beiden Fällen in Generation 25 den niedrigsten Wert (PV 3: 0,10 und PV 6: 0,11) und pendelt im weiteren Verlauf zwischen 0,11 und 0,13 (siehe Abbildung 5.22).

Auf die Darstellung des Evolutionsverlaufs in den übrigen 46 Kombinationen der Verfahrens-/Parametervarianten wird verzichtet, da die grundsätzlichen Entwicklungstendenzen überall gleich sind, mit der Einschränkung, daß die Evolution aufgrund des zeitlichen Abbruchkriteriums insbesondere bei Anwendung der Verfahren mit getrennter Entwicklung und/oder in

den Parametervarianten mit hoher Populationsgröße und hohem Erzeugungsgrad nicht so weit fortschreiten kann, wie in den übrigen GA-Verfahren.

Bei ausreichend zur Verfügung stehender Zeit kann mit steigender Populationsgröße zusätzliches Potential zur Verbesserung der Zielfunktionswerte ausgeschöpft werden, obwohl bei einer großen Individuenanzahl bereits die Zielfunktionswerte in der erzeugten Ausgangspopulation besser sind. Exemplarisch wurde in den Testfeldern 4 und 8 die Entwicklung des genetischen Algorithmus bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$ in Kombination mit sieben verschiedenen Populationsgrößen zwischen 60 und 600 Individuen, jeweils bei einem Erzeugungsgrad von 0,5, über 100 Generationen untersucht. Bei der hohen Populationsgröße von 600 Individuen konnte der Mittelwert der Zielfunktionswerte im Verlauf des Evolutionsprozesses in Testfeld 8 noch um 4,7% und in Testfeld 4 um 3,5% verbessert werden (siehe Abbildungen 5.23 und 5.24).

Graphische Darstellung

Zusammenfassend zeigen die folgenden Abbildungen 5.20 bis 5.22 den Evolutionsverlauf bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$ in Kombination mit den Parametervarianten 3 und 6. Abbildung 5.20 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte über die 10 Testläufe, Abbildung 5.21 die Entwicklung des durchschnittlichen Populationsniveaus und Abbildung 5.22 die Entwicklung der impliziten Mutationsrate. In den Abbildungen 5.23 (für Testfeld 8) und 5.24 (für Testfeld 4) wird die Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte im Verlauf von 100 Generationen bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$ in Kombination mit den 7 verschiedenen Populationsgrößen zwischen 60 und 600 Individuen dargestellt. Die Angaben nach dem Bindestrich entsprechen jeweils der Größe der Kindgeneration bei dem gewählten Erzeugungsgrad von 0,5.

Schlußfolgerung²

Die wesentlichen, von dem Einsatz der genetischen Operatoren erwarteten Entwicklungen im Generationsverlauf sind zum einen das Auffinden immer besserer Lösungen und zum anderen die Verbesserung des Populationsniveaus. Die Untersuchung im Evolutionsprozeß zeigt, daß der in dieser Arbeit vorgestellte genetische Algorithmus diese Erwartungen erfüllt.

Die implizite Mutationsrate verhält sich mit anfangs relativ hohen, im Generationsverlauf bis auf ca. 0,1 abnehmenden und dann tendenziell auf diesem Niveau pendelnden Werten in für die Funktionsfähigkeit des genetischen Algorithmus gewünschter Form. Auch bei sehr großen Ausgangspopulationen und folglich einer großen Anzahl bereits guter, mit dem PDZ-Verfahren erzeugter Ausgangslösungen kann die Qualität der Lösungen durch die Anwendung der genetischen Operatoren noch gesteigert werden.

² Die Schlußfolgerung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit den Abbildungen vorangestellt.

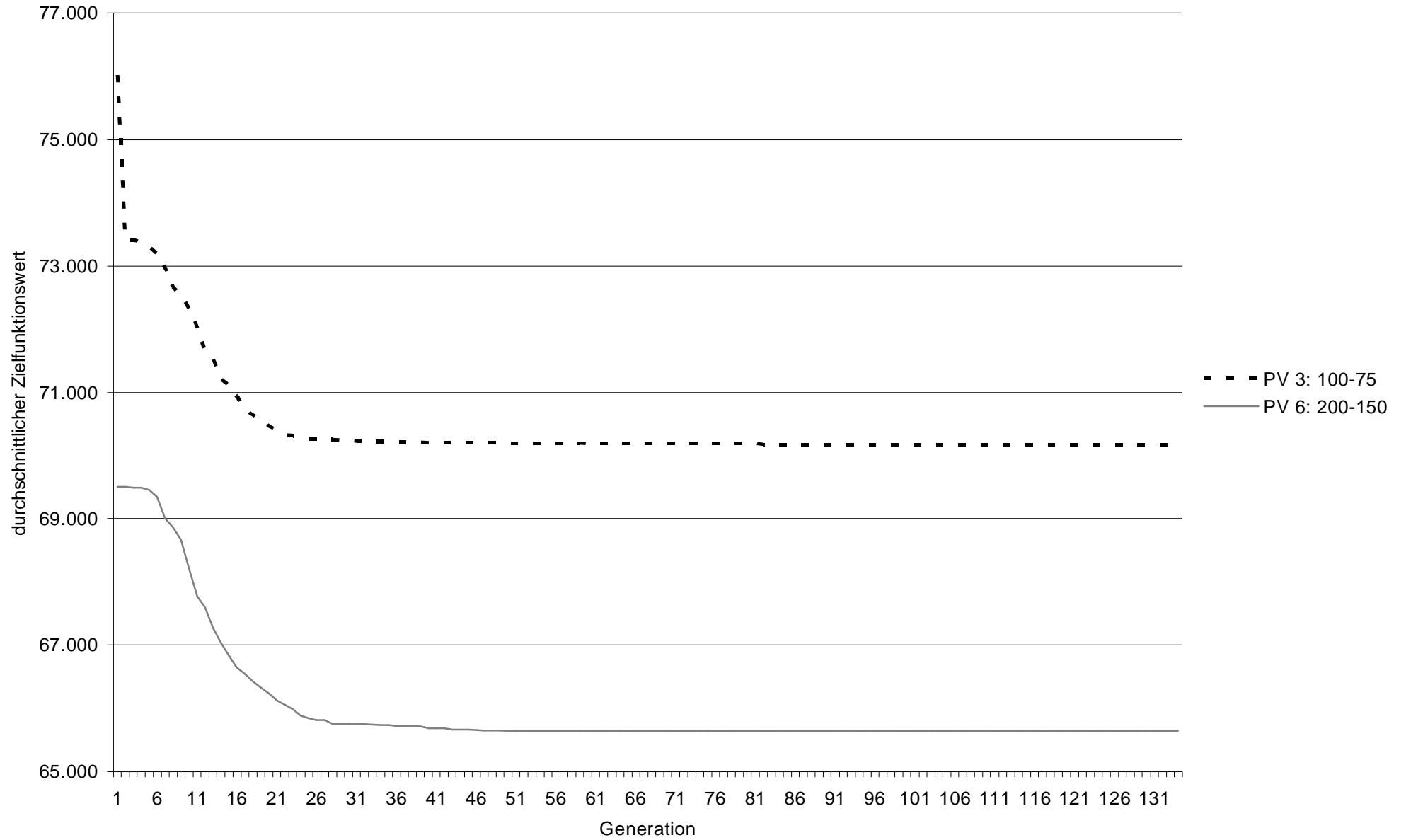


Abbildung 5.20: Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$

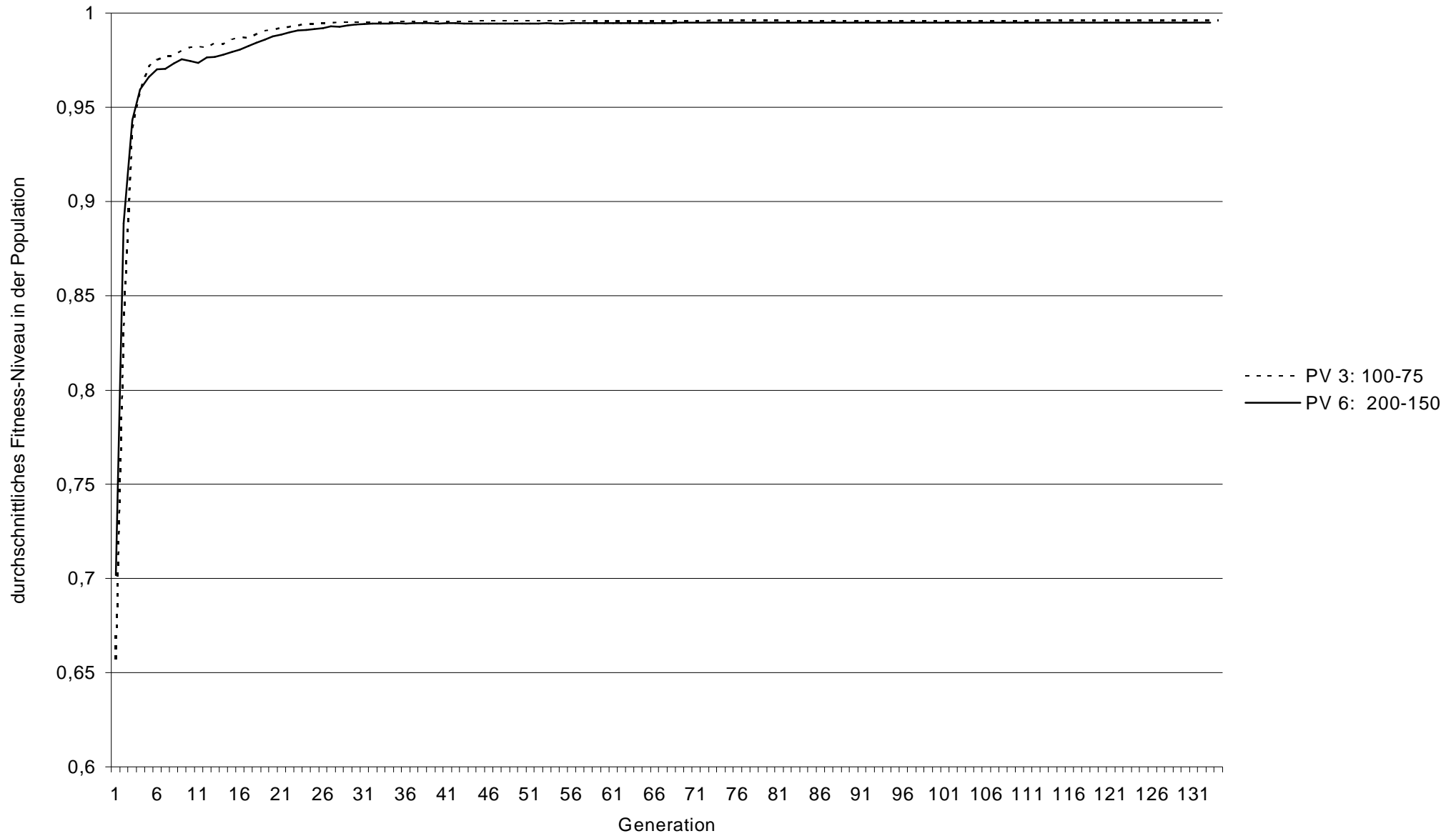


Abbildung 5.21: Entwicklung des durchschnittlichen Niveaus der Fitness in der Population bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$

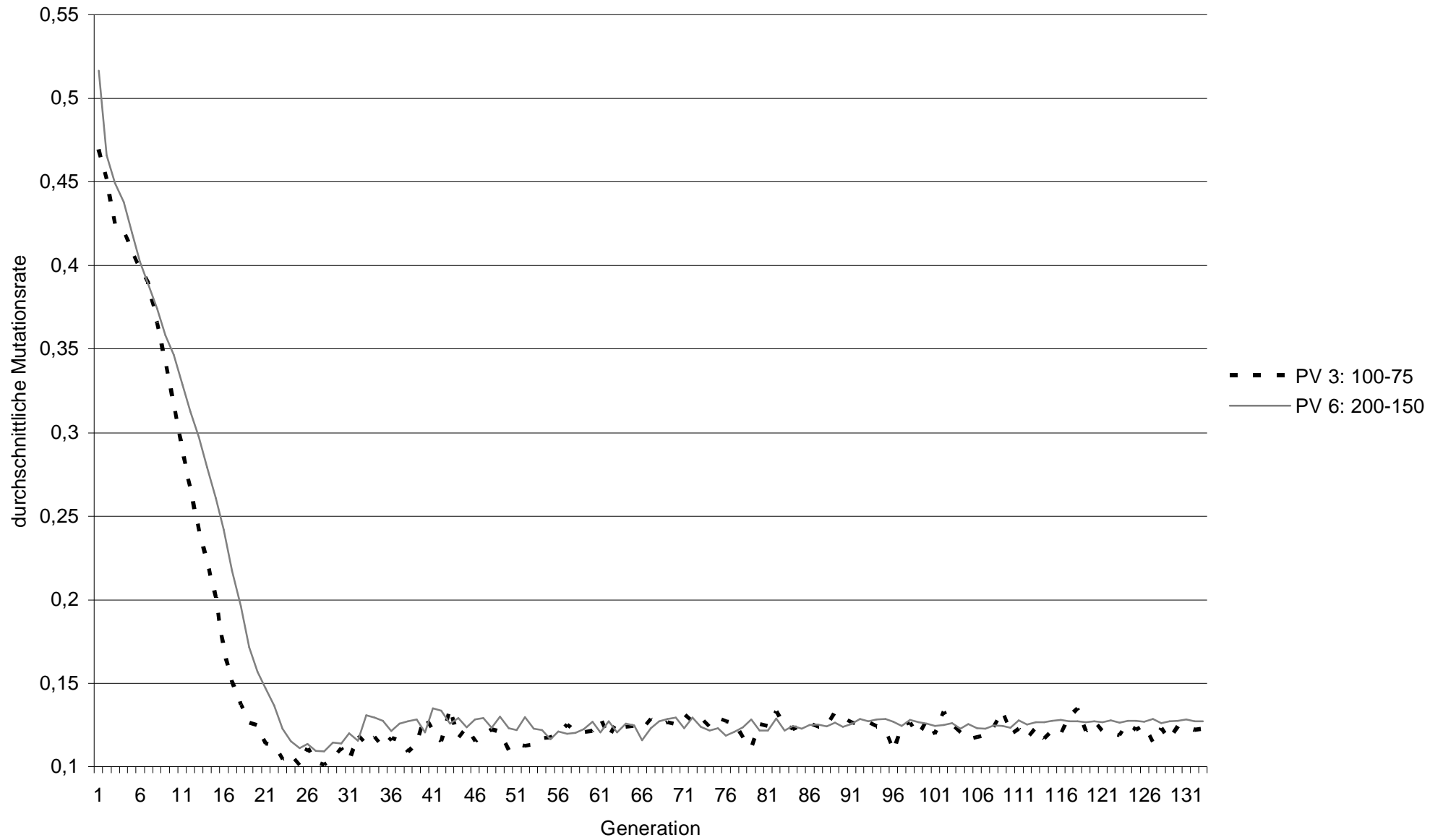


Abbildung 5.22: Entwicklung der durchschnittlichen Mutationsrate bei Anwendung der Verfahrensvariante $GA_{AB}^{K,gem}$

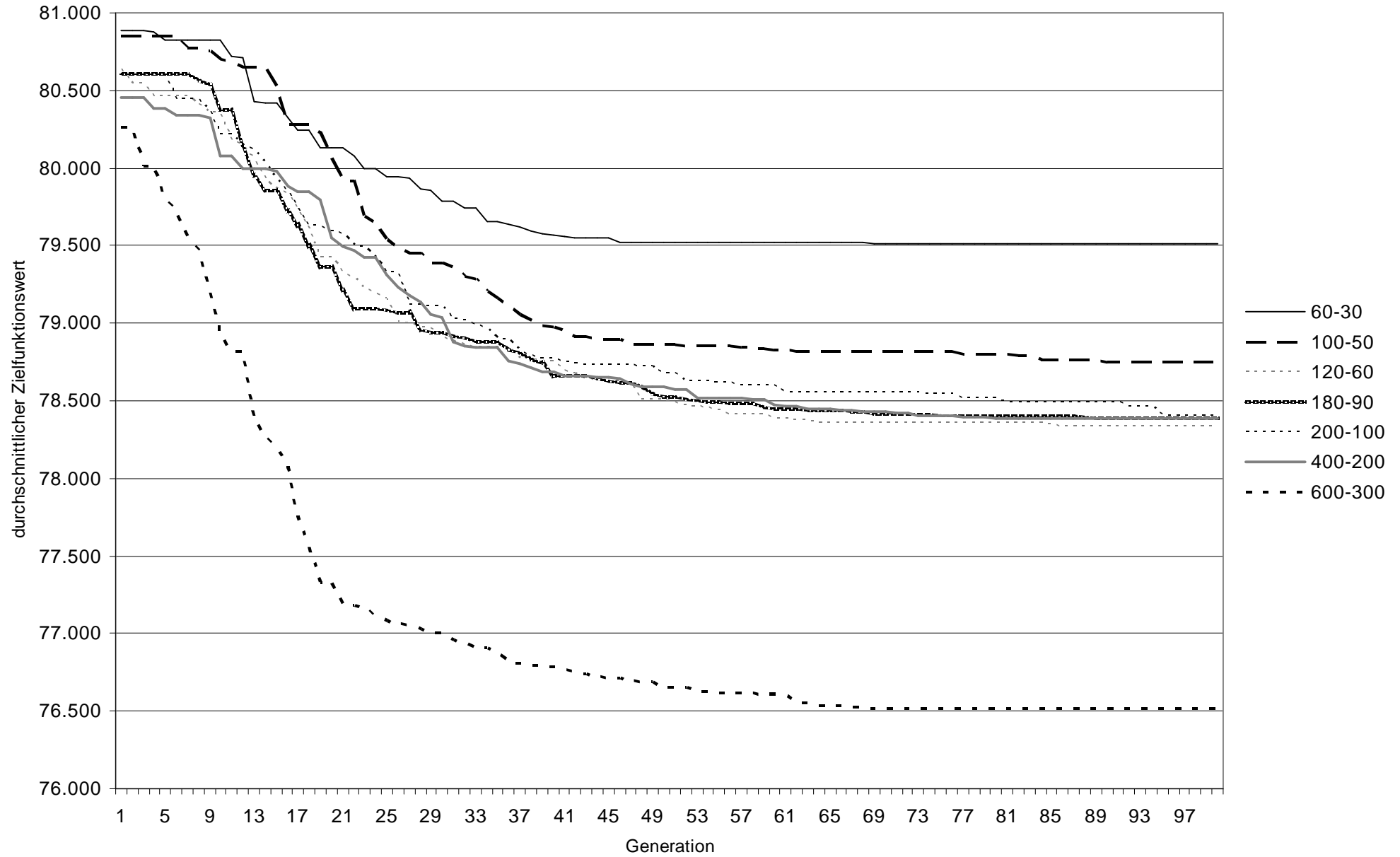


Abbildung 5.23: Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte bei verschiedenen Populationsgrößen (Testfeld 8)

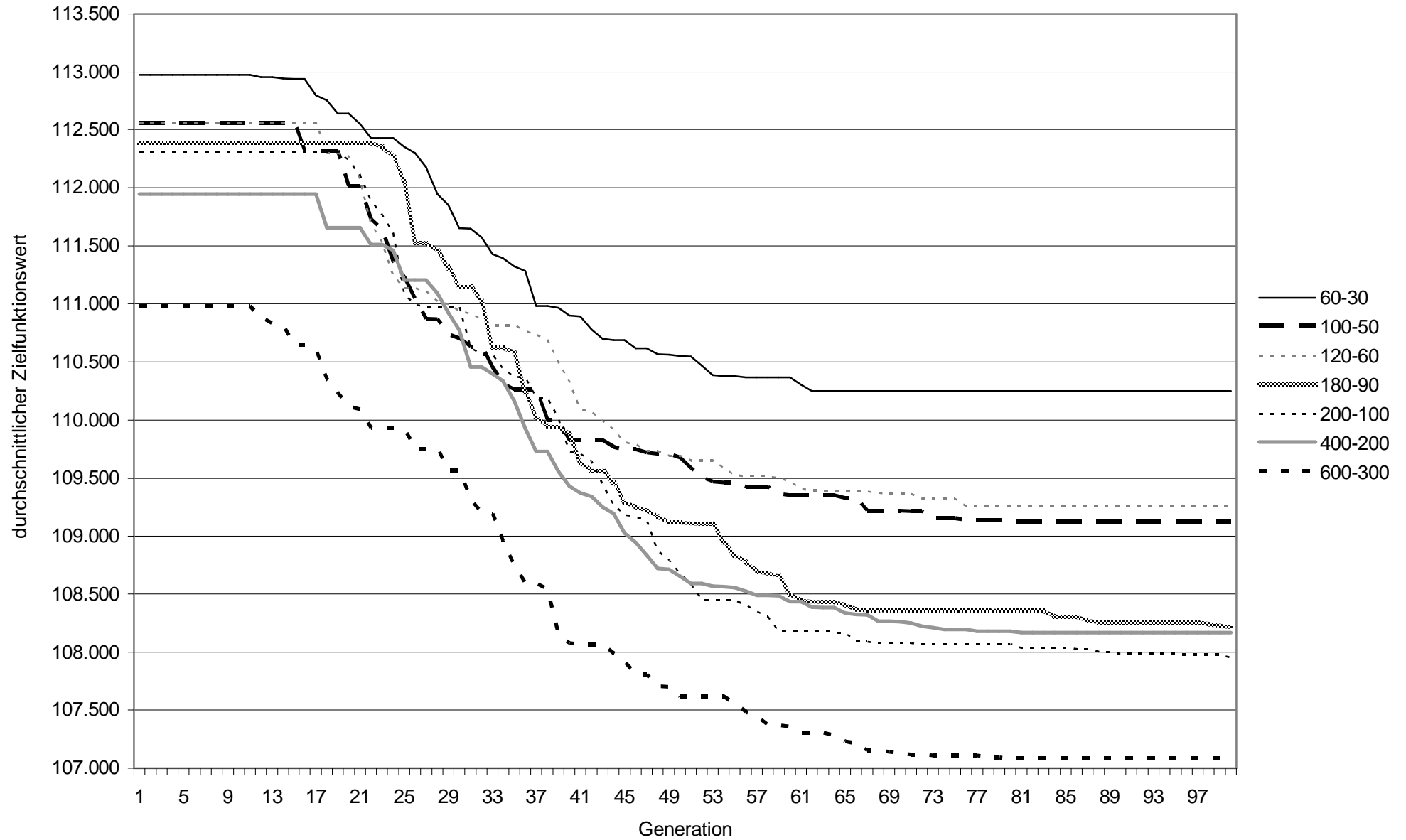


Abbildung 5.24: Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte bei verschiedenen Populationsgrößen (Testfeld 4)

Kapitel 6

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Produktionsablaufplanungsproblem der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgebestimmung für getaktete Mehrproduktfließlinien bei kurzfristigem Planungszeitraum, auftragsbezogener Nachfragestruktur und kostenorientierter Zielsetzung betrachtet. Das als Variables-Los-Sequenz-Problem (VLSP) bezeichnete Planungsproblem sowie das dem VLSP zu Grunde liegende Produktionssystem wurden in Kapitel 2 zunächst beschrieben und charakterisiert. Anschließend wurden verschiedene Produktionssituationen der Fließbandfertigung hinsichtlich mehrerer Differenzierungsmerkmale, wie die Art der Beförderung (kontinuierlich oder intermittierend) oder die Beschaffenheit der relativen räumlichen Stationsgrenzen (starr oder flexibel), analysiert und gezeigt, wie sich die bei den Produktloswechseln anfallenden asymmetrischen Loswechselzeiten und -kosten in den verschiedenen Produktionssituationen berechnen. Hierbei wurde zum einen deutlich, daß in die Berechnung der Loswechselzeiten sowohl die durch Werkzeugwechsel etc. verursachten Umrüstzeiten in den Bearbeitungsstationen, als auch eventuelle Taktzeitunterschiede aufeinanderfolgender Produktarten eingehen. Zum anderen wurde gezeigt, daß die Loswechselkosten zwar in funktionaler Abhängigkeit, aufgrund der im Regelfall unterschiedlichen Stationslohnsätze in Summe über alle Bearbeitungsstationen jedoch nicht in (streng) monotoner Abhängigkeit zu den zeitlichen Bezugsbasen, den Umrüstzeiten, stehen.

In Kapitel 3 wurde das VLSP formal beschrieben. Es wurden zwei Modellansätze vorgestellt. Das als Spezialfall des VLSP bezeichnete VLSPS bildet denjenigen Fall ab, bei welchem jeder externe Kundenauftrag genau einmal aufgelegt wird und die Fertigungslose durch Gruppierung externer Aufträge derselben Produktart gebildet werden. Das als allgemeiner Fall des VLSP bezeichnete VLSPA bildet denjenigen Fall ab, bei welchem die in ein Fertigungslos zusammenfassenden Mengeneinheiten einer Produktart nicht an die Gruppierung der externen Auftragsmengen gebunden sind, sondern jeder externe Auftrag in beliebig vielen Teilaufträgen gefertigt werden kann. Es wurde gezeigt, daß das VLSPS und das VLSPA gegenseitig ineinander überführbar sind.

Zur Lösung des VLSP wurde ein problemspezifischer genetischer Algorithmus in verschiedenen Varianten entwickelt. Die Ausgangspopulation des genetischen Algorithmus wurde mit einem aufwendigen stochastischen Konstruktionsverfahren erzeugt. Das als PDZ bezeichnete Konstruktionsverfahren kombiniert Prioritätsregeln, Dekomposition und Zufallselemente, wobei sowohl zur Reihenfolge- als auch zur Losgrößenbestimmung jeweils verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Die verschiedenen Varianten des PDZ-Verfahrens wurden experimentell in 16 Testfeldern à 30 Probleminstanzen analysiert und die beste Kombination aus Reihenfolge- und Losgrößenbestimmungsmodus zur Erzeugung der Ausgangspopulation herangezogen. Die Ergebnisse haben deutlich die Überlegenheit der sich an den Umrüst- und Lagerungskosten orientierenden, die Aufträge gruppierenden, als PDZ_{AB}^K bezeichneten Verfahrensvariante aufgezeigt. Die als Zufallsverfahren bezeichnete Variante PDZ_D^{Zuf} erzeugt im Durchschnitt hinsichtlich der Zielfunktionswerte um 80% bis 160% schlechtere Lösungen

als das PDZ_{AB}^K . Der sich an die Erzeugung der Ausgangspopulation anschließende, als *AGO* bezeichnete Algorithmus der genetischen Operatoren beinhaltet neben der Selektion einen speziell für die betrachtete Problemstruktur entwickelten, als *CW-ABC* bezeichneten Kreuzungsoperator. Der *CW-ABC* ist ein Kreuzungsoperator, der die Belegungsentscheidungen in dem jeweils zu erzeugenden Kind-Vektor anhand der Häufigkeit bestimmter Kantenbeziehungen in den - zur Erzeugung eines Kindes - vier beteiligten Elternteilen und anhand der durch die Belegung verursachten Lagerungskosten trifft. Auf die Anwendung eines Mutationsoperators wurde aufgrund der durch den Kreuzungsoperator induzierten hohen impliziten Mutation verzichtet.

Der sich aus *PDZ* und *AGO* zusammensetzende genetische Algorithmus wurde zum einen hinsichtlich verschiedener Ausprägungen der Verfahrensparameter (Populationsgröße, Erzeugungsgrad) und zum anderen hinsichtlich verschiedener Gestaltungsformen der Populationsstruktur (rein, gemischt) sowie der Entwicklungsstruktur (gemeinsam, getrennt) untersucht. Für die auf 30 Minuten begrenzte Laufzeit hat sich diejenige Variante des genetischen Algorithmus als beste herausgestellt, welche eine Populationsgröße von 200 Individuen und einen Erzeugungsgrad von 0,75 mit einer reinen Populationsstruktur und einer getrennten Entwicklungsstruktur kombiniert. Exemplarisch wurde gezeigt, daß durch die Anwendung des *AGO* die mit dem besten *PDZ*-Verfahren erzeugten Lösungen noch um bis zu 8% verbessert werden konnten, und daß im Evolutionsprozeß das durchschnittliche Niveau der Fitnesswerte in der Population auf bis zu 99,5% steigt, sowie die implizite Mutationsrate von ca. 0,5 auf ca. 0,12 sinkt. Die an den genetischen Algorithmus gestellten Anforderungen, ausgehend von einem - relativ zu den mit dem Zufallsverfahren gefundenen Lösungen - Pool guter Ausgangslösungen durch den Einsatz der genetischen Operatoren die Fitness in der Population bei anfangs relativ hoher und im Laufe des Evolutionsprozesses abnehmender Mutationsrate nachhaltig zu verbessern, wurden somit erfüllt.

Aufbauend auf den Ergebnissen der eindeutigen Überlegenheit derjenigen Verfahrensvariante, welche eine Integration der Loswechsel- und Lagerkosten vornimmt, wäre es weiterführend interessant, die Möglichkeiten der variablen Losgrößenfestlegung mit modifizierten oder weiteren Algorithmen und auch für strenger kapazitierte Probleme zu untersuchen. Darüber hinaus bieten die in vorliegender Arbeit beschriebenen Berechnungen der Loswechselzeiten für das betrachtete Produktionssystem der getakteten Fließlinienfertigung eine gute Grundlage für eine integrierte Behandlung des Leistungsabstimmungs- und Reihenfolgeproblems. Neben der Beantwortung der Fragen „In welchen Teilmengen werden die Produkte gefertigt?“ und „Wann werden die Produkte gefertigt?“ wird bei einer Integration des Leistungsabstimmungsproblems in das Losgrößen- und Reihenfolgeproblem auch die Frage „Wie werden die vorhandenen Potentialfaktoren konkret eingesetzt?“ erst durch die Lösung des Problems beantwortet, und die Lösung dieses Teilproblems nicht als gegeben vorausgesetzt. Werden die Loswechselzeiten und -kosten, wie in vorliegender Arbeit, ausgehend von einer bereits abgestimmten Linie ermittelt, besteht eine funktionale Abhängigkeit der Loswechselzeiten von den aus der abgestimmten Linie hervorgehenden Parametern (Anzahl und Länge der Stationen, produktartenindividuelle Auflegeintervalle). Sollte eine Integration der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in den Leistungsabstimmungsprozeß vorgenommen werden, müßte diese einseitige Abhängigkeit aufgehoben werden.

Literaturverzeichnis

Aarts/Lenstra (1997):

Aarts, E., Lenstra, J. K., Local Search in Combinatorial Optimization, Chichester et al., 1997.

Adam (1963):

Adam, D., Simultane Ablauf- und Programmplanung bei Sortenfertigung mit ganzzahliger linearer Programmierung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 33, 1963, 233-245.

Adam (1969):

Adam, D., Produktionsplanung bei Sortenfertigung, Wiesbaden, 1969.

Amen (1997):

Amen, M., Kostenorientierte Leistungsabstimmung von Fließlinien, Dissertation, Universität Passau, 1997.

Anderson/Ferris (1994):

Anderson, E. J., Ferris, M. C., Genetic algorithms for combinatorial optimization: The assembly line balancing problem, in: ORSA Journal on Computing, Vol. 6, 1994/2, 161-178.

Aneke/Carrie (1986):

Aneke, N. A. G., Carrie, A. S., A design technique for the layout of multi-product flowlines, in: International Journal of Production Research, Vol. 24, 1986/3, 471-481.

Antonisse (1989):

Antonisse, J., A new interpretation of schema notation that overturns the binary encoding constraint, in: Schaffer (1989), 86-91.

Asveren/Molitor (1996):

Asveren, T., Molitor, P., New Crossover Methods for Sequencing Problems, in: Voigt et al. (1996), 290-299.

Axsäter/Schneeweiß/Silver (1986):

Axsäter, S., Schneeweiß, C., Silver, E., (Hrsg.), Multi-Stage Production Planning and Inventory Control, series: Lecture Notes in Mathematical Systems (266), Berlin et al., 1986.

Bäck (1996):

Bäck, T., Evolutionary algorithms in theory and praxis, Oxford et al., 1996.

Bäck/Schwefel (1996):

Bäck, T., Schwefel, H.-P., Evolutionary Computation: An Overview, in: IEEE (1996), 20-29.

Barany/Van Roy/Wolsey (1984):

Barany, I., Van Roy, T. J., Wolsey, L. A., Strong formulations for multi-item capacitated lot sizing, in: Management Science, Vol. 30, 1984/10, 1255-1261.

Barr/Helgason/Kennington (1997):

Barr, R. S., Helgason, R. V., Kennington, J. L., (Editors), Interfaces in Computer Science and Operations Research, Boston et al., 1997.

Belew/Booker (1991):

Belew, R. K., Booker, L. B., (Editors), Proceedings of the 4th International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, 1991.

- Bierwirth (1992):
Bierwirth, C., Optimierung der Ablaufplanung einer Fließfertigung mit parallelen genetischen Algorithmen, Dissertation, Universität Bremen, 1992.
- Bollapragada/Akella (1992):
Bollapragada, S., Akella, R., Optimal Inventory Policy in Assembly Systems with Component Commonality, in: Fandel/Gulledge/Jones (1992), 405-412.
- Böhms (1980):
Böhms, H., Leistungslohngestaltung, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, 1980.
- Braun (1991):
Braun, H., On solving travelling salesman problems by genetic algorithms, in: Schwefel/Männer (1991), 129-133.
- Bronner (2001):
Bronner, A., Industrielle Planungstechniken, Unternehmens-, Produkt- und Investitionsplanung, Kostenrechnung und Terminplanung, Berlin et al., 2001.
- Bruno/Downey (1978):
Bruno, J., Downey, P., Complexity of task sequencing with deadlines, set-up times and changeover costs, in: Siam Journal on computing, Vol. 7, 1978, 393-404.
- Brüggemann (1995):
Brüggemann, W., Ausgewählte Probleme der Produktionsplanung, Heidelberg, 1995.
- Brüssau (2002):
Brüssau, Kai, Evolutionäre Algorithmen zur simultanen Losgrößen- und Ablaufplanung, Wiesbaden, 2002.
- Burckhardt (2001):
Burckhardt, W. (Hrsg.), Das große Handbuch der Produktion, Landsberg/Lech, 2001.
- Cantor (1980):
Cantor, G., Gesammelte Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts, (Reprint), Berlin et al., 1980.
- Catrysse et al. (1993):
Catrysse, D., Salomon, M., Kuik, R., Van Wassenhove, L. N., A dual ascent and column generation heuristic for the discrete lotsizing and scheduling problem with setup times, in: Management Science, Vol. 39, 1993/4, 477-486.
- Chambers (1995a):
Chambers, L. (Editor), Practical Handbook of Genetic Algorithms: Applications - Volume I, Boca Raton et al., 1995.
- Chambers (1995b):
Chambers, L. (Editor), Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers - Volume II, Boca Raton et al., 1995.
- Chambers (1999):
Chambers, L. (Editor), Practical Handbook of Genetic Algorithms: Complex Coding Systems - Volume III, Boca Raton et al., 1999.
- Chen/Vempati/Aljaber (1995):
Chen, C.-L., Vempati, V. S., Aljaber, N., An application of genetic algorithms for flow shop problems, in: European Journal of Operational Research, Vol. 80, 1995, 389-396.
- Cleveland/Smith (1989):
Cleveland, G. A., Smith, S. F., Using Genetic Algorithms to Schedule Flow Shop Releases, in: Schaffer (1989), 160-169.
- Crauwels/Potts/Van Wassenhove (1996):
Crauwels, H. A. J., Potts, C. N., Van Wassenhove, L. N., Local search heuristics for single-machine scheduling with batching to minimize the number of late jobs, in: European Journal of Operational Research, Vol. 90, 1996, 200-213.

- Daub (1994):
Daub, A., Ablaufplanung, Bergisch Gladbach/Köln, 1994.
- Daub (1998):
Daub, A., Simultane Ablauf- und Kapazitätsplanung, in: Zeitschrift für Planung, Jg. 9, 1998, 63-80.
- Davidor/Schwefel/Männer (1994):
Davidor, Y., Schwefel, H.-P., Männer, R., (Editors), Proceedings of the 3rd International Conference on Parallel Problem Solving from Nature – PPSN III, Berlin et al., 1994.
- Davis (1987):
Davis, L. D., (Hrsg.), Genetic algorithms and simulated annealing, Pitman, 1987.
- Davis (1991a):
Davis, L. D., (Hrsg.), Handbook of Genetic Algorithms, New York, 1991.
- Davis (1991b):
Davis, L. D., Hybridization and numerical representation, in: Davis (1991a), 61-71.
- Davis (1995):
Davis, S. G., An improved algorithm for solving the economic lot size problem, in: International Journal of Production Research, Vol. 33, 1995/4, 1007-1026.
- Decker (1993):
Decker, M., Variantenfließfertigung, Heidelberg, 1993.
- De Jong (1975):
De Jong, K. A., An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems, Doctoral Thesis, University of Michigan, 1975.
- De Jong (1993):
De Jong, K. A., Genetic algorithms are NOT function optimizers, in: Whitley (1993), 5-17.
- De Jong/Sarma (1993):
De Jong, K. A., Sarma, J., Generation Gaps Revisited, in: Whitley (1993), 19-28.
- Dempster (1982):
Dempster, M. A. H., (Hrsg.), Proceedings of the NATO Advanced Study and Research Institute on Theoretical Approaches to Scheduling Problems, Dordrecht et al., 1982.
- Derstroff (1995):
Derstroff, M. C., Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen, Heidelberg, 1995.
- Diaby et al. (1992):
Diaby, M., Bah., H. C., Karwan, M. H., Zionts, S., A lagrangean relaxation approach for very-large-scale capacitated lot-sizing, in: Management Science, Vol. 38, 1992/9, 1329-1340.
- Dilts/Ramsing (1989):
Dilts, D. M., Ramsing, K. D., Joint Lot Sizing and Scheduling of Multiple Items with Sequence Dependent Setup Costs, in: Decision Science, Vol. 20, 1989, 120-133.
- Dinkelbach (1964):
Dinkelbach, W., Zum Problem der Produktionsplanung in Ein- und Mehrproduktunternehmen, Würzburg - Wien, 1964.
- Dobson (1992):
Dobson, G., The cyclic lot scheduling problem with sequence-dependent setups, in: Operations Research, Vol. 40, 1992/4, 736-749.
- Domschke/Drexel (2002):
Domschke, W., Drexel, A., Einführung in Operations Research, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin et al., 2002.
- Domschke/Scholl/Voß (1997):
Domschke, W., Scholl, A., Voß, S., Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin et al., 1997.

- Dorninger et al. (1990):
Dorninger, C., Janscheck, O., Olearczick, E., Röhrenbacher, H., Produktionsplanung und -steuerung, Wien, 1990.
- Downsland (1996):
Downsland, K. A., Genetic Algorithms - a tool for OR?, in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 47, 1996, 550-561.
- Drexl/Haase (1995):
Drexl, A., Haase, K., Proportional lotsizing and scheduling, in: International Journal of Production Economics, Vol. 40, 1995, 73-87.
- Drexl/Haase (1996):
Drexl, A., Haase, K., Sequential-analysis Based Randomized-regret-methods for Lot-sizing and Scheduling, in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 47, 1996, 251-265.
- Drexl/Kimms/Jordan (1998):
Drexl, A., Kimms, A., Jordan, C., Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme in der Fertigung, in: Zeitschrift für Wirtschaftliche Fertigung, Jg. 93, 1998/11, 546-551.
- Eggers (1996):
Eggers, A., Offenes integriertes Betriebsmittel-Steuerungssystem, München - Wien, 1996.
- Eiben (1998):
Eiben, A. E., (Hrsg.), Proceedings of the 5th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature - PPSN V, Berlin et al., 1998.
- Eiben (1999):
Eiben, A. E., Experimental Results on the Effects of Multi-Parent Recombination: an Overview, in: Chambers (1999), 487-502.
- Eiben/Raué/Ruttkay (1994):
Eiben, A. E., Raué, P-E., Ruttkay, Zs., Genetic algorithms with multi-parent recombination, in: Davidor/Schwefel/Männer (1994), 78-87.
- Eiben/Van Kemenade/Kok (1995):
Eiben, A. E., Van Kemenade, C. H. M., Kok, J. N., Orgy in the Computer: Multi-Parent Reproduction in Genetic Algorithms, in: Morán et al. (1995), 934-945.
- Eilon (1962):
Eilon, S., Elements of production planning and control, New York, 1962.
- Elmaghraby (1978):
Elmaghraby, S. E., The economic lot scheduling problem (ELSP): Review and extensions, in: Management Science, Vol. 24, 1978, 587-598.
- Eshelman/Schaffer (1993):
Eshelman, L. J., Schaffer, J. D., Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata, in: Whitley (1993), 187-202.
- Fandel/Gulledge/Jones (1992):
Fandel, G., Gulledge, T., Jones, A., (Editors), Operations Research in Production Planning and Control, Proceedings of a Joint German/US Conference (DGOR/ORSA), Berlin et al., 1992.
- Fandel et al. (1999):
Fandel, G., Heuft, B., Paff, A., Pitz, T., Kostenrechnung, Berlin et al. 1999.
- Felbecker (1980):
Felbecker, O., Ein Beitrag zur Reihenfolgeplanung bei Mehrprodukt-Linienfertigung, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1980.
- Fleischmann (1990):
Fleischmann, B., The discrete lot-sizing and scheduling problem, in: European Journal of Operational Research, Vol. 44, 1990, 337-348.

- Fleischmann (1994):
Fleischmann, B., The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 75, 1994, 395-404.
- Forrest (1993):
Forrest, S., (Editor), *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, San Mateo, 1993.
- Freisleben/Merz (1996a):
Freisleben, B., Merz, P., New Genetic Local Search Operators for the Travelling Salesman Problem, in: Voigt et al. (1996), 890- 899.
- Freisleben/Merz (1996b):
Freisleben, B., Merz, P., A Genetic Local Search Algorithm for Solving Symmetric and Asymmetric Travelling Salesman Problems, in: *IEEE* (1996), 616-621.
- Friedl (2004):
Friedl, B., *Kostenrechnung – Grundlagen, Teilrechnungen und Systeme der Kostenrechnung*, München – Wien, 2004.
- Garey/Johnson (1979):
Garey, M. R., Johnson, D. S., *Computers and Intractability – A guide to the theory of NP-completeness*, New York, 1979.
- Gehring/Schütz (1994):
Gehring, H., Schütz, G., Zwei genetische Algorithmen zur Lösung des Bandabgleichproblems, in: Werners/Gabriel (1994), 85-128.
- Gen/Chen (1996):
Gen, M., Cheng, R., A Survey of Penalty Techniques in Genetic Algorithms, in: *IEEE* (1996), 804-809.
- Glass/Potts (1996):
Glass, C. A., Potts, C. N., A comparison of local search methods for flow shop scheduling, in: Laporte/Osman (1996), 489-509.
- Glover/Kelly/Laguna (1995):
Glover, F., Kelly, J. P., Laguna, M., Genetic algorithms and tabu search: hybrids for optimization, in: *Computers Operations Research*, Vol. 22, 1995/1, 111-134.
- Goldberg (1989):
Goldberg, D. E., *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Reading et al., 1989.
- Goldberg et al. (1993):
Goldberg, D. E., Deb, K., Kargupta, H., Harik, G., Rapid, accurate optimization of difficult problems using fast messy genetic algorithms, in: Forrest (1993), 56-64.
- Goldberg/Lingle (1985):
Goldberg, D. E., Lingle, R., Alleles, loci, and the Travelling Salesman Problem, in: Grefenstette (1985), 154-159.
- Gopalakrishnan/Miller/Schmidt (1995):
Gopalakrishnan, M., Miller, D. M., Schmidt, C. P., A framework for modelling setup carryover in the capacitated lot sizing problem, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 33, 1995/7, 1973-1988.
- Gorges-Schleuter (1989):
Gorges-Schleuter, M., ASPARAGOS An asynchronous parallel genetic optimization strategy, in: Schaffer (1989), 422-427.
- Graves/Holmes Redfield (1988):
Graves, S. C., Holmes Redfield, C., Equipment Selection and Task Assignment for Multiproduct Assembly System Design, in: *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 1, 1988, 31-50.
- Grefenstette (1985):
Grefenstette, J. J., (Editor), *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, Hillsdale, 1985.

- Grefenstette (1987a):
Grefenstette, J. J., (Editor), Proceedings of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, Hillsdale/New Jersey, 1987.
- Grefenstette (1987b):
Grefenstette, J. J., Incorporating problem specific knowledge into genetic algorithms, in: Davis (1987), 42-60.
- Grefenstette et al. (1985):
Grefenstette, J. J., Gopal, R., Rosmaita, B., Van Gucht, D., Genetic algorithms for the travelling salesman problem, in: Grefenstette (1985), 160-168.
- Grötschel/Holland (1991):
Grötschel, M., Holland, O., Solutions of large-scale symmetric travelling salesman problems, in: Mathematical Programming, Vol. 51, 1991, 141-202.
- Gupta (1986):
Gupta, J. N. D., Flowshop Schedules with Sequence Dependent Setup Times, in: Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol. 29, 1986/3, 206-219.
- Gupta/Gupta/Evans (1993):
Gupta, M. C., Gupta, Y. P., Evans, W., Operations planning and scheduling problems in advanced manufacturing systems, in: International Journal of Production Research, Vol. 31., 1993/4, 869-900.
- Gupta/Goyal (1992):
Gupta, Y. P., Goyal, S., Flexibility trade-offs in a random flexible manufacturing system: A simulation study, in: International Journal of Production Research, Vol. 30, 1992/3, 527-557.
- Gutenberg (1983):
Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Erster Band: Die Produktion, 24. unveränderte Auflage, Berlin et al., 1983.
- Haase (1994):
Haase, K., Lotsizing and scheduling for production planning, series: Lecture notes in economics and mathematical systems (408), Berlin et al., 1994.
- Haase (1996):
Haase, K., Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs, in: OR Spektrum, Vol. 18, 1996, 51-59.
- Haase/Göpfert (1996):
Haase, K., Göpfert, L., Engpaßorientierte Fertigungssteuerung bei reihenfolgeabhängigen Rüstvorgängen in einem Unternehmen der Satz- und Drucktechnik, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 66, 1996/12, 1511-1526.
- Haase/Kohlmorgen (1996):
Haase, K., Kohlmorgen, U., Parallel Genetic Algorithm for the Capacitated Lot-Sizing Problem, in: Kleinschmidt et al. (1996), 370-375.
- Hackstein/Felbecker (1981):
Hackstein, R., Felbecker, O., Bedeutung der Reihenfolgeplanung bei Varianten-Linienfertigung - Teil 1, in: Arbeitsvorbereitung, (1981/3), 76-81.
- Hahn (1972):
Hahn, R., Produktionsplanung bei Linienfertigung, Berlin - New York, 1972.
- Hahn (1998):
Hahn, F., Knappe Kapazitäten in der Losgrößenplanung, Wiesbaden, 1998.
- Hammerman/Goldberg (1999):
Hammerman, N., Goldberg, R., Algorithms to improve the convergence of a genetic algorithm with a finite state machine genome, in: Chambers (1999), 119-238.
- Heinen (1991):
Heinen, E., Industriebetriebslehre – Entscheidungen im Industriebetrieb, 9. vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, 1991.

Helber (1994):

Helber, S., Kapazitätsorientierte Losgrößenplanung in PPS-Systemen, Stuttgart, 1994.

Hindi (1996):

Hindi, K. S., Solving the CLSP by a Tabu Search Heuristic, in: Journal of the Operational Research Society, Vol 47, 1996, 151-161.

Hoitsch (1993):

Hoitsch, H.-J., Produktionswirtschaft, 2. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, München, 1993.

Holland (1975):

Holland, J. H., Adaption in natural and artificial systems, University of Michigan, 1975.

Holland (1992):

Holland, J. H., Adaption in natural and artificial systems, Cambridge et al., 1992. (Reprint der Kapitel 1 – 9 von Holland (1975) und zusätzliches Kapitel darüber, was sich seit 1975 getan hat.)

Holthaus (1996):

Holthaus, O., Ablaufplanung bei Werkstattfertigung, Wiesbaden, 1996.

Hwang/Sun (1998):

Hwang, H., Sun, J. U., Production sequencing problem with re-entrant work flows and sequence dependent setup-times, in: International Journal of Production Research, Vol. 36, 1998/9, 2435-2450.

IEEE (1994):

Institute of Electrical and Electronics Engineering, World Congress on Computational Intelligence, Proceedings of the first IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'94), 1994.

IEEE (1996):

Institute of Electrical and Electronics Engineering, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'96), 1996.

IEEE (1998):

Institute of Electrical and Electronics Engineering, World Congress on Computational Intelligence, Proceedings of the International Conference on Evolutionary Computation (ICEC' 98), Vol. I, 1998.

Janikow/Michalewicz (1991):

Janikow, C. Z., Michalewicz, Z., An experimental comparison of binary and floating point representation in genetic algorithms, in: Belew/Booker (1991), 31-36.

Jog/Suh/Van Gucht (1989):

Jog, P., Suh, J. Y., Van Gucht, D., The effects of population size, heuristic crossover and local improvement on a genetic algorithm for the travelling salesman problem, in: Schaffer (1989), 110-115.

Johnson/McGeoch (1997):

Johnson, D. S., McGeoch, L. A., The travelling salesman problem: a case study, in: Aarts/Lenstra (1997), 215-310.

Jordan (1996):

Jordan, C., Batching and Scheduling, series: Lecture notes in economic and mathematical systems, Berlin et al., 1996.

Jordan (1998):

Jordan, C., A two-phase genetic algorithm to solve variants of the batch sequencing problem, in: International Journal of Production Research, Vol. 36, 1998/3, 745-760.

Jordan/Drexel (1998):

Jordan, C., Drexel, A., Discrete lotsizing and scheduling by batch-sequencing, in: Management Science, Vol. 44, 1998/5, 698-713.

Kabir/Tabucanon (1995):

Kabir, Md. A., Tabucanon, M. T., Batch-model assembly line balancing: A multiattribute decision making approach, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 41, 1995, 193-201.

Karmarkar/Schrage (1985):

Karmarkar, U. S., Schrage, L., The deterministic dynamic product cycling problem, in: *Operations Research*, Vol. 33, 1985/2, 326-345.

Kern (1992):

Kern, W., *Industrielle Produktionswirtschaft*, 5. durchgesehene und erweiterte Auflage, Stuttgart, 1992.

Kern/Schröder/Weber (1996):

Kern, W., Schröder, H.-H., Weber, J., *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*, 2. völlig neu gestaltete Auflage, Stuttgart, 1996.

Kilger (1973):

Kilger, W., *Optimale Produktions- und Absatzplanung*, Opladen, 1973.

Kilger (1987):

Kilger, W., *Einführung in die Kostenrechnung*, 3. Auflage, Wiesbaden, 1987.

Kim/Hyun/Kim (1996):

Kim, Y. K., Hyun, C. J., Kim, Y., Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach, in: *Computers Operations Research*, Vol. 23, 1996/12, 1131-1145.

Kim/Mabert (1995):

Kim, D., Mabert, V. A., Integrative versus separate cycle scheduling heuristics for capacitated discrete lot sizing and sequencing problems, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 33, 1995/7, 2007-2021.

Kimms (1997):

Kimms, A., *Multi-level lot sizing and scheduling: methods for capacitated, dynamic and deterministic models*, Heidelberg, 1997.

Kinnebrock (1994):

Kinnebrock, W., *Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen*, München et al., 1994.

Kistner/Rogalski (1995):

Kistner, K.-P., Rogalski, M., Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei Serien- und Sortenfertigung, in: *Wissenschaftliches Studium*, 1995/6, 290-296.

Kleinschmidt et al. (1996):

Kleinschmidt, P., Bachem, A., Derings, U., Fischer, D., Leopold-Wildburger, U., Möhring, R., (Editors), *Operations Research Proceedings 1995*, Berlin et al., 1996.

Knebel/Zander (1989):

Knebel, H., Zander, E., *Arbeitsbewertung und Eingruppierung*, 2. neubearb. Auflage, Heidelberg, 1989.

Koether (1986):

Koether, R., *Verfahren zur Verringerung von Modell-Mix-Verlusten in Fließmontagen*, Berlin et al., 1986.

Kolen/Pesch (1994):

Kolen, A., Pesch, E., Genetic local search in combinatorial optimization, in: *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 48, 1994, 273-284.

Kratschmer (1987):

Kratschmer, F., Rüstzeitverkürzung: Ein Beispiel aus der Umformtechnik, in: *Arbeitsvorbereitung*, Jg. 24, 1987/5, 151-154.

Küpper/Helber (1995):

Küpper, H.-U., Helber, S., *Ablauforganisation in Produktion und Logistik*, 2. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart, 1995.

Ladson/Terjung (1971):

Ladson, L. S., Terjung, R. C., An efficient algorithm for multi-item scheduling, in: Operations Research, Vol. 19, 1971/4, 946-969.

Langdon (1998):

Langdon, W. B., Genetic Programming and Data Structures: Genetic Programming + Data Structures = Automatic Programming!, Boston et al., 1998.

Laporte/Osman (1996):

Laporte, G., Osman, I. H., (Editors), Annals of Operations Research - Metaheuristics in Combinatorial Optimization, Vol. 63, Amsterdam, 1996.

Lashine/Foote/Ravindran (1991):

Lashine, S., Foote, B., Ravindran, A., A nonlinear mixed integer goal programming model for the two-machine closed flow shop, in: European Journal of Operational Research, Vol. 55, 1991, 57-70.

Lee/Choi (1995):

Lee, C. Y., Choi, J. Y., A genetic algorithm for job sequencing problems with distinct due dates and general early-tardy penalty weights, in: Computers Operations Research, Vol. 22, 1995/8, 857-869.

Lee/Sikora/Shaw (1993):

Lee, I., Sikora, R., Shaw, M. J., Joint Lot Sizing and Sequencing with Genetic Algorithms for Scheduling: Evolving the Chromosom Structure, in: Forrest (1993), 383-389.

Lima et al. (1996):

Lima, J. A., Gracias, N., Pereira, H., Rosa, A., Fitness function design for genetic algorithms in cost evaluation based problems, in: IEEE (1996), 207-212.

Lochmann (1999):

Lochmann, M., Operative Planung und Steuerung von Mehrprodukt-Fließlinien, Wiesbaden, 1999.

Lockett/Muhlemann (1972):

Lockett, A. G., Muhlemann, A. P., A scheduling problem involving sequence dependent changeover times, in: Operations Research, Vol. 20, 1972/4, 895-902.

Lodders (1998):

Lodders, D., Methoden der experimentellen Optimierung, Göttingen, 1998.

Louis/Rawlins (1993):

Louis, S. J., Rawlins, G. J. E., Syntactic Analysis of Convergence in Genetic Algorithms, in: Whitley (1993), 141-151.

Maekawa et al. (1996):

Maekawa, K., Mori, N., Tamaki, H., Kita, H., Nishikawa, Y., A genetic solution for the travelling salesman problem by means of thermodynamical selection rule, in: IEEE (1996), 529-534.

Maes/Van Wassenhove (1988):

Maes, J., Van Wassenhove, L., Multi-Item Single-Level Capacitated Dynamic Lot-Sizing Heuristics: A General Review, in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 39, 1988/11, 991-1004.

Magee/Boodman (1967):

Magee, J. F., Boodman, D. M., Production Planning and Inventory Control, Second Edition, New York et al., 1967.

Manne (1960):

Manne, A. S., On the job-shop scheduling problem, in: Operations Research, Vol. 8, 1960, 219-223.

Männer/Manderick (1992):

Männer, R., Manderick, B. (Editors), Proceedings of the 2nd International Conference on Parallel Problem Solving from Nature – PPSN II, Elsevier, 1992.

- Martin/Otto/Felten (1991):
Martin, O., Otto, S. W., Felten, E. W., Large-step Markov chains for the travelling salesman problem, in: *Complex Systems*, Vol. 5, 1991, 299-336.
- Martin/Otto/Felten (1992):
Martin, O., Otto, S. W., Felten, E. W., Large-step Markov chains for the TSP incorporating local search heuristics, in: *Operations Research Letters*, Vol. 11, 1992, 219-224.
- Mathias/Whitley (1992):
Mathias, K., Whitley, D., Genetic Operators, the Fitness Landscape and the Travelling Salesman Problem, in: *Männer/Manderick (1992)*, 219-228.
- Mattfeld (1996):
Mattfeld, D. C., *Evolutionary Search and the Job Shop – Investigations on Genetic Algorithms for Production Scheduling*, Heidelberg, 1996.
- Maxwell (1962):
Maxwell, W. L., An Investigation of Multi-Product, Single-Machine Scheduling and Inventory Problems, in: *Operations Research*, Vol. 10, 1962, 741-742.
- Meyer/Hansen (1996):
Meyer, M., Hansen, K., *Planungsverfahren des Operations Research*, 4. vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage, München, 1996.
- Mitchell (1996):
Mitchell, M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge et al., 1996.
- Mollemeier (1997):
Mollemeier, A., *Integrierte Steuerung getakteter Variantenfließlinien*, Wiesbaden, 1997.
- Morán et al. (1995):
Morán, F., Moreno, A., Merelo, J. J., Chacón, P., *Advances in Artificial Life, Proceedings of the 3rd European Conference on Artificial Life*, Berlin et al., 1995.
- Muckstadt (1986):
Muckstadt, J. A., Planning component delivery intervals in constrained assembly systems, in: *Axsäter/Schneeweiß/Silver (1986)*, 132-149.
- Mühlenbein (1989):
Mühlenbein, H., Parallel genetic algorithms, population genetics and combinatorial optimization, in: *Schaffer (1989)*, 416-421.
- Mühlenbein (1997):
Mühlenbein, H., Genetic algorithms, in: *Aarts/Lenstra (1997)*, 137-171.
- Müller-Merbach (1962):
Müller-Merbach, H., *Die Bestimmung optimaler Losgrößen bei Mehrproduktfertigung*, Darmstadt, 1962.
- Murata/Ishibuchi (1996):
Murata, T., Ishibuchi, H., Positive and Negative Combination Effects of Crossover and Mutation Operators in Sequencing Problems, in: *IEEE (1996)*, 170-175.
- Naddor (1961):
Naddor, E., Evaluation of inventory control, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Operations Research*, London, 1961, 256-267.
- Nagar (1996):
Nagar, A., A combined branch-and-bound and genetic algorithm based approach for a flowshop scheduling problem, in: *Laporte/Osman (1996)*, 397-414.
- Nelson (1996):
Nelson, L. S., Notes on the Use of Randomization in Experimentation, in: *Journal of Quality Technology*, Vol. 28, 1996/1, 123-126.
- Neumann/Morlock (1993):
Neumann, K., Morlock, M., *Operations Research*, München - Wien, 1993.
- Nissen (1997):
Nissen, V., *Einführung in Evolutionäre Algorithmen*, Braunschweig - Wiesbaden, 1997.

Oliver/Smith/Holland (1987):

Oliver, I. M., Smith, D. J., Holland, J. R. C., A study of permutation crossover operators on the travelling salesman problem, in: Grefenstette (1987a), 224-230.

Osman/Laporte (1996):

Osman, I. H., Laporte, G., Metaheuristics: A bibliographie, in: Laporte/Osman (1996), 513-623.

Pack (1998):

Pack, L., Zur Berücksichtigung von Rüstzeiten im klassischen Maschinenbelegungsproblem, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 68, 1998/5, 497-524.

Pinedo (1995):

Pinedo, M., Scheduling - Theory, Algorithms and Systems, Englewood Cliffs, 1995.

Pinedo/Chao (1999):

Pinedo, M., Chao, X., Operations Scheduling – With applications in manufacturing and services, Boston et al., 1999.

Pinto/Dannenbring/Khumuwala (1983):

Pinto, P. A., Dannenbring, D. G., Khumuwala, B. M., Assembly Line Balancing with Processing Alternatives: An Application, in: Management Science, Vol. 29, 1983/7, 817-830.

Pirlot (1996):

Pirlot, M., General local search methods, in: European Journal of Operational Research, Vol. 92, 1996, 493-511.

Popp (1993):

Popp, T., Kapazitätsorientierte dynamische Losgrößen- und Ablaufplanung bei Sortenproduktion, Hamburg, 1993.

Potvin (1996):

Potvin, J.-Y., Genetic algorithms for the travelling salesman problem, in: Laporte/Osman (1996), 339-370.

Potvin/Guertin (1997):

Potvin, I.-Y., Guertin, F., Coupling a greedy route construction heuristic with a genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows, in: Barr/Helgason/Kennington (1997), 423-442.

Produktion (2002a):

Artikel: "Was sich in nur 3 Tagen optimieren läßt", in: Produktion – Die Wirtschaftszeitung für die deutsche Industrie, 23/2002, S. 26.

Produktion (2002b):

Artikel: "Doppel-Sieg im Kampf gegen den Fehlerteufel", in: Produktion – Die Wirtschaftszeitung für die deutsche Industrie, 51-52/2002, S. 10f.

Produktion (2003):

Artikel: "Aesculap: Produktion im Umbruch", in: Produktion – Die Wirtschaftszeitung für die deutsche Industrie, 48/2003, S. 25.

Proust et al. (1988):

Proust, C., Drogou, M., Foucher, J. M., Foucheyrand, E., Une heuristique pour le problème d'ordonnancement statique de type n/m/flowshop, avec prise en compte des temps de montage et démontage d'outils, in: Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle, Vol. 22, 1988, 453-470.

Proust/Gupta/Deschamps (1991):

Proust, C., Gupta, J. N. D., Deschamps, V., Flowshop scheduling with set-up, processing and removal times separated, in: International Journal of Production Research, Vol. 29, 1991/3, 479-493.

Rabelo/Jones/Yih (1995):

Rabelo, L., Jones, A., Yih, Y., A hybrid approach using neural networks, simulation, genetic algorithms, and machine learning for real time sequencing and scheduling problems, in: Chambers (1995b), 197-218.

- Rechenberg (1973):
Rechenberg, I., Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, Stuttgart, 1973.
- REFA (1991):
REFA (Verband für Arbeitsstudie und Betriebsorganisation), Methodenlehre der Betriebsorganisation, Planung und Steuerung – Teil 1, München, 1991.
- Reeves (1995):
Reeves, C. R., A genetic algorithm for flowshop sequencing, in: Computers & Operations Research, Vol. 22, 1995/1, 5-13.
- Richardson et al. (1989):
Richardson, J. T., Palmer, M. R., Liepins, G., Hilliard, M., Some guidelines for genetic algorithms with penalty functions, in: Schaffer (1989), 191-197.
- Rogers (1958):
Rogers, J. A., Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem, in: Management Science, Vol. 4, 1958, 264-291.
- Ronald (1995):
Ronald, S., Routing and scheduling problems, Chapter 11, in: Chambers (1995a), 367-430.
- Rosenberg/Ziegler (1992):
Rosenberg, O., Ziegler, H., A Comparison of Heuristic Algorithms for Cost-Oriented Assembly Line Balancing, in: ZOR – Methods and Models of Operations Research, Vol. 36, 1992, 477-495.
- Rubin/Ragatz (1995):
Rubin, P. A., Ragatz, G. L., Scheduling in a sequence dependent setup environment with genetic search, in: Computers Operations Research, Vol. 22, 1995/1, 85-99.
- Salomon et al. (1991):
Salomon, M., Kroon, L. G., Kuik, R., Van Wassenhove, L. N., Some extensions of the discrete lotsizing and scheduling problem, in: Management Science, Vol. 37, 1991, 801-812.
- Salomon et al. (1997):
Salomon, M., Salomon, M. M., Van Wassenhove, L. N., Dumas, Y., Dauzère-Péres, S., Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the Travelling Salesman Problem with time windows, in: European Journal of Operational Research, Vol. 100, 1997, 494-513.
- Salveson (1955/56):
Salveson, M. E., A problem in optimal machine loading, in: Management Science, Vol. 1-2, 1955/56, 232-260.
- Sannomiya/Ima (1996):
Sannomiya, N., Ima, H., Application of genetic algorithm to scheduling problems in manufacturing processes, in: IEEE (1996), 523-528.
- Sawik (1995):
Sawik, T. J., Scheduling flexible flow lines with no in-process buffers, in: International Journal of Production Research, Vol. 33, 1995/5, 1357-1367.
- Schaffer (1989):
Schaffer, D., (Editor), Proceedings of the 3rd international conference on genetic algorithms, George Mason University, San Mateo, 1989.
- Schilling/Brandes (1985):
Schilling, W., Brandes, H., Rechnergestützte Pufferoptimierung unter komplexer Berücksichtigung der für Montagelinien typischen Einflußgrößen, in: Fertigungstechnik und Betrieb, Jg. 35, 1985/6, Berlin, 1985, 359-363.
- Schneeweiß (1981):
Schneeweiß, C., Modellierung industrieller Lagerhaltungssysteme, Berlin et al., 1981.

Schneeweiß (1991):

Schneeweiß, C., (Hrsg.), Kapazitätsplanung bei moderner Fließfertigung, Heidelberg, 1991.

Schöneburg/Heinzmann/Feddersen (1994):

Schöneburg, E., Heinzmann, F., Feddersen, S., Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien, Bonn et al., 1994.

Schrage (1982):

Schrage, L., The multiproduct lot scheduling problem, in: Dempster (1982), 233-244.

Schwefel/Männer (1991):

Schwefel, H. P., Männer, R., (Editors), Proceedings of the 1st Workshop on Parallel Problem Solving from Nature - PPSN I, Berlin et al., 1991.

Seelbach (1975):

Seelbach, H., Ablaufplanung, Würzburg - Wien, 1975.

Seront/Bersini (1992):

Seront, G., Bersini, H., In search of a good evolution-optimization crossover, in: Männer/Manderick (1992), 479-488.

Shanker/Tzen (1985):

Shanker, K., Tzen, Y.-J. J., A loading and dispatching problem in a random flexible manufacturing system, in: International Journal of Production Research, Vol. 23, 1985/3, 579-595.

Shiroma (1996):

Shiroma, P. J., Efficient production planning and scheduling, Wiesbaden, 1996.

Srikar/Ghosh (1986):

Srikar, B. N., Ghosh, S., A MILP model for the n-job, M-stage flowshop with sequence dependent set-up times, in: International Journal of Production Research, Vol. 24, 1986/6, 1459-1474.

Söhner (1991):

Söhner, V., Reihenfolgeplanung bei Fließbandfertigung, in: Schneeweiß (1991), 9-104.

Starkweather/Whitley/Cookson (1992):

Starkweather, T., Whitley, D., Cookson, B., A Genetic Algorithm for Scheduling with Resource Consumption, in: Fandel/Gulledge/Jones (1992), 567-583.

Starkweather et al. (1992):

Starkweather, T., Whitley, D., Mathias, K., McDaniel, S., Sequencing scheduling with genetic algorithms, in: Fandel/Gulledge/Jones (1992), 129-175.

Stefenelli (2000):

Stefenelli, M., Kostenorientierte Reihenfolgeplanung durch Verknüpfung von Prioritätsregeln mit lokalen Suchverfahren, Dissertation, Universität Passau, 2000.

Steffen (1977):

Steffen, R., Produktionsplanung bei Fließbandfertigung, Wiesbaden, 1977.

Steffen (1996):

Steffen, R., Ablaufplanung bei Massenfertigung, in: Kern/Schröder/Weber (1996), Spalten 26-34.

Stepan/Fischer (1998):

Stepan, A., Fischer, E. O., Betriebswirtschaftliche Optimierung – Einführung in die quantitative Betriebswirtschaftslehre, 6. Auflage, München - Wien, 1998.

Stöppler/Bierwirth (1992):

Stöppler, S., Bierwirth, C., The application of a parallel genetic algorithm to the n/m/P/C_{max} flowshop problem, in: Fandel/Gulledge/Jones (1992), 161-175.

Storer/Wu/Park (1992):

Storer, R. H., Wu, S. D., Park, J., Genetic Algorithms in Problem Space for Sequencing Problems, in: Fandel/Gulledge/Jones (1992), 584-597.

Strobel (1964):

Strobel, W., Simultane Losgrößenbestimmung bei stationären Modellen, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 34, 1964/4, 241-267.

Strunk (2001):

Strunk, B., Praxisbeispiel: Faurecia Sitztechnik GmbH & Co. KG, Werk Geiselhöring: Mit Quantensprüngen zur „Fabrik des Jahres 1999“, in: Burckhardt (2001), 225-259.

Sule (1982):

Sule, D. R., Sequencing n jobs on two machines with setup, proceeding and removal times separated, in: Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 29, 1982/3, 517-519.

Sule/Huang (1983):

Sule, D. R., Huang, K. Y., Sequency on two and three machines with setup, processing, and removal times separated, in: International Journal of Production Research, Vol. 21, 1983/5, 723-732.

Syswerda (1995):

Syswerda, G., Schedule Optimization Using Genetic Algorithms, in: Chambers (1995a), 332-349.

Tamaki et al. (1994):

Tamaki, H., Kita, H., Shimizu, N., Maekawa, K., Nishikawa, Y., A comparison study of genetic codings for the travelling salesman problem, in: IEEE (1994), 1-17.

Tang/Leung (1994):

Tang, A. Y-C., Leung, K.-S., A Modified Edge Recombination Operator for the Traveling Salesman Problem, in: Davidor/Schwefel/Männer (1994), 180-188.

Tempelmeier (1999):

Tempelmeier, H., Material-Logistik, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin et al., 1999.

Thomopoulos (1967):

Thomopoulos, N. T., Line balancing-sequencing for mixed-model assembly, in: Management Science, Vol. 14 – applications, 1967/2, B-59 – B-75.

Trigeiro/Thomas/McClain (1989):

Trigeiro, W. W., Thomas, L. J., McClain, J. O., Capacitated lot sizing with setup times, in: Management Science, Vol. 35, 1989/3, 353-366.

Troßman (1996):

Troßman, E., Ablaufplanung bei Einzel- und Serienfertigung, in: Kern/Schröder/Weber (1996), Spalten 11-26.

Tsutsui (1998):

Tsutsui, S., Multi-parent Recombination in Genetic Algorithms with Search Space Boundary Extension by Mirroring, in: Eiben (1998), 428-437.

Tsutsui/Ghosh (1998):

Tsutsui, S., Ghosh, A., A Study on the Effect of Multi-parent Recombination in Real Coded Genetic Algorithms, in: IEEE (1998), 828-833.

Ulder et al. (1991):

Ulder, N. L. J., Aarts, E. H. L., Bandelt, H. J., Van Laarhoven, P. J. M., Pesch, E., Genetic Local Search Algorithms for the Travelling Salesman Problem, in: Schwefel/Männer (1991), 109-116.

Van Wassenhove/Vanderhenst (1983):

Van Wassenhove, L. N., Vanderhenst, P., Planning production in bottleneck department, in: European Journal of Operational Research, Vol. 12, 1983, 127-137.

Völkel (1990):

Völkel, E., Pufferdimensionierung in Montagelinien, Dissertation, Technische Universität Karl-Marx-Stadt, 1990.

- Voigt et al. (1996):
Voigt, H.-M., Ebeling, W., Rechenberg, I., Schwefel, H.-P., (Editors), Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature - PPSN IV, Berlin, 1996.
- Vüllers/Fleer (2004):
Vüller, M., Fleer, M., (Wincor Nixdorf International GmbH), Oberflächenkonzept in getaktete Fließfertigung integrieren, in: Besser Lackieren, Heft 02/2004.
- Werners/Gabriel (1994):
Werners, B., Gabriel, R., (Hrsg.), Operations Research – Reflexionen aus Theorie und Praxis, Berlin et al., 1994.
- White/Wilson (1977):
White, C. H., Wilson, R. C., Sequence dependent set-up times and job sequencing, in: International Journal of Production Research, Vol. 15, 1977/2, 191-202.
- Whitley (1993):
Whitley, L. D., (Hrsg.), Foundations of genetic algorithms. 2, San Mateo, 1993.
- Whitley/Starkweather/Fuquay (1989):
Whitley, D., Starkweather, T., Fuquay, D., Scheduling problem and travelling salesman: The Genetic Edge Recombination Operator, in: Schaffer (1989), 133-140.
- Whitley/Starkweather/Shaner (1991):
Whitley, L. D., Starkweather, T., Shaner, D., The travelling salesman and sequence scheduling: quality solutions using genetic edge recombination, in: Davis (1991a), 350-372.
- Yamada/Reeves (1998):
Yamada, T., Reeves, C. R., Solving the Csum Permutation Flowshop Scheduling Problem by Genetic Local Search, in: IEEE (1998), 230-234.
- Yamamura/Ono/Kobayashi (1996):
Yamamura, M., Ono, I., Kobayashi, S., Emergent Search on double circle TSPs using subtour exchange crossover, in: IEEE (1996), 535-540.
- Young (1967):
Young, H. H., Optimization Models for Production Lines, in: Journal of Industrial Engineering, Vol. 18, 1967/1, 70-78.
- Zäpfel (1982):
Zäpfel, G., Produktionswirtschaft – Operatives Produktions-Management, Berlin - New York, 1982.
- Zäpfel (2001):
Zäpfel, G., Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagements, 2. unwesentlich veränderte Auflage, München – Wien, 2001.
- Zeile (1992):
Zeile, H., Zur Bestimmung der optimalen Losgröße, in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, Jg. 87, 1992/1, 38-42.
- Ziegler (1986):
Ziegler, H., Projektablaufplanung bei komplexer Ablaufstruktur, Dissertation, Universität – Gesamthochschule – Paderborn, 1986.
- Ziegler (1990):
Ziegler, H., Produktionssteuerung bei Mehrproduktfließlinien, Habilitationsschrift, Universität – Gesamthochschule – Paderborn, 1990.
- Zipkin (1991):
Zipkin, P. H., Computing optimal lot sizes in the economic lot scheduling problem, in: Operations Research, Vol. 39, 1991/1, 56-63.

Anhang

I Beispiel: Minimierung reihenfolgeabhängiger Umrüstzeiten versus Minimierung reihenfolgeabhängiger Umrüstkosten

In diesem Beispiel wird gezeigt, daß auch bei einem proportionalen Verhältnis der Umrüstkosten in einer jeden Station zu der zeitlichen Basis, das heißt der Umrüstzeit, in der betrachteten Station, bei unterschiedlichen Stationslohnsätzen zwischen der Summe der reihenfolgeabhängigen Umrüstkosten (Summe der Arbeitskosten der Umrüstungen über alle Stationen der betrachteten Fließlinie) und den zeitlichen Bezugsbasen (Summe der reihenfolgeabhängigen Umrüstzeiten über alle Stationen) zwar eine funktionale, nicht aber eine (streng) monotone Abhängigkeit und damit auch kein proportionales Verhältnis besteht, und daß somit die Zielsetzungen „Minimierung der Umrüstzeiten“ und Minimierung der Umrüstkosten“ zu unterschiedlichen Ablaufplänen führen können.

Betrachtet wird eine Fließlinie mit zwei Bearbeitungsstationen, $M=2$, in denen drei Produktarten gefertigt werden sollen, $I=4$, wobei die fiktive Produktart 0 den neutralen Maschinenzustand vor Einrüstung und nach Ausrüstung der Fließlinie beschreibt. Es wird angenommen, daß die Taktzeiten der betrachteten Produktarten gleich sind und das Fließband jeweils vor Beginn der Umrüstungen leer ist. In jeder Bearbeitungsstation kann eine bestimmte Menge an Verrichtungen, V^m , durchgeführt werden, von denen für jede Produktart i eine Teilmenge, A_i^m , ausgeführt werden muß. Für jede in Station m ausführbare Verrichtung v sind die zugehörigen Auf-, \hat{t}_v^m [ZE], und Abrüstzeiten, t_v^m [ZE], gegeben.

Gegeben sind die folgenden Mengen an Verrichtungen V^m : $V^1 = \{1,2,3\}$, $V^2 = \{4,5,6,7,8\}$, sowie die Verrichtungszuordnungen A_i^m für die 4 Produktarten:

i	$m=1$	$m=2$
0	-	-
1	1, 2	4, 5
2	2, 3	6, 7
3	3	5, 8

Beschreibt das Element v_v^+ die Aufrüstung auf die Verrichtung v und das Element v_v^- die Abrüstung von der Verrichtung v , dann ergeben sich für jeden möglichen paarweisen Produktartenwechsel die folgenden Mengen der Verrichtungsauf- und -abrüstungen in Station $m=1$:

i	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
0	-	$\{v_1^+, v_2^+\}$	$\{v_2^+, v_3^+\}$	$\{v_3^+\}$
1	$\{v_1^-, v_2^-\}$	-	$\{v_1^-, v_3^+\}$	$\{v_1^-, v_2^-, v_3^+\}$
2	$\{v_2^-, v_3^-\}$	$\{v_3^-, v_1^+\}$	-	$\{v_2^-\}$
3	$\{v_3^-\}$	$\{v_3^-, v_1^+, v_2^+\}$	$\{v_2^+\}$	-

Da die Anordnungspositionen für die Produktart 0 vorgegeben sind, bestehen sechs (3!) Möglichkeiten, die übrigen drei Produktarten anzuordnen. Die Menge $V_{(0,h,i,j,0)}^m$ beschreibt jeweils die Vereinigungsmenge der für die verschiedenen Anordnungen der Produktarten h , i , und j notwendigen Elemente v_v^+ und v_v^- in Station m . Da die einzelnen Elemente mehrfach vorkommen können, handelt es sich bei der Menge $V_{(0,h,i,j,0)}^m$ um eine Multimenge.¹ Für die sechs möglichen Reihenfolgen ergeben sich die folgenden Multimengen der notwendigen Verrichtungswechsel $V_{(0,h,i,j,0)}^m$ gemäß:

$$\begin{aligned}
V_{(0,1,2,3,0)}^1 &= \{v_1^+, v_2^+\} \cup \{v_1^-, v_3^+\} \cup \{v_2^-\} \cup \{v_3^-\} \\
V_{(0,1,3,2,0)}^1 &= \{v_1^+, v_2^+\} \cup \{v_1^-, v_2^-, v_3^+\} \cup \{v_2^+\} \cup \{v_2^-, v_3^-\} \\
V_{(0,2,1,3,0)}^1 &= \{v_2^+, v_3^+\} \cup \{v_3^-, v_1^+\} \cup \{v_1^-, v_2^-, v_3^+\} \cup \{v_3^-\} \\
V_{(0,2,3,1,0)}^1 &= \{v_2^+, v_3^+\} \cup \{v_2^-\} \cup \{v_3^-, v_1^+, v_2^+\} \cup \{v_1^-, v_2^-\} \\
V_{(0,3,1,2,0)}^1 &= \{v_3^+\} \cup \{v_3^-, v_1^+, v_2^+\} \cup \{v_1^-, v_3^+\} \cup \{v_2^-, v_3^-\} \\
V_{(0,3,2,1,0)}^1 &= \{v_3^+\} \cup \{v_2^+\} \cup \{v_3^-, v_1^+\} \cup \{v_1^-, v_2^-\}
\end{aligned}$$

Aus der Auflistung der einzelnen Elemente läßt sich leicht erkennen, daß die Multimenge der notwendigen Verrichtungswechsel für jede Reihenfolge identisch mit der entsprechenden Multimenge ihrer Spiegelsequenz ist, d.h.:

$$\begin{aligned}
V_{(0,1,2,3,0)}^1 &= V_{(0,3,2,1,0)}^1 \\
V_{(0,1,3,2,0)}^1 &= V_{(0,2,3,1,0)}^1 \\
V_{(0,2,1,3,0)}^1 &= V_{(0,3,1,2,0)}^1
\end{aligned}$$

Diese Eigenschaft ist unabhängig davon gegeben, ob die zu Grunde liegenden Auf- und Ab- rüstzeiten der Verrichtungen symmetrisch oder asymmetrisch sind.

¹ Multimengen können ein bestimmtes Element mehrfach enthalten. Siehe ausführliche Erläuterung in Abschnitt 4.4.3.1 dieser Arbeit.

In Station $m=2$ ergeben sich für jeden möglichen paarweisen Produktartenwechsel die folgenden Elemente der Verrichtungsauf- und -abrüstungen:

i	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
0	-	$\{v_4^+, v_5^+\}$	$\{v_6^+, v_7^+\}$	$\{v_5^+, v_8^+\}$
1	$\{v_4^-, v_5^-\}$	-	$\{v_4^-, v_5^-, v_6^+, v_7^+\}$	$\{v_4^-, v_8^+\}$
2	$\{v_6^-, v_7^-\}$	$\{v_6^-, v_7^-, v_4^+, v_5^+\}$	-	$\{v_6^-, v_7^-, v_5^+, v_8^+\}$
3	$\{v_5^-, v_8^-\}$	$\{v_8^-, v_4^+\}$	$\{v_5^-, v_8^-, v_6^+, v_7^+\}$	-

Hieraus ergeben sich folgende Multimengen $V_{(0,h,i,j,0)}^m$:

$$V_{(0,1,2,3,0)}^2 = \{v_4^+, v_5^+\} \cup \{v_4^-, v_5^-, v_6^+, v_7^+\} \cup \{v_6^-, v_7^-, v_5^+, v_8^+\} \cup \{v_5^-, v_8^-\}$$

$$V_{(0,1,3,2,0)}^2 = \{v_4^+, v_5^+\} \cup \{v_4^-, v_8^+\} \cup \{v_5^-, v_8^-, v_6^+, v_7^+\} \cup \{v_6^-, v_7^-\}$$

$$V_{(0,2,1,3,0)}^2 = \{v_6^+, v_7^+\} \cup \{v_6^-, v_7^-, v_4^+, v_5^+\} \cup \{v_4^-, v_8^+\} \cup \{v_5^-, v_8^-\}$$

Da sich die Mengen der notwendigen Verrichtungswechsel nur jeweils in bestimmten Elementen unterscheiden, müssen auch nur diese zur Bestimmung der die Umrüstungszeit optimierenden Reihenfolge betrachtet werden (in folgender Tabelle *kursiv* markiert).

m	v	\hat{t}_v^m	t_v^m
1	1	2	4
	2	3	5
	3	5	6
2	4	7	5
	5	8	6
	6	5	7
	7	4	3
	8	6	4

Die relativ zu den anderen Reihenfolgen jeweils *zusätzlich* zu berücksichtigenden Umrüstzeiten ergeben sich demnach wie folgt:

Reihenfolge	$m=1$	$m=2$
0,1,2,3,0	-	8+6
0,1,3,2,0	3+5	-
0,2,1,3,0	5+6	-

Zeitorientierung:

Wird unter den in diesem Beispiel getroffenen Annahmen die Zielsetzung „Minimierung der Umrüstzeiten“ verfolgt, sind die Reihenfolgen (0,1,3,2,0) und die zugehörige Spiegelreihenfolge (0,2,3,1,0) optimal.

Kostenorientierung

Für die Berechnung der Umrüstkosten werden die folgenden Stationslohnsätze k_w^m in den Stationen $m=1$ bzw. $m=2$ angenommen: $k_w^1 = 10$, $k_w^2 = 5$.

Werden die relativ zu den anderen Reihenfolgen jeweils *zusätzlich* zu berücksichtigenden Umrüstzeiten mit den Stationslohnsätzen bewertet, dann berechnen sich die relativ zu den anderen Reihenfolgen jeweils *zusätzlich* zu berücksichtigenden Umrüstkosten wie folgt:

Reihenfolge	$m=1$	$m=2$
0,1,2,3,0	-	$5 \cdot (8+6) = 70$
0,1,3,2,0	$10 \cdot (3+5) = 80$	-
0,2,1,3,0	$10 \cdot (5+6) = 110$	-

Wird unter den in diesem Beispiel getroffenen Annahmen die Zielsetzung „Minimierung der Umrüstkosten“ verfolgt, sind die Reihenfolgen (0,1,2,3,0) und die zugehörige Spiegelreihenfolge (0,3,2,1,0) optimal.

Fazit

Die Zielsetzungen „Minimierung der Umrüstzeiten“ und „Minimierung der Umrüstkosten“ führen bei den getroffenen Annahmen zu unterschiedlichen Ablaufplänen, q.e.d.

Ergänzend sind im folgenden die vollständigen Umrüstzeiten und -kosten für das obige Beispiel angegeben. Aus den Verrichtungsmengen je Station und Produktart und den Auf- und Abrüstzeiten der Verrichtungen werden die *Umrüstzeiten* für jeden möglichen paarweisen Produktartenwechsel von der Produktart i auf die Produktart j ermittelt:

i	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
0	-	m=1: 2+3= 5 m=2: 7+8= 15 Summe: 20	m=1: 3+5= 8 m=2: 5+4= 9 Summe: 17	m=1: 5 m=2: 8+6=14 Summe: 19
1	m=1: 4+5= 9 m=2: 5+6= 11 Summe: 20	-	m=1: 4+5= 9 m=2: 5+6+5+4= 20 Summe: 29	m=1: 4+5+5= 14 m=2: 5+6= 11 Summe: 25
2	m=1: 5+6= 11 m=2: 7+3= 10 Summe: 21	m=1: 6+2= 8 m=2: 7+3+7+8= 25 Summe: 33	-	m=1: 5 m=2: 7+3+8+6=24 Summe: 29
3	m=1: 6 m=2: 6+4= 10 Summe: 16	m=1: 6+2+3= 11 m=2: 4+7=11 Summe: 22	m=1: 3 m=2: 6+4+5+4=19 Summe: 22	-

Aus der Bewertung der Umrüstzeiten mit den Stationslohnsätzen werden die *Umrüstkosten*, für jeden möglichen paarweisen Produktartenwechsel von der Produktart i auf die Produktart j berechnet:

i	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
0	-	m=1: 10*5 m=2: 5*15 Summe: 125	m=1: 10*8 m=2: 5*9 Summe: 125	m=1: 10*5 m=2: 5*14 Summe: 120
1	m=1: 10*9 m=2: 5*11 Summe: 145	-	m=1: 10*9 m=2: 5*20 Summe: 190	m=1: 10*14 m=2: 5*11 Summe: 195
2	m=1: 10*11 m=2: 5*10 Summe: 160	m=1: 10*8 m=2: 5*25 Summe: 205	-	m=1: 10*5 m=2: 5*24 Summe: 170
3	m=1: 10*6 m=2: 5*10 Summe: 110	m=1: 10*11 m=2: 5*11 Summe: 165	m=1: 10*3 m=2: 5*19 Summe: 125	-

Für die möglichen Produktanordnungen ergibt sich hieraus:

(0,1,2,3,0):

Summe der Umrüstzeiten: $20+29+29+16 = 94$

Summe der Umrüstkosten: $125+190+170+110 = 595$

(0,1,3,2,0):

Summe der Umrüstzeiten: $20+25+22+21 = 88$

Summe der Umrüstkosten: $125+195+125+160 = 605$

(0,2,3,1,0):

Summe der Umrüstzeiten: $17+29+22+20 = 88$

Summe der Umrüstkosten: $125+170+165+145 = 605$

(0,2,1,3,0):

Summe der Umrüstzeiten: $17+33+25+16 = 91$

Summe der Umrüstkosten: $125+205+195+110 = 635$

(0,3,1,2,0):

Summe der Umrüstzeiten: $19+22+29+21 = 91$

Summe der Umrüstkosten: $120+165+190+160 = 635$

(0,3,2,1,0):

Summe der Umrüstzeiten: $19+22+33+20 = 94$

Summe der Umrüstkosten: $120+125+205+145 = 595$.

II Modifikation der Restriktionen vom Typ (3.10) beim VLSPS bzw. vom Typ (3.21) beim VLSPA

Für die in Abschnitt 2.3.1.3.2 b beschriebene Produktionssituation des kontinuierlichen Transports ohne Bandleerlauf und starren relativen räumlichen Stationsgrenzen müssen die Restriktionen vom Typ (3.10) beim VLSPS bzw. vom Typ (3.21) beim VLSPA modifiziert werden, da der Fertigstellungszeitpunkt F_e des auf e positionierten Produktloses nicht nur sicherstellen muß, dass sowohl die Bearbeitung des vorangehenden als auch die Umrüstung von dem vorangehenden Produktlos abgeschlossen sein müssen, sondern für den Fall, dass auf das auf e positionierte Produktlos eine Produktart mit größerem Auflegeintervall folgt, $c_{i(E_{e+1})} > c_{i(E_e)}$, die Reduzierung der Bandgeschwindigkeit entsprechend des größeren Auflegeintervalls der nachfolgenden Produktart die Bearbeitung derjenigen Produkteinheiten des auf e positionierten Produktloses verzögert, welche zu dem Zeitpunkt des Bandgeschwindigkeitswechsels noch in Bearbeitung sind. Für den Fall, dass ein Wechsel von einer Produktart mit größerem auf eine Produktart mit kleinerem Auflegeintervall erfolgt, muß im Rahmen der Kapazitätsrestriktionen keine zusätzliche Beeinträchtigung der Bearbeitungszeit berücksichtigt werden, da die Beeinträchtigung der Bearbeitungszeit der ersten Einheit der nachfolgenden Produktart bereits über die Loswechselzeit erfaßt wird und jede weitere Einheit relativ zu der ersten Produkteinheit aufgrund der dann bereits erfolgten Erhöhung der Bandgeschwindigkeit das Band mit dem Takt ihres Auflegeintervalls verläßt.

Zur Formulierung entsprechender Restriktionen wird das Symbol m_{ij}^* eingeführt:

m_{ij}^* Station m^* bei einem Loswechsel von der Produktart i auf die Produktart j in der Produktionssituation des kontinuierlichen Transports ohne Bandleerlauf bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen, sofern m_{ij}^* existiert, [-]

Da bei starren relativen räumlichen Stationsgrenzen die für das Durchlaufen einer jeden Station benötigte Zeit genau einem Auflegeintervall der betrachteten Produktart entspricht, berechnet sich die zusätzlich zu berücksichtigende Bearbeitungszeit hier als Produkt aus Taktzeitdifferenz ($c_{i(E_{e+1})} - c_{i(E_e)}$) und Stationendifferenz ($M - m_{i(E_e);i(E_{e+1})}^*$).

Existiert kein $m_{i(E_e);i(E_{e+1})}^*$ für die in Abschnitt 2.3.1.3.2 b beschriebene Produktionssituation, erfolgt die Formulierung der Kapazitätsrestriktionen wie in (3.10) bzw. in (3.21). Da auch für alle anderen in Kapitel 2 beschriebenen Produktionssituationen $m_{i(E_e);i(E_{e+1})}^*$ nicht existiert, können die Kapazitätsrestriktionen vom Typ (3.10) allgemein wie folgt umformuliert werden:

$$F_e \geq \begin{cases} F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{ext} - 1\right) \cdot c_{i(E_e)} + \left(M - m_{i(E_e)i(E_{e+1})}^*\right) \cdot \max\left\{0, \left(c_{i(E_{e+1})} - c_{i(E_e)}\right)\right\} \\ \qquad \qquad \qquad m_{i(E_e)i(E_{e+1})}^* \text{ existiert} \quad , \\ F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{ext} - 1\right) \cdot c_{i(E_e)}, \qquad \qquad m_{i(E_e)i(E_{e+1})}^* \text{ existiert nicht} \end{cases}$$

$$e = 2(1)E - 1 \tag{3.10.1}$$

$$F_E \geq F_{E-1} + t_{i(E_{E-1})i(E_E)} \tag{3.10.2}$$

Analog zu (3.10) können die Kapazitätsrestriktionen vom Typ (3.21) allgemein wie folgt umformuliert werden

$$F_e \geq \begin{cases} F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{E_e} - 1\right) \cdot c_{i(E_e)} + \left(M - m_{i(E_e)i(E_{e+1})}^*\right) \cdot \max\left\{0, \left(c_{i(E_{e+1})} - c_{i(E_e)}\right)\right\} \\ \qquad \qquad \qquad m_{i(E_e)i(E_{e+1})}^* \text{ existiert} \quad , \\ F_{e-1} + t_{i(E_{e-1})i(E_e)} + \left(x_{E_e}^{E_e} - 1\right) \cdot c_{i(E_e)}, \qquad \qquad m_{i(E_e)i(E_{e+1})}^* \text{ existiert nicht} \end{cases}$$

$$e = 2(1)E - 1 \tag{3.21.1}$$

$$F_E \geq F_{E-1} + t_{i(E_{E-1})i(E_E)} \tag{3.21.2}$$