

Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Material- bedarfsplanung von Fertigungssystemen

Dissertation
zur Erlangung der Würde eines
DOKTORS DER WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN
(Dr. rer. pol.)
der Universität Paderborn

vorgelegt von
Dipl.-Wirt.-Inf. Thorsten Timm
33330 Gütersloh

Paderborn, November 2008

Dekan: Prof. Dr. Peter F. E. Sloane
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier
Korreferentin: Prof. Dr. Leena Suhl

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Abbildungsverzeichnis..... | v |
| Tabellenverzeichnis..... | vii |
| Abkürzungs- und Symbolverzeichnis..... | ix |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Problemstellung..... | 5 |
| 2.1 Problemdefinition..... | 5 |
| 2.1.1 Produktion..... | 5 |
| 2.1.2 Fertigung..... | 8 |
| 2.1.3 Fertigungssystem..... | 9 |
| 2.1.4 Planungsaufgaben in Fertigungssystemen..... | 9 |
| 2.1.5 Fertigungsplanungs-Verfahren..... | 12 |
| 2.1.6 Modell..... | 12 |
| 2.1.7 Ableitung der Problemdefinition..... | 15 |
| 2.2 Bildung von Partialmodellen..... | 15 |
| 2.2.1 Ableitung der Fertigungsplanungs-Teilaufgaben..... | 17 |
| 2.2.2 Aggregation zu Partialmodellen..... | 19 |
| 2.2.3 Hierarchische Darstellung der Partialmodelle..... | 23 |
| 3 Stand der Technik..... | 27 |
| 3.1 Hierarchische Planung von Fertigungssystemen..... | 27 |
| 3.1.1 Hierarchische Planung..... | 28 |
| 3.1.2 Grundlegende Arbeiten zur hierarchischen Planung..... | 29 |
| 3.1.3 Vorarbeiten im Bereich der hierarchischen Planung von Fertigungssystemen.... | 33 |
| 3.2 Mathematische Losgrößenprobleme..... | 44 |
| 3.2.1 Capacitated Lot Sizing Problem..... | 46 |
| 3.2.2 Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem..... | 47 |
| 4 Zu leistende Arbeit..... | 51 |
| 4.1 Einordnung in APS Systeme..... | 51 |
| 4.2 Koordinationsprozesse..... | 52 |
| 4.3 Nutzung von mathematischen Losgrößenproblemen..... | 52 |
| 4.4 Berücksichtigung der Unsicherheit..... | 53 |
| 5 Konzeption..... | 55 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Definition von Planungsmodellen..... | 56 |
| 5.1.1 | Systembeschreibung..... | 56 |
| 5.1.2 | Partialmodelle des übergeordneten Zeitmodells..... | 67 |
| 5.1.3 | Partialmodelle des untergeordneten Zeitmodells..... | 81 |
| 5.2 | Definition von Koordinationsprozessen..... | 91 |
| 5.2.1 | Planungsbeginn auf Ebene des übergeordneten Zeitmodells..... | 92 |
| 5.2.2 | Planungsbeginn auf der Ebene des untergeordneten Zeitmodells..... | 95 |
| 6 | Validierung..... | 99 |
| 6.1 | Anwendungsszenario..... | 99 |
| 6.2 | Datenbasis..... | 101 |
| 6.2.1 | Zeitmodell und Szenariobaum..... | 101 |
| 6.2.2 | Erzeugnisse..... | 103 |
| 6.2.3 | Werkzeuge..... | 104 |
| 6.2.4 | Technologien..... | 105 |
| 6.2.5 | Qualifikationen..... | 106 |
| 6.2.6 | Mitarbeiter..... | 106 |
| 6.2.7 | Prozessalternativen..... | 107 |
| 6.2.8 | Weitere Daten..... | 107 |
| 6.3 | Anwendung des Verfahrens und Ergebnisse..... | 107 |
| 6.3.1 | Genutzte Hard- und Softwaresysteme..... | 107 |
| 6.3.2 | Umsetzung der Modelle..... | 108 |
| 6.3.3 | Ergebnisse..... | 118 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 123 |
| 7.1 | Ergebnis der Arbeit..... | 123 |
| 7.2 | Ausblick..... | 124 |
| | Literaturverzeichnis..... | 127 |
| | Anhang A: Datenbasis der Validierung im GNU MathProg Format..... | 135 |
| | A.1 Partialmodell I..... | 135 |
| | A.2 Partialmodell II..... | 141 |
| | A.3 Partialmodell III..... | 149 |
| | A.4 Partialmodell IV..... | 158 |
| | Anhang B: Ausgaben der Optimierung..... | 167 |
| | B.1: Ausgaben Optimierung Partialmodell I..... | 167 |
| | B.2: Ausgaben Optimierung Partialmodell II..... | 167 |
| | B.3: Ausgaben Optimierung Partialmodell III..... | 168 |
| | B.4: Ausgaben Optimierung Partialmodell IV..... | 169 |
| | Anhang C: Ergebnisse der Optimierung..... | 171 |
| | C.1: Ergebnisse Optimierung Partialmodell I..... | 171 |
| | C.2: Ergebnisse Optimierung Partialmodell II..... | 174 |

| | |
|--|-----|
| C.3: Ergebnisse Optimierung Partialmodell III..... | 174 |
| C.4: Ergebnisse Optimierung Partialmodell IV..... | 174 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildung 2.1: Produktion als Input-/Output-Prozess..... | 5 |
| Abbildung 2.2: Klassifikation von Produktionsfaktoren nach Gutenberg..... | 6 |
| Abbildung 2.3: Zielkonflikt der Modellierung..... | 13 |
| Abbildung 2.4: Vorgehensweise der Planung mit mathematischen Modellen..... | 14 |
| Abbildung 2.5: Abhängigkeiten der Planungsaufgaben auf der ersten Planungsebene..... | 22 |
| Abbildung 2.6: Abhängigkeiten der Planungsaufgaben auf der zweiten Planungsebene..... | 23 |
| Abbildung 2.7: Hierarchische Darstellung der Partialmodelle..... | 25 |
| Abbildung 3.1: Dynamische Programmierung als hierarchische Planung..... | 31 |
| Abbildung 3.2: Allgemeines Schema hierarchischer Planung nach Schneeweiß..... | 32 |
| Abbildung 3.3: Formale Darstellung hierarchischer Planung..... | 33 |
| Abbildung 3.4: Varianten hierarchischer Strukturen..... | 36 |
| Abbildung 3.5: Hierarchische Planung bei der Variantenfließfertigung..... | 37 |
| Abbildung 3.6: Modularer Aufbau von APS Systemen..... | 38 |
| Abbildung 3.7: Hierarchisches Modell von APS Systemen nach Betge..... | 41 |
| Abbildung 3.8: Applikationskomponenten von SAP APO und Integration mit SAP ERP..... | 42 |
| Abbildung 3.9: SAP APO Struktur als Teil der generischen Struktur von APS Systemen..... | 43 |
| Abbildung 4.1: Einordnung der Problemstellung in die Module von APS Systemen..... | 51 |
| Abbildung 5.1: Fertigungsprozess als Technologie..... | 62 |
| Abbildung 5.2: Szenarien in verschiedenen Zeitmodellen..... | 66 |
| Abbildung 5.3: Ergebnisse des ersten Partialmodells..... | 68 |
| Abbildung 5.4: Ergebnisse des zweiten Partialmodells..... | 73 |
| Abbildung 5.5: Ergebnisse des dritten Partialmodells..... | 81 |
| Abbildung 5.6: Beispiel für Wiederbeschaffungszeit und Produktdistanz..... | 85 |
| Abbildung 5.7: Ergebnisse des vierten Partialmodells..... | 87 |
| Abbildung 5.8: Koordinationsprozess bei Planungsbeginn mit Partialmodell I..... | 93 |
| Abbildung 5.9: Koordinationsprozess bei Planungsbeginn mit Partialmodell III..... | 96 |
| Abbildung 6.1: Struktur der Produktion (Ist-Zustand)..... | 100 |
| Abbildung 6.2: Zuordnung der Szenarien zu Perioden..... | 102 |
| Abbildung 6.3: Mengendefinitionen für Partialmodell I..... | 109 |
| Abbildung 6.4: Parameterdefinitionen für Partialmodell I..... | 109 |
| Abbildung 6.5: Variablendefinitionen für Partialmodell I..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 6.6: Zielfunktion Partialmodell I..... | 110 |
| Abbildung 6.7: Restriktionen Partialmodell I..... | 110 |
| Abbildung 6.8: Mengendefinitionen für Partialmodell II..... | 111 |
| Abbildung 6.9: Parameterdefinitionen für Partialmodell II..... | 111 |
| Abbildung 6.10: Variablendefinitionen für Partialmodell II..... | 112 |
| Abbildung 6.11: Zielfunktion Partialmodell II..... | 112 |
| Abbildung 6.12: Restriktionen Partialmodell II..... | 113 |
| Abbildung 6.13: Mengendefinitionen für Partialmodell III..... | 114 |
| Abbildung 6.14: Parameterdefinitionen für Partialmodell III..... | 114 |
| Abbildung 6.15: Variablendefinitionen für Partialmodell III..... | 115 |
| Abbildung 6.16: Zielfunktion Partialmodell III..... | 115 |
| Abbildung 6.17: Restriktionen Partialmodell III..... | 115 |
| Abbildung 6.18: Mengendefinitionen für Partialmodell IV..... | 116 |
| Abbildung 6.19: Parameterdefinitionen für Partialmodell IV..... | 116 |
| Abbildung 6.20: Variablendefinitionen für Partialmodell IV..... | 116 |
| Abbildung 6.21: Zielfunktion Partialmodell IV..... | 117 |
| Abbildung 6.22: Restriktionen Partialmodell IV..... | 117 |
| Abbildung 6.23: Struktur der Produktion (Soll-Zustand)..... | 119 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 2.1: Eigenschaften der Hierarchieebenen des Planungsmodells..... | 20 |
| Tabelle 3.1: Abbildung von generischen Modulen und Applikationskomponenten..... | 44 |
| Tabelle 6.1: Erzeugnisse und Zuordnung der Indizes..... | 103 |
| Tabelle 6.2: Technologien und Zuordnung der Indizes..... | 105 |
| Tabelle 6.3: Übersicht über die Mitarbeiterbestands- und -qualifikationsplanung..... | 120 |

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

| | |
|-----------------|--|
| A_{ij}^W | Auslastung des Werkzeugs i in Szenario j |
| $A^{W_{max}}$ | Auslastung eines Werkzeugs, ab dem für Teile, die darauf gefertigt werden, ein Bestellzyklus definiert werden muss |
| b_i^B | Binärvariable, die angibt, ob für Erzeugnis i Bedarfe vorliegen |
| b_i^{BZ} | Binärvariable, die angibt, ob für Erzeugnis i das Bestellzyklusverfahren genutzt wird |
| b_{ij}^K | Binärvariable, die angibt, ob Erzeugnis i in Periode j ein Kaufteil ist |
| b_i^{LS} | Binärvariable, die angibt, ob für Erzeugnis i eine Lagerstufe definiert ist |
| b_{ij}^{LT} | Binärvariable, die angibt, ob Erzeugnis i in Szenario j zeitgerecht geliefert wird |
| b_{ij}^M | Binärvariable, die angibt, ob Mitarbeiter i in Periode j zur Verfügung steht |
| b_i^{M0} | Binärvariable, die angibt, ob Mitarbeiter i derzeit beschäftigt wird |
| b_{ij}^{MB} | Binärvariable, die angibt, ob für Erzeugnis i in Szenario j der Meldebestand unterschritten wird |
| b_{ij}^{MBN} | Binärvariable, die angibt, ob für Erzeugnis i in Szenario j der Meldebestand neu unterschritten wird (d. h. im vorherigen Szenario ist der Meldebestand noch nicht unterschritten) |
| b_{ij}^{ME} | Binärvariable, die angibt, ob Mitarbeiter i in Periode j neu eingestellt wird |
| b_{ijk}^{MQ} | Binärvariable, die angibt, ob Mitarbeiter i in Periode k Qualifikation j besitzt |
| b_{ij}^{MQ0} | Binärvariable, die angibt, ob Mitarbeiter i derzeit Qualifikation j besitzt |
| b_{ijk}^{MQN} | Binärvariable, die angibt, ob Mitarbeiter i in Periode k Qualifikation j neu lernt |
| b_{ij}^{MR} | Binärvariable, die angibt, ob Mitarbeiter i in Periode j freigestellt wird |
| b_{ij}^P | Binärvariable, die angibt, ob Prozessalternative i die Nutzung von Technologie j zulässt |

| | |
|--------------------|---|
| b_{ij}^{PE} | Binärvariable, die angibt, ob Erzeugnis i in Periode j produziert wird |
| b_{ij}^{PN} | Binärvariable, die angibt, ob Prozessalternative i in Periode j genutzt wird |
| b_i^{PN0} | Binärvariable, die angibt, ob Prozessalternative i im Ausgangsszenario genutzt wird |
| b_i^{PNA} | Binärvariable, die die Änderung der Prozessalternativenutzung in Periode i signalisiert |
| b_{ijk}^{RT} | Binäre Rüstvariable, die angibt, ob Werkzeug j in Szenario k zur Durchführung von Technologie i gerüstet wird |
| b_{ij}^W | Binärvariable, die angibt, ob Werkzeug i in Periode j verfügbar ist |
| b_i^{WO} | Binärvariable, die angibt, ob Werkzeug i im Ausgangsszenario vorhanden ist |
| b_{ij}^{WN} | Binärvariable, die angibt, ob Werkzeug i in Periode j neu angeschafft wird |
| c_i^F | Fixkosten, die in jedem Szenario anfallen, in dem Werkzeug i verfügbar ist |
| c_i^K | Kaufpreis je Einheit von Erzeugnis i |
| c_i^L | Lagerkostensatz je Mengeneinheit Bestand von Erzeugnis i am Ende einer Periode |
| c_i^M | Grundgehalt von Mitarbeiter i je Periode |
| c^{ME} | Kosten für die Einstellung eines Mitarbeiters |
| c^{MR} | Kosten für die Freistellung eines Mitarbeiters |
| c_i^N | Neuanschaffungskosten für Werkzeug i |
| c_i^P | Produktionskostensatz für eine Zeiteinheit auf Werkzeug i |
| $c_{ij}^{P_{var}}$ | Variabler Produktionskostensatz eine Mengeneinheit von Erzeugnis i in Periode j |
| $c_{ij}^{P_{fix}}$ | Fixer Produktionskostensatz für Produktion von Erzeugnis i in Periode j |
| c_i^Q | Kosten für die Weiterbildung eines Mitarbeiters, um Qualifikation i zu erlernen |
| c^{PNA} | Kosten für die Änderung der Prozessalternativenutzung |
| c_i^R | Rüstkostensatz für eine Zeiteinheit auf Werkzeug i |
| c_i^U | Kosten für eine Zeiteinheit Überstunden von Mitarbeiter i |
| c_i^V | Verzugkostensatz je Mengeneinheit Lieferrückstand von Erzeugnis i am Ende einer Periode |
| c^Z | Kalkulatorischer Zinsfuß der Unternehmung je Periode in den Modellen der taktischen Planung |

| | |
|------------------|--|
| g_{ijk} | direkter Verbrauch von Erzeugnis i zur Produktion einer Einheit von Erzeugnis j in Periode k ; „Gozinto-Faktor“ |
| KB^d | Durchschnittliche Kapitalbindungskosten über alle Perioden bis zum Planungshorizont |
| $KB^{d,max}$ | Maximal zulässige durchschnittliche Kapitalbindungskosten |
| KB^m | Maximale Kapitalbindungskosten einer Periode |
| $KB^{m,max}$ | Maximal zulässige maximale Kapitalbindungskosten |
| K^o | Kennzahl, die die auftretenden Kosten in den Modellen der operativen Planung beschreibt (Summe bis zum Planungshorizont) |
| $K^{o,max}$ | Kostengrenze für die Modelle der operativen Planung, d. h. Obergrenze für K^o |
| K^t | Kennzahl, die die auftretenden Kosten in den Modellen der taktischen Planung beschreibt (Summe bis zum Planungshorizont) |
| $K^{t,1}$ | Entspricht K^t bei Nutzung des Produktionsprogramms des Modells für die Auswahl von Produktionsprozessen und Planung des Maschinenbestands |
| $K^{t,2}$ | Entspricht K^t bei Nutzung des Produktionsprogramms des Modells für die Mitarbeiterplanung |
| $K^{t,max}$ | Kostengrenze für die Modelle der taktischen Planung, d. h. Obergrenze für K^t |
| $KB^{d,max}$ | Obergrenze für die durchschnittlichen Kapitalbindungskosten |
| $KB^{m,max}$ | Obergrenze für die maximalen Kapitalbindungskosten |
| M | hinreichend große Zahl; „big-M“ |
| n_{ij}^B | Primärbedarf an Erzeugnis i in Szenario j |
| n^E | Anzahl der Erzeugnisse |
| n_{ij}^{ges} | Kumulierte Gesamtnachfrage nach Erzeugnis i in Szenario j |
| n_{ij}^{LT} | Kumulierte Gesamtnachfrage nach Erzeugnis i in Szenario j , wobei nur die angestrebte minimale Liefertreue eingehalten wird |
| n^M | Anzahl der Mitarbeiter |
| n^P | Anzahl der betrachteten Perioden (Planungshorizont) (ohne die initiale Periode mit dem Index 0) |
| n^{PA} | Anzahl der Prozessalternativen |
| n^Q | Anzahl der Qualifikationen |
| $n_i^{RT_{max}}$ | Maximale Anzahl Rüstvorgänge für Durchführung von Technologie i je Periode |
| n^S | Anzahl der betrachteten Szenarien (ohne das Wurzelszenario mit dem Index 0) |
| n^T | Anzahl der Technologien |

| | |
|---------------|--|
| n_{ij}^{TB} | Benötigter Input an Erzeugnis i bei Durchführung einer Einheit von Technologie j |
| n_{ij}^{TE} | Output an Erzeugnis i bei Durchführung einer Einheit von Technologie j |
| $n^{U_{max}}$ | Maximale Anzahl Überstunden je Mitarbeiter und Periode |
| n^W | Anzahl der Werkzeuge |
| n^{ZM} | Anzahl Zeitabschnitte des untergeordneten Zeitmodells je Zeitabschnitt des übergeordneten Zeitmodells |
| o | Kennzeichen für Variablen (hochgestellt) in den Modelle des untergeordneten Zeitmodells (nur verwendet, wenn das Zeitmodell nicht aus dem Kontext hervorgeht) |
| p^{min} | Angestrebte minimale Liefertreue |
| t | Kennzeichen für Variablen (hochgestellt) in den Modelle des übergeordneten Zeitmodells (nur verwendet, wenn das Zeitmodell nicht aus dem Kontext hervorgeht) |
| $T^{B,o}$ | Dauer des im Zeitmodell der operativen Planung zugrunde gelegten Zeitabschnittes |
| $T^{B,t}$ | Dauer des im Zeitmodell der taktischen Planung zugrunde gelegten Zeitabschnittes |
| t^{BZ} | Bestellzyklus im Bestellpunktverfahren, wird für alle Produkte als identisch angesehen |
| t_{ij}^{DL} | Minimale Durchlaufzeit für die Fertigung von Erzeugnis i in Periode j |
| t_i^K | Wiederbeschaffungszeit für Erzeugnis i , wenn es ein Kaufteil ist |
| t_{ij}^{KW} | Kapazität von Werkzeug i in Periode j in Zeiteinheiten |
| t_i^L | Zeitaufwand, um Qualifikation i zu erlernen |
| $t^{L_{max}}$ | Angestrebte maximale Lieferzeit |
| t_{ij}^M | Zur Verfügung stehende Grundarbeitszeit von Mitarbeiter i in Szenario j |
| $T^{NP,t}$ | Dauer des Intervalls für die regelmäßige Neuplanung beginnend auf der taktischen Ebene |
| $T^{NP,o}$ | Dauer des Intervalls für die regelmäßige Neuplanung beginnend auf der operativen Ebene |
| t_{ij}^{PD} | Maximale Produktdistanz für Erzeugnis i in Periode j |
| t_{ij}^{RT} | Dauer für das Rüsten von Werkzeug j zur Durchführung von Technologie i |
| t_{ij}^{RW} | Zeitliche Reichweite, die als maximale Wiederbeschaffungszeit unter Beachtung des Bestellpunkt- oder Bestellzyklusverfahrens für Erzeugnis i in Periode j überbrückt werden muss |

| | |
|---|--|
| t_i^T | Maximale Transportzeit für Erzeugnis i zum Bedarfsort |
| t_{ij}^{TQ} | Benötigte Einsatzdauer eines Mitarbeiters mit Qualifikation j zur Durchführung einer Einheit von Technologie i |
| t_{ij}^{TW} | Bearbeitungszeit an Werkzeug j für die Durchführung einer Einheit von Technologie i |
| t_{ij}^{WB} | Wiederbeschaffungszeit von Erzeugnis i in Periode j |
| t_{ij}^{WBL} | Wiederbeschaffungszeit von Erzeugnis i in Periode j oder 0, wenn eine Lagerstufe für das Erzeugnis definiert ist |
| x_{ij}^K | Einkaufsmenge für Erzeugnis i in Szenario j |
| x_{ij}^L | Bestand bzw. Lieferrückstand für Erzeugnis i am Ende von Szenario j |
| x_i^{LO} | Bestand für Erzeugnis i im Ausgangsszenario |
| x_i^{LG} | Losgröße für Erzeugnis i |
| x_i^{MB} | Meldebestand für das verbrauchsorientiert disponierte Erzeugnis i |
| x_{ij}^P | Produktionsmenge von Erzeugnis i in Szenario j |
| x_{ijk}^{QM} | Dauer, die Mitarbeiter j mit der Anwendung von Qualifikation i in Szenario k aufwendet |
| x_{ij}^T | Anzahl durchgeführte Einheiten von Technologie i in Szenario j |
| x_{ij}^U | Überstunden, die Mitarbeiter i in Szenario j macht |
| $\theta: \{0 \dots n^{P,o}\} \rightarrow \{0 \dots n^{P,t}\}$ | Funktion, die jede Periode im Zeitmodell der operativen Planung auf eine Periode im Zeitmodell der taktischen Planung abbildet |
| $\nu: \{0 \dots n^S\} \rightarrow \{0 \dots n^S\} \cup \emptyset$ | Funktion, die allen Szenarien, die kein Blatt des Szenariobaums sind, ein Nachfolgeszenario zuordnet |
| $\pi: \{0 \dots n^S\} \rightarrow \{0 \dots n^P\}$ | Funktion, die jedem Szenario eine Periode zuordnet |
| $\omega: \{0 \dots n^S\} \rightarrow]0 \dots 1]$ | Funktion, die jedem Szenario eine Eintrittswahrscheinlichkeit zuordnet |

1 Einleitung

Die Schranken sowohl logistischer als auch regulativer Art zwischen Ländern und Unternehmen sinken seit Jahren kontinuierlich. Dazu tragen auf der regulativen Ebene die Einführung sowohl bilateraler als auch multilateraler Abkommen bei, die Zölle abbauen und Gesetze und Normen miteinander in Einklang bringen. Beispiele hierfür sind der freie Warenverkehr im EU-Binnenmarkt oder das Nordamerikanische Freihandelsabkommen NAFTA. Durch die aus dem wachsenden Warenverkehr zwischen den Ländern resultierenden positiven Skaleneffekte und den technologischen Fortschritt sinken außerdem die Transportkosten und damit die logistischen Barrieren. Dadurch ergibt sich, dass die zuvor auf Länder bzw. Regionen begrenzten Märkte, in denen die Unternehmen agieren, sich erweitern und zunehmend international werden. Es ergibt sich eine Vielzahl von Implikationen für die Unternehmen, die sowohl als Kunden als auch als Anbieter auf den globalisierten Märkten auftreten. Auf der Kundenseite kauft das Unternehmen dabei nicht nur Betriebsmittel und Werkstoffe ein, sondern fragt außerdem Arbeitszeit von Mitarbeitern nach. Diese Ressourcenallokationen müssen für das Unternehmen, unter Berücksichtigung der Bedarfe der Absatzmärkte, effizient geschehen.

Die volkswirtschaftliche (makroökonomische) Sicht auf diesen Sachverhalt wurde zunächst im 19. Jahrhundert durch David Ricardo geprägt. Er wies mit seiner Theorie der komparativen Kostenvorteile nach, dass die Vorteilhaftigkeit des Handels zwischen zwei Ländern von den relativen Kosten der Produktion in diesen beiden Ländern abhängt. Nach dieser Theorie produzieren die Unternehmen in den Ländern jeweils das Gut, das sie am effizientesten im Vergleich zu anderen Gütern herstellen können. Es wurde also bereits früh festgestellt, dass sich Länder auf ihre Kernkompetenzen¹ besinnen und diese im Zusammenhang mit dem Handel nutzen sollten, um den volkswirtschaftlichen Gesamtnutzen zu maximieren. Die Volkswirtschaft hat sich in diesem Bereich weiterentwickelt², allerdings ist die Grundaussage über die Vorteilhaftigkeit des Handels zwischen zwei Ländern weiterhin gültig.

1 Kernkompetenzen sind nach Prahalad und Hamel definiert als „the skills that enable a firm to deliver a fundamental customer benefit“ (vgl. [PrHa90], S. 13).

2 Beispielsweise erklärt das Heckscher-Ohlin-Theorem die Spezialisierungsmuster des internationalen Handels detaillierter über die relative Ausstattung der Länder mit Kapital und Arbeit.

Eine Folge dieser Entwicklung ist der Trend zur Konzentration auf Kernkompetenzen, der bei produzierenden Unternehmen branchenübergreifend zu beobachten ist. Das einzelne Unternehmen beugt sich damit dem Markt, der von ihm einen möglichst hohen Return on Investment (und damit eine Maximierung des Shareholder Values) fordert. Diese Entwicklung führt dazu, dass die Produkte durch die Endprodukthersteller, so genannte OEM³, nur noch ausgehend von vorgefertigten Baugruppen montiert werden. Diese Baugruppen können ihrerseits in anderen Unternehmen produziert werden, so dass durch die oben beschriebene Entwicklung ein immer komplexeres Unternehmensnetzwerk für die Herstellung eines Produktes verantwortlich ist. Die Wertschöpfung verteilt sich auf immer mehr Teilnehmer im Produktionsnetzwerk; der Anteil des Endproduktherstellers beträgt derzeit nur noch ca. zehn Prozent (vgl. [Kühn04], S.33).

Aus Sicht des einzelnen Unternehmens muss zunächst geklärt werden, wie sich eine effiziente Ressourcenallokation unter den oben beschriebenen Vorgaben darstellt. Es wird eine Entscheidungsgrundlage benötigt, die klärt, welche Teile der Wertschöpfung an welcher Stelle geschehen und ob diese durch das eigene Unternehmen oder einen Zulieferer erbracht werden. Dabei muss insbesondere die bereits vorhandene Infrastruktur (Produktionsanlagen, Know-how der Mitarbeiter in bestehenden Werken, bestehende Lieferantenbeziehungen, etc.) mit einbezogen werden. Das Ziel dieser Planungsaufgabe ist die Gewinnmaximierung für das untersuchte Unternehmen.

Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die zeitlichen Verzögerungen aufgrund der definierten Lieferketten nicht die angestrebte Lieferfähigkeit des Unternehmens einschränken. Es müssen die Rahmenbedingungen bzgl. Produktionsmengen und -zeitpunkten sowohl innerbetrieblich als auch gegenüber den Lieferanten abgestimmt und notwendige oder sich implizit ergebende Bestände bestimmt werden. Dabei spielt insbesondere die Variabilität der Produkte und Baugruppen auf den einzelnen Produktionsstufen eine Rolle.

Die Basis dieser Ausarbeitung bildet die praktische Fragestellung eines Unternehmens aus der Schienenfahrzeugindustrie. Es soll untersucht werden, wie die derzeitige Struktur der Produktion des Unternehmens umgestellt werden muss, damit eine langfristig sinnvolle und gewinnmaximierende Ausrichtung des Unternehmens sichergestellt wird. Im Unternehmen wurde dafür eine grundsätzliche Zielsetzung bezüglich der Liefertreue und Lieferzeit als Basis der weiteren Planungen definiert. Basierend auf Vergangenheitsdaten und Abschätzungen bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Systemumwelt sowie vordefinierter Möglichkeiten, das Produktionssystem zu strukturieren (z. B. mögliche Standorte), soll eine Entscheidung über die

3 OEM: Original Equipment Manufacturer, ein Hersteller, dessen Produkte unter einem Markennamen als Einheit verkauft werden.

Struktur, die Dimensionierung und die Verfahren zur Materialbedarfsplanung im Unternehmen getroffen werden. Außerdem soll das eingesetzte Planungsverfahren in einen regelmäßigen Anpassungsprozess integriert werden, um die Anpassung der Planungsentscheidung bei Änderungen der Systemumwelt oder der Zusammenhänge im System zu gewährleisten.

Diese Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Im Anschluss an dieses einleitende Kapitel wird in Kapitel 2 die Problemstellung analysiert, es werden die relevanten Begriffe definiert und das Problem wird strukturiert. Kapitel 3 beschreibt den Stand der Technik im Bereich der hierarchischen Planung von Fertigungssystemen. Dabei werden die existierenden Ansätze bezüglich der Anforderungen analysiert und damit die Möglichkeit ihrer Nutzung zur Lösung der Problemstellung festgestellt. In Kapitel 4 werden dann die aus dem Stand der Technik sowie der Problemstellung resultierenden zu leistenden Arbeiten dargestellt. In Kapitel 5 wird die Entwicklung des Verfahrens zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen dargestellt, untergliedert in die Definition von Planungsmodellen in Abschnitt 5.1 und die darauf aufbauende Definition von Koordinationsprozessen, die eine Steuerung des Fertigungssystems ermöglichen, in Abschnitt 5.2. In Kapitel 6 wird das Verfahren evaluiert, wobei die dieser Arbeit zugrunde liegende praktische Problemstellung eines Unternehmens aus der Schienenfahrzeugindustrie als Anwendungsfall genutzt wird. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Entwicklungen auf Basis des hier definierten Ansatzes gegeben.

2 Problemstellung

In diesem Kapitel wird die Problemstellung für die Definition eines Verfahrens zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen präzisiert und systematisiert. Dazu werden zunächst in Abschnitt 2.1 die wesentlichen Begriffe des Problembereichs definiert, abgegrenzt und damit die Problemstellung dargestellt. In Abschnitt 2.2 wird der Problembereich systematisch in eine Menge hierarchisch angeordneter Partialmodelle geteilt, die dann die Basis für die im Rahmen dieser Arbeit definierten Planungsprozesse bilden.

2.1 Problemdefinition

2.1.1 Produktion

Die übereinstimmende Komponente der meisten Definitionen des Begriffs Produktion (vgl. [Beue96], S. 1495, [Dang01], S. 3 sowie [Hoit93], S. 1) ist die Charakterisierung als Input-/Output-Prozess. Ein materieller oder immaterieller Input wird durch einen Transformations- bzw. Faktorkombinationsprozess in einen andersartigen materiellen oder immateriellen Output umgewandelt. In Abbildung 2.1 ist dieser Input-/Output-Prozess in graphischer Form dargestellt.

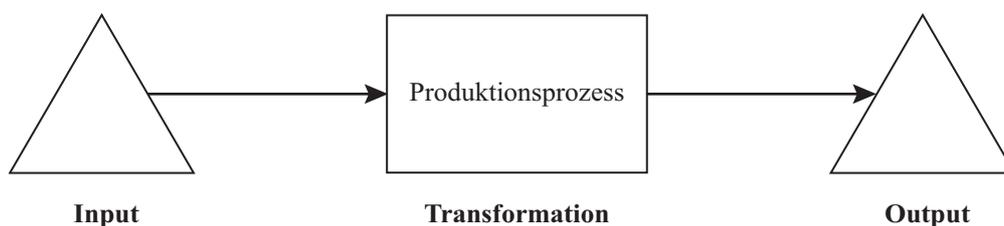


Abbildung 2.1: Produktion als Input-/Output-Prozess⁴

Aus den oben genannten Quellen lässt sich die im Folgenden verwendete Definition ableiten: Der Begriff Produktion bezeichnet den zielgerichteten Einsatz von Sachgütern und Dienstleis-

⁴ Vgl. [Dang01], S. 4

tungen und deren Transformation in andere Sachgüter und Dienstleistungen mit höherer Wertschätzung.

Der Input umfasst die eingesetzten Produktionsfaktoren und der Output ist das Produkt oder Erzeugnis bzw. das Ergebnis des Produktionsprozesses, das entweder ein verkaufsfähiges Endprodukt oder ein für weitere Produktionszwecke zu verwendendes Zwischenprodukt darstellt (vgl. [Cors04], S. 1, [DSV93], S. 4, [KiSt01], S. 1, [WeKa06], S. 87). Im Folgenden sollen die Begriffe Produktionsfaktor (Input), Produktionsprozess (der eigentliche, durch den Begriff Produktion charakterisierte Prozess) und Produkt (Output) verwendet werden, die in den sich anschließenden Abschnitten präzisiert werden.

2.1.1.1 Produktionsfaktor

Für die Planung von Fertigungssystemen, die im weiteren Verlauf dieser Ausarbeitung betrachtet wird, stellen die einzusetzenden Produktionsfaktoren eine bedeutende Einflussgröße dar. Daher wird nachfolgend eine genauere Betrachtung der unterschiedlichen Produktionsfaktoren vorgenommen.

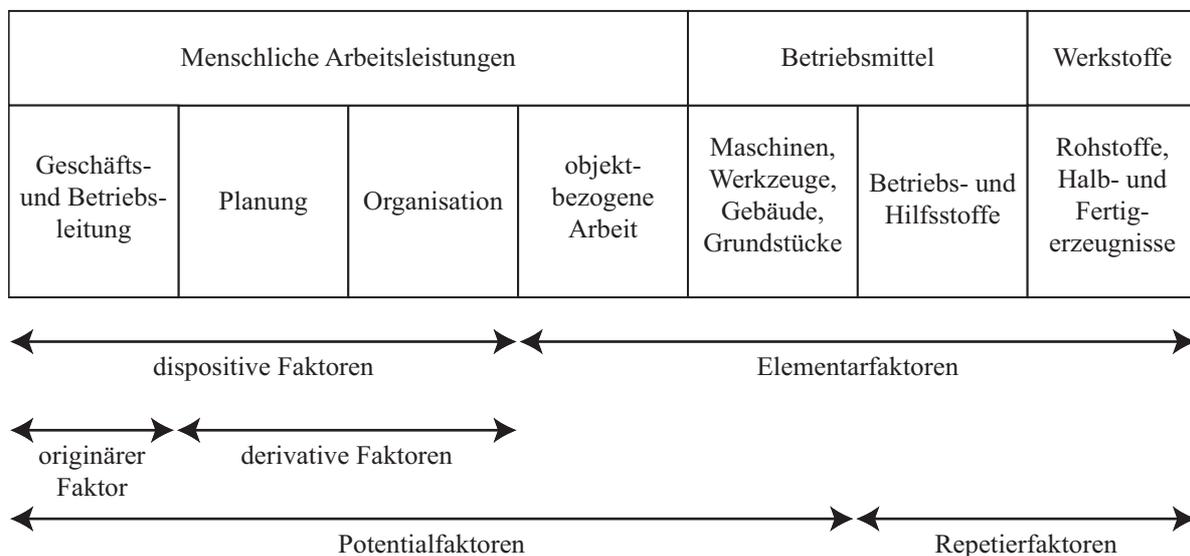


Abbildung 2.2: Klassifikation von Produktionsfaktoren nach Gutenberg⁵

Nach Gutenberg (vgl. [Gute51], S. 1-8) können Produktionsfaktoren wie in Abbildung 2.2 nach verschiedenen Gesichtspunkten charakterisiert werden. Zunächst kann zwischen Elementarfaktoren und dispositiven Faktoren unterschieden werden. Den Elementarfaktoren sind die Faktoren zuzuordnen, die direkt mit dem Leistungserstellungs- bzw. Produktionsprozess

⁵ Vgl. [Gute51], S. 1-8, [Dang03], S. 50

in Verbindung stehen. Dazu zählen objektbezogene Arbeit (konkrete menschliche Arbeitsleistungen, Verrichtungen und Tätigkeiten, die direkt dem Leistungserstellungsprozess dienen), Betriebsmittel (Maschinen, Werkzeuge, Gebäude, Grundstücke, aber auch Betriebs- und Hilfsstoffe) sowie Werkstoffe (Rohstoffe, eigen- oder fremdgefertigte Halb- und Fertigerzeugnisse). Die dispositiven Faktoren sind menschliche Arbeitsleistungen, die mit der Leitung und Lenkung der betrieblichen Vorgänge des Unternehmens in Verbindung stehen. Diese unterteilt Gutenberg weitergehend in die originären Faktoren (Geschäfts- und Betriebsleitung; diejenigen Faktoren, von denen die unternehmerische Tätigkeit ausgeht) und die derivativen Faktoren (Planung und Organisation).

Eine zweite Unterscheidungsmöglichkeit für Produktionsfaktoren ist die Gliederung in Potentialfaktoren (Bestands- oder Gebrauchsfaktoren) und Repetierfaktoren (Verbrauchsfaktoren). Repetierfaktoren, beispielsweise Energie und Rohstoffe, gehen im Produktionsprozess unter oder mit in das Erzeugnis ein und werden physisch und/oder mengenmäßig verbraucht. Potentialfaktoren hingegen können mehrmals wieder verwendet werden und sind nicht Teil des Endproduktes. Sämtliche menschliche Arbeitsleistungen sowie die Gruppe der Maschinen, Werkzeuge, Gebäude und Grundstücke sind Potentialfaktoren. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass Maschinen und Werkzeuge in der Regel unter Verschleiß leiden und in regelmäßigen Zeitabständen gewartet oder ersetzt werden müssen, also weisen sie auch Merkmale von Repetierfaktoren auf. Ebenso sind immaterielle Potentialfaktoren zwar relativ langlebig, aber nicht unendlich beständig. Lizenzen für die Nutzung geschützter Produktionsverfahren, von Patenten oder Softwareprodukten können beispielsweise ablaufen, oder eine Maschine ist einem Lebenszyklus unterworfen, der im Laufe der Zeit geringere Leistung sowie eine Grenze für die Nutzungsdauer vorgibt (vgl. [BBSS97], S. 96). Damit ist es eine Frage des Betrachtungshorizonts, ob gewisse Produktionsfaktoren als Potential- oder Repetierfaktoren angesehen werden.

2.1.1.2 Produktionsprozess

Ein Prozess ist die „dynamische Aufeinanderfolge von verschiedenen Zuständen eines Dinges bzw. Systems“ ([KlBu87], S.990). Dabei kann man abhängig davon, ob die Aufeinanderfolge festgelegt ist, zwischen deterministischen und stochastischen Prozessen unterscheiden. Deterministische Prozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass der Zustand des Systems eindeutig aus dem vorhergehenden Zustand abgeleitet werden kann. In stochastischen Prozessen folgt der Zustand des Systems aus dem vorhergehenden Zustand nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit.

Auch wenn durch Klaus und Buhr darauf verwiesen wird, es habe sich immer mehr die Erkenntnis durchgesetzt, „daß letztlich alle Prozesse stochastische bzw. statistische Prozesse sind“ ([KlBu87], S.991), nehmen wir an, dass die Produktion ein deterministischer Prozess ist. In diesem Prozess wird der Zustand des Systems, in dessen Ausgangszustand die Inputfaktoren vorhanden sind, so verändert, dass es im angestrebten Folgezustand den Output enthält. Diese Abbildung der Produktion als deterministischer Prozess vereinfacht die Modellierung der Prozesse und ihrer Abläufe.

2.1.1.3 Produkt

Sabisch definiert ein Produkt als „eine von einem Unternehmen am Markt angebotene Leistung, die durch ihre spezifischen Funktionen und Eigenschaften geeignet ist, konkrete Bedürfnisse von Kunden nutzbringend zu befriedigen“ (vgl. [Sabi96], S. 1439-1440). Damit wird ein Produkt dadurch charakterisiert, dass für das betrachtete Unternehmen Primärbedarfe⁶ vorliegen können.

Der Kunde muss dabei nicht unbedingt dem Endverbraucher entsprechen, da das Produkt auch einen Produktionsfaktor in einem anderen Unternehmen darstellen kann. Des Weiteren kann der Output eines Produktionsprozesses demselben Unternehmen wiederum als Input für einen anderen Produktionsprozess dienen. In diesem Fall kann ein Produkt gleichzeitig auch Produktionsfaktor in demselben Unternehmen sein. Meist handelt es sich dann um einen Produktionsfaktor aus der Gruppe der Rohstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse.

2.1.2 Fertigung

Der Begriff Fertigung wird in der Literatur, je nach Auslegung, häufig äquivalent zum Begriff Produktion verwendet (beispielhaft können hier folgende Quellen aufgeführt werden: [FrTh96], S. 462, [Woll92], S. 206, [DSV93], S. 4). In dieser Ausarbeitung wird er allerdings in einer abweichenden Bedeutung verwendet. Daher soll an dieser Stelle eine Abgrenzung vorgenommen werden. Wie bereits zuvor erwähnt, befasst sich die Produktion mit der Transformation von Gütern und Dienstleistungen in andere Güter und Dienstleistungen. Die Fertigung im Sinne der hier verwendeten Definition hingegen lässt Dienstleistungen und andere immaterielle Güter als Ergebnis des Transformationsprozesses außer Acht und wird daher auch als Produktion im engeren Sinne bezeichnet. Es geht also um die konkrete Herstellung von materiellen Gütern, die sich hauptsächlich auf die Teilefertigung und Montage bezieht

6 Der Primärbedarf ist der Marktbedarf an Enderzeugnissen und Ersatzteilen ([DaWa97], S. 258). Er ist somit der Bedarf der obersten Strukturebene, der einer Vorhersage oder einem konkreten Kundenauftrag entstammt.

(vgl. [Warn93B], S. 1). Folgende Definition soll für die weiteren Betrachtungen genutzt werden:

„Die Fertigung umfasst alle technischen Maßnahmen zur Herstellung von Material oder Erzeugnissen [und] wird demnach als eine spezielle Form der Produktion betrachtet, die im wesentlichen [...] den Bereich der Herstellung von Einzelteilen und der Montage umfaßt“ ([Dang01], S. 4).

2.1.3 Fertigungssystem

„Ein Fertigungssystem ist eine technisch, organisatorisch (und kostenrechnerisch) selbständige Allokation von Potentialfaktoren zu Produktionszwecken [und] besteht aus (elementaren) Arbeitssystemen, die die kleinste Einheit einer Kombination der Potentialfaktoren Betriebsmittel und Arbeitskräfte darstellen und eine oder mehrere Klassen von Transformationen durchführen können“ ([Dang01], S. 5). Ein Fertigungssystem ist demnach eine autonom funktionierende Einheit, die eine Reihe von Fertigungseinrichtungen (z. B. Maschinen oder Montageplätze), einschließlich weiterer für den Fertigungsprozess benötigter Potentialfaktoren, umfasst und für die Herstellung eines Spektrums geometrisch oder technologisch ähnlicher Werkstücke oder Teilefamilien ausgelegt ist (vgl. [Boss99], S. 5).

2.1.4 Planungsaufgaben in Fertigungssystemen

Planung bezeichnet die gedankliche Vorwegnahme zukünftiger Ereignisse (vgl. [Woll92], S. 548). Das Ziel der Planung ist es, auf der Grundlage einer Analyse möglicher Handlungsalternativen und einer Prognose zukünftiger Entwicklungen eine oder mehrere Alternativen auszuwählen, die zur Erreichung zuvor formulierter Zielsetzungen führen (vgl. [DSV93], S. 1). Der Planungsprozess kann in die folgenden Schritte unterteilt werden⁷ (vgl. [Woll92], S. 549, [DSV93], S. 1-2):

- Zielformulierung
- Bestimmung von Maßnahmen, Mitteln und Verfahren, die zur Zielerreichung führen können
- Analyse der möglichen Handlungsalternativen

⁷ Des Weiteren umfasst die Planung als Tätigkeit, nach der konkreten (operativen) Durchführung der ausgewählten Handlungsalternative, die Kontrolle der Planung im Rahmen eines Soll-/Ist-Vergleichs. Eventuell notwendige Anpassungen der Plan- und Ist- Werte werden in der Planungssteuerung vorgenommen (vgl. [Woll92], S. 549).

- Auswahlentscheidung

Unter einer Planungsaufgabe in einem Fertigungssystem (Fertigungsplanungs-Aufgabe) ist die Aufgabe zu verstehen, „vorausschauend Plandaten über die qualitative, quantitative und zeitliche Gestaltung und Zuordnung der Elemente des Fertigungssystems, die in sich und mit den Ausgangsdaten konsistent sind, für einen definierten, zielgerichteten Fertigungsprozess festzulegen“ ([Dang01], S. 6).

Ein Fertigungssystem wird in der Fertigungsplanung festgelegt (vgl. [Dang01], S. 6). Demnach sind die für Fertigungssysteme relevanten Planungsaufgaben aus der Fertigungsplanung abzuleiten. „Die Planung der Fertigung umfaßt alle einmalig zu treffenden Maßnahmen bezüglich der Gestaltung eines Fertigungssystems und der darin stattfindenden Fertigungsprozesse“ (vgl. [Dang01], S. 5). Die Fertigungsplanung wird in der Literatur unterschiedlich eingeordnet und bezeichnet. Sie wird u. a. zusammen mit der Fertigungssteuerung⁸ als Teilgebiet der Arbeitsvorbereitung⁹ verstanden (vgl. [Warn93A], S. 245).

Fertigungsplanungs-Aufgaben können in Fertigungsplanungs-Teilaufgaben¹⁰ eingeteilt werden. Dangelmaier (vgl. [Dang01], S. 35) teilt die Fertigungsplanungs-Aufgabe in zwei wesentliche Klassen von Teilaufgaben ein: Die Strukturierungsaufgabe und die Dimensionierungsaufgabe. Diese Begriffe sollen im Folgenden als Grundlage für die Definition des Ziels dieser Ausarbeitung beschrieben werden.

2.1.4.1 Strukturierungsaufgabe

Die Strukturierungsaufgabe ist eine Klasse von Teilaufgaben der Fertigungsplanungs-Aufgabe. Diese Teilaufgaben legen die Struktur des Fertigungssystems fest, es wird die Zuordnung von Elementen des Systems zu Klassen vorgenommen (vgl. [Dang01], S. 35). Es werden beispielsweise Produkte zu Produktionsprozessen und Produktionsprozesse zu Fertigungsvorgängen zugewiesen, die Make-or-Buy-Entscheidung getroffen usw.

8 „Die Fertigungssteuerung umfaßt alle Maßnahmen, die zur Durchführung eines Auftrages im Sinne der Fertigungsplanung erforderlich sind“ ([AWRE68], zitiert nach [Warn93A], S. 247).

9 „Die Arbeitsvorbereitung umfaßt die Gesamtheit aller Maßnahmen einschließlich der Erstellung aller erforderlichen Unterlagen und Betriebsmittel, die durch Planung, Steuerung und Überwachung für die Fertigung von Erzeugnissen ein Minimum an Aufwand gewährleisten“ ([AWRE68], zitiert nach [Warn93A], S. 247).

10 Eine Fertigungsplanungs-Teilaufgabe ist definiert als eine Fertigungsplanungs-Aufgabe, „deren Gegenstand nur ein Teil des Fertigungsprozesses ist, der Aufgabenobjekt der entsprechenden allgemeinen Fertigungsplanungs-Aufgabe ist, und/oder dessen Sachziel ein Teilziel des Sachziels der allgemeinen Fertigungsplanungs-Aufgabe ist“ ([Dang01], S. 8).

Die Strukturierungsaufgabe kann „über die Zerlegung des Fertigungssystems in einzelne Untersysteme, die getrennte Betrachtung von qualitativen, quantitativen oder zeitlichen Aspekten, die Schaffung von Ordnungsrelationen [...] zwischen den Elementen und eine Zergliederung des Sachziels erfolgen“ (vgl. [Dang01], S. 35; die Definition einer Ordnungsrelation findet sich u. a. bei [BSMM99], S. 295).

2.1.4.2 Dimensionierungsaufgabe

Die Dimensionierung legt unter Betrachtung der Zeit die Aufnahmefähigkeiten und die möglichen Durchsätze der in einem Fertigungssystem enthaltenen Entitäten fest. Dabei werden u. a. die Anzahl und die Leistungsfähigkeit der Betriebsmittel definiert, Puffergrößen festgelegt usw. Die Beachtung der Zeit ist bei der Bearbeitung dieser Aufgabe deshalb notwendig, weil kumulierte Arbeitsinhalte der einzelnen Entitäten über Zeitabschnitte betrachtet werden müssen, um zu einer Aussage zu kommen, welche Dimensionierung ausreichend ist bzw. benötigt wird, damit das Fertigungssystem den benötigten Output verlässlich liefern kann (vgl. [Dang01], S. 43-49).

2.1.4.3 Materialbedarfsplanung

Die Materialbedarfsplanung ist eine Teilaufgabe der Produktionsplanung im Bereich des mittel- bis kurzfristigen Betrachtungshorizonts. Dabei werden im mittelfristigen Betrachtungshorizont zunächst die Vorgehensweisen und Planungsverfahren ausgewählt und konfiguriert, die zu minimalen Kosten führen. Es sind sowohl direkt aus der Durchführung der Planung resultierende Kosten als auch solche Kosten, die bei der Fertigung entstehen, zu berücksichtigen (vgl. [Witt96], S. 1169).

Im kurzfristigen Betrachtungshorizont werden dann die Planungsvorgänge auf Basis der mittelfristigen Entscheidungen durchgeführt. Damit stellt diese Planung die Ablaufplanung dar. In der Ablaufplanung wird „die Reihenfolge von Teilprozessen eines Gesamtgeschehens, etwa eines Produktionsprozesses, sowohl in zeitlicher als auch in räumlicher Hinsicht“ ([Troß96], S. 12) festgelegt.

Der Begriff des Materialbedarfs im Kontext der Entwicklung eines Planungsverfahrens im Titel dieser Arbeit ist auf den mittelfristigen Betrachtungshorizont begrenzt. Die Planung des kurzfristigen Betrachtungshorizont soll nicht in das hier entwickelte Verfahren einfließen, da die in diesem Bereich ausgewählten und konfigurierten Vorgehensweisen und Planungsverfahren ausgeführt werden und damit die Planung direkt aus den Ergebnissen der übergeordneten Ebene folgt.

2.1.5 Fertigungsplanungs-Verfahren

„Das Fertigungsplanungs-Verfahren ist eine festgelegte oder geeignet erzeugte Folge von zielgerichteten Transformationen der Plandaten, so daß die durch die Fertigungsplanungs-Aufgabe gestellten Anforderungen erfüllt werden“ ([Dang01], S. 8). Ein solches Verfahren soll im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden. Dabei begrenzt sich der betrachtete Ausschnitt der Teilaufgaben auf den Bereich der zuvor definierten Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung.

Die hier entwickelten mathematischen Modelle, die den definierten Ausschnitt der Fertigungsplanungs-Aufgabe quantitativ in Form mehrerer Partialmodelle¹¹ beschreiben, werden durch hierarchiebildende¹² Prozessdefinitionen so miteinander verbunden, dass sie bei der Lösung der einzelnen mathematischen Programme mit Hilfe eines Solvers als Fertigungsplanungs-Verfahren genutzt werden können¹³. Die Aufstellung dieser Partialmodelle ist der Inhalt des folgenden Abschnitts. Alternativ wäre es möglich, ein Totalmodell (vgl. [KiSt01]) aufzustellen und zur Lösung der Fertigungsplanungs-Aufgabe zu nutzen. Allerdings führt die Lösung eines solchen Modells zu sehr hohen Rechenzeiten, die eine Anwendung in der Praxis verbieten (vgl. [Stad96]).

2.1.6 Modell

Die Definition des Begriffs Modell wird an dieser Stelle deshalb gegeben, weil im Rahmen dieser Arbeit mathematische Modelle entworfen werden sollen, mit denen die Planungsaufgaben der Problemstellung gelöst werden können. Um die Anwendbarkeit dieser Modelle für die Planungsaufgabe sicherzustellen, müssen die grundlegenden Eigenschaften von Modellen, so-

11 Bei der Definition von Fertigungsplanungs-Teilaufgaben können Zusammenhänge mit den nicht berücksichtigten Teilen der Fertigungsplanungs-Aufgabe vernachlässigt werden, um eine separate Lösung der Fertigungsplanungs-Teilaufgabe zu ermöglichen. Dies führt insbesondere bei stark voneinander abhängigen Fertigungsplanungs-Teilaufgaben zu einer stark suboptimalen Lösung durch das Fertigungsplanungs-Verfahren. Hingegen ermöglicht eine Zusammenfassung mehrerer Fertigungsplanungs-Teilaufgaben in einem Partialmodell die integrierte Betrachtung und damit eine bessere Lösung.

12 „Ein System weist eine hierarchische Struktur auf oder stellt ein hierarchisch strukturiertes System dar, wenn es aus mindestens zwei Teilsystemen besteht bzw. sich in mindestens zwei Teilsysteme zerlegen läßt und die Teilsysteme hinsichtlich mindestens eines konkretisierungsbedürftigen Aspekts in einem Verhältnis der Über-/Unterordnung zueinander stehen.“ ([Riep79], S. 3)

13 Damit entspricht das Vorgehen der Grundidee der hierarchischen Planung: Die gesamte Planungsaufgabe wird in eine Menge leichter lösbare Teilaufgaben zerlegt, „die durch Koordinationsmechanismen miteinander verknüpft werden und eine möglichst gute Lösung der gesamten Planungsaufgabe ermöglichen“ ([Stad96], S. 631).

wie die einzelnen Arten/Klassen von Modellen zunächst herausgearbeitet werden und ihre jeweilige Priorität für die Modelle bestimmt werden.

Ein Modell ist „ein Objekt, das auf Grundlage einer Struktur-, Funktions- oder Verhaltensanalogie zu einem entsprechenden Original von einem Subjekt eingesetzt und genutzt wird, um eine bestimmte Aufgabe lösen zu können, deren Durchführung mittels direkter Operationen am Original zunächst oder überhaupt nicht möglich bzw. unter gegebenen Bedingungen zu aufwendig ist“ ([KlBu87], S. 805). Im Rahmen dieser Arbeit sollen Modelle erstellt werden, mit deren Hilfe jeweils eine Teilmenge der Planungsaufgaben in Fertigungssystemen durch Nutzung einer Optimierungssoftware gelöst werden kann. Die direkte Operation am Original ist entsprechend der obigen Definition dabei nicht möglich, da im Rahmen der Optimierung verschiedene Abfolgen von Systemzuständen (Pläne) untersucht werden, um einen optimalen Plan zu erreichen. Eine Untersuchung eines Plans am Original würde dabei zu aufwendig sein und die Untersuchung mehrerer Pläne schlichtweg unmöglich, da dazu der Ausgangszustand immer wieder hergestellt werden müsste.

Modelle sind nach Stachowiak durch die drei Merkmale Abbildung, Verkürzung und Pragmatik gekennzeichnet (vgl. [Stac73], S. 131-133). Das Merkmal Abbildung besagt dabei, dass ein Modell Eigenschaften (Struktur-, Verhaltens- oder Funktionsweisen) eines Originals wiedergibt. Durch das Merkmal Verkürzung wird ausgedrückt, dass nicht die Gesamtheit der Eigenschaften des Originals durch das Modell wiedergegeben wird, sondern nur diejenigen, die für den Einsatzzweck des Modells relevant sind. Das Merkmal Pragmatik besagt, dass ein Modell an seiner Nutzung ausgerichtet sein muss und die für diese Nutzung benötigten Eigenschaften richtig abbildet.

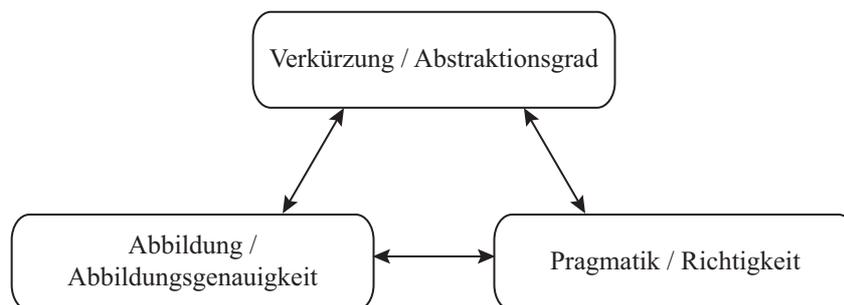


Abbildung 2.3: Zielkonflikt der Modellierung¹⁴

Im Rahmen der Modellierung kommt es bezüglich der Ausprägung einzelnen Merkmale des Modells zu einem Zielkonflikt (vgl. Abbildung 2.3). Es ist ein „Kompromiss zu finden zwischen Richtigkeit einerseits und Genauigkeit, Verständlichkeit und Handhabbarkeit eines Mo-

¹⁴ Vgl. [Dang03], S. 41

dells andererseits“ ([Dang03], S. 41). Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mathematischen Modelle stellen eine Abbildung der quantitativen Eigenschaften des Fertigungssystems in Form mathematischer Funktionen dar, die für die Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung relevant sind. Eine Möglichkeit der Modellierung wäre die Darstellung in Form eines Totalmodells. Ein Totalmodell ist ein komplexes Modell, das das System in einer Genauigkeit modelliert, die Entscheidungen für den weit gefassten Problembereich insgesamt ermöglicht. Für diese Modelle ist allerdings die Handhabbarkeit mit Hilfe einer Optimierungsoftware durch zu lange Laufzeiten nicht befriedigend gegeben. Daher wird hier nicht ein Modell, sondern mehrere entwickelt, wobei für jeden durch ein Modell wiedergegebenen Teilbereich des Systems jeweils der optimale Kompromiss im Rahmen des Zielkonflikts der Modellierung getroffen werden kann.

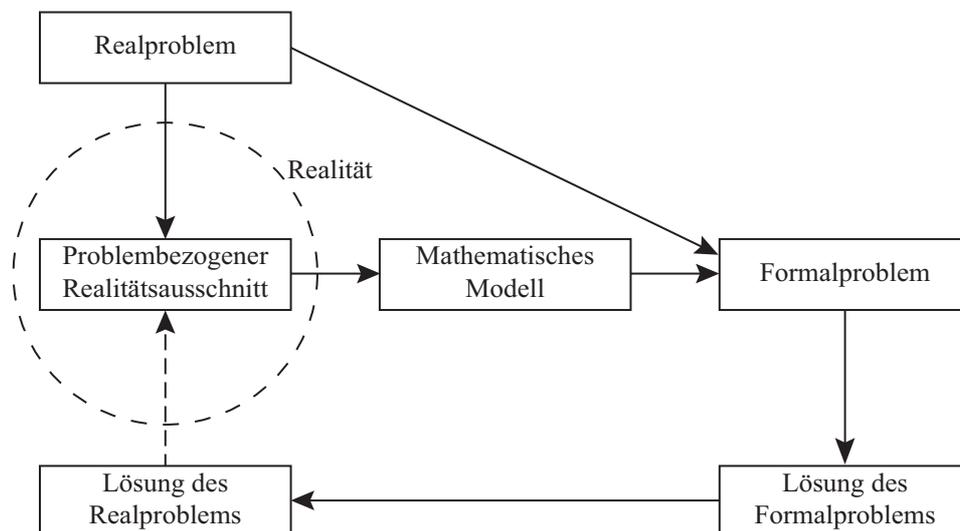


Abbildung 2.4: Vorgehensweise der Planung mit mathematischen Modellen¹⁵

Der Prozess der Problemlösung mit mathematischen Modellen ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Es wird zunächst der für das konkrete Realproblem relevante Ausschnitt aus der Realität bestimmt. Dieser Ausschnitt wird durch das mathematische Modell abgebildet, wobei die drei Merkmale Abbildung, Verkürzung und Pragmatik anwendungsbezogen aufeinander abgestimmt werden müssen. Die Übertragung der Fragestellung des Realproblems auf dieses Modell führt zu dem Formalproblem, das mittels mathematischer Methoden gelöst werden kann. Diese Lösung wird auf die Realität übertragen und wirkt als Lösung des Realproblems auf die Realität ein (vgl. [Müll73], S. 14-15).

¹⁵ Vgl. [Müll73], S. 14

2.1.7 Ableitung der Problemdefinition

Auf Grundlage der oben definierten Begriffe kann nun eine konkrete Erläuterung der Problemstellung vorgenommen werden. Im Rahmen dieser Ausarbeitung soll *ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen* entwickelt werden. Es soll ein Planungsverfahren entstehen, das einen begrenzten Ausschnitt aus *Fertigungssystemen*, also eine technische, organisatorisch selbständige Allokation von Potentialfaktoren, plant. Die Verwendung des Begriffs *Fertigung* begrenzt dabei die zu planenden Systeme auf solche, die materielle Güter als Output haben.

Der zu betrachtende Ausschnitt aus der gesamten Planungsaufgabe ergibt sich aus den Begriffen *Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung*: Es soll die Struktur des Fertigungssystems festgelegt werden (*Strukturierungsaufgabe*), weiterhin sollen unter Betrachtung der Zeit die Aufnahmefähigkeiten und die möglichen Durchsätze der Entitäten festgelegt (*Dimensionierungsaufgabe*) und die Vorgehensweisen und Planungsverfahren ausgewählt und konfiguriert werden (*mittelfristige Materialbedarfsplanung*). Der Begriff *hierarchisch* begrenzt schließlich die Lösungskonzepte für das Planungsverfahren auf die Verfahren der hierarchischen Planung.

2.2 Bildung von Partialmodellen

In diesem Abschnitt soll die Gesamtaufgabe der Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen in mehrere hierarchisch geordnete Partialmodelle zerlegt werden. Außerdem werden für die Partialmodelle jeweils die darin enthaltenen Fertigungsplanungs-Teilaufgaben dargestellt (gemäß [Dang01] wird die Fertigungsplanungs-Aufgabe durch Plandaten, Ausgangsdaten, Istdaten und gesuchte Daten festgelegt), indem für sie die relevanten Parameter und Variablen definiert werden.

Die Aufgliederung der Fertigungsplanungs-Aufgabe in Partialmodelle ist aus mehreren Gründen sinnvoll:

- Aufgrund der hohen Komplexität des Gesamtproblems der Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung in Fertigungssystemen führt die Lösung durch Nutzung eines Totalmodells zu unpraktikablen Rechenzeiten bei der Nutzung einer Optimierungsoftware (vgl. [Stad96]).

- Auf den einzelnen Hierarchieebenen des Planungsmodells lassen sich unterschiedliche Zeiträume (als Planungshorizont¹⁶ des jeweiligen Modells bezeichnet) betrachten. Dabei können verschiedene Aggregationsniveaus genutzt werden, um die effiziente Lösung des Problems auch für Teilmodelle mit einem weiten Betrachtungshorizont durch Aggregation zu ermöglichen. Bei Betrachtung eines kürzeren Zeitraums wird dann mit einer detaillierteren Datenbasis gearbeitet. Dies führt zu einer Reduktion der zu pflegenden und zu erhebenden Daten, sowie zu Vorteilen bei der Rechenzeit für die einzelnen Partialmodelle. Für einen sehr langen Planungshorizont lässt sich eine detaillierte Datenbasis insbesondere auch wegen sich ergebender Prognoseprobleme nicht realisieren.
- Eine integrierte Planung aller Teilaspekte ist nicht sinnvoll, da die Steuerung eines Fertigungssystems die kontinuierliche Anpassung in Teilen des Systems erfordert, während andere Teile über einen längeren Zeitraum konstant gehalten werden sollen. Bei Nutzung von Partialmodellen ist dies durch separate Neuplanung einzelner Modelle möglich. Diese Steuerung der Planungsvorgänge erfolgt durch ein Prozessmodell, das ebenfalls entwickelt wird.

Den Input der hier identifizierten Teilaufgaben bilden Entscheidungen der strategischen Unternehmensplanung, Stammdaten des Unternehmens sowie Bewegungsdaten und prognostizierte Bewegungsdaten. In der strategischen Unternehmensplanung werden dabei die Ziele für die Unternehmung festgelegt (im Bezug auf die Planung der Fertigungssysteme sind dabei insbesondere die angestrebte Lieferzeit und Liefertreue von Bedeutung), Prognosen bzgl. der Entwicklung der Systemumwelt abgegeben und die grundsätzlichen Strategiealternativen (d. h. verschiedene mögliche Mitarbeiter- und Maschinenkonfigurationen) für die Planung der Fertigungssysteme festgelegt.

Die Aufgaben der strategischen Unternehmensplanung sollen hier nicht weiter betrachtet werden, sondern als gegeben hingenommen werden, da diese grundlegenden Managemententscheidungen diverse qualitative Faktoren berücksichtigen, weshalb sich eine Lösung durch mathematische Modelle in Verbindung mit Optimierungssoftware nicht anbietet¹⁷. Außerdem ist die strategische Ausrichtung eines Unternehmens ein kreativer Prozess, der durch Rechner unterstützt, aber nicht übernommen werden kann.

16 „Der Planungshorizont stellt den Ausschnitt aus einem Kalender dar, der in einem Planungslauf gefüllt bzw. aktualisiert wird (Reichweite der Planung; Planungszeitraum).“ ([DaWa97], S.54)

17 Dieses Vorgehen entspricht dem durch Switalski beschriebenen Ansatz: „[...] die strategischen Daten werden als gegeben vorausgesetzt. Sie werden im Rahmen der Unternehmensgesamtplanung festgelegt.“ ([Swit89], S. 5)

Die Einteilung der Gesamtaufgabe in eine Menge von hierarchisch angeordneten Partialmodellen ist ein zweistufiger Prozess. Zunächst werden in Abschnitt 2.2.1 die einzelnen relevanten Teilaufgaben erarbeitet. Diese Teilaufgaben werden dann in Abschnitt 2.2.2 nach verschiedenen Kriterien so aggregiert, dass eine gleichzeitige Lösung der einzelnen Gruppen durch ein Modell möglich ist und damit entsprechende Partialmodelle je Aggregat gebildet werden können. Diese werden als Blackboxes mit Input- und Outputvariablen definiert. Damit sind bereits die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modellen implizit definiert, die dann in Kapitel 5 weiter verwendet werden.

2.2.1 Ableitung der Fertigungsplanungs-Teilaufgaben

Die relevanten Fertigungsplanungs-Teilaufgaben werden hier zunächst in Anlehnung an Günther/Tempelmeier abgeleitet. Diese benennen die folgenden wesentliche Gesichtspunkte der Produktionsstrategie innerhalb von strategischen Geschäftseinheiten (vgl. [GüTe05], S. 8, [HaWh84], S. 31):

- Kapazität
- Produktionsstandorte
- Personal
- Produktionstiefe
- Technologie¹⁸
- Produktionsqualität
- Planungs- und Steuerungskonzepte
- Produktionsorganisation

¹⁸ Dinkelbach und Rosenberg (vgl. [DiRo04], S.44) definieren die Technologiemenge formal als die Menge aller realisierbaren Faktormengen- und Produktmengenkombinationen. Die einzelnen Elemente der Technologiemenge werden dort als Produktion bezeichnet. Ob eine Produktion realisierbar ist, kann technisch bedingt (z. B. Eigenschaften der Produktionsanlagen) und/oder auf ökonomische Bedingungen (z. B. Mindestproduktquantitäten, Faktormengenbeschränkungen) zurückzuführen sein. Krelle (vgl. [Krel69], S. 163) bezeichnet realisierbare Produktionen als ein dem Produzenten bekanntes Produktionsverfahren. Hier wird im Weiteren der Begriff Technologie verwendet, der dem Begriff Produktion in der Nomenklatur nach Dinkelbach und Rosenberg entspricht.

Hieraus werden die folgenden Fertigungsplanungs-Teilaufgaben abgeleitet:

- *Entwicklung des Maschinenbestands*: Es können Maschinen neu beschafft oder verändert werden. Integriert in diese Fragestellung wird auch die Standortentscheidung getroffen. Damit werden hier die Gesichtspunkte *Kapazität* und *Produktionsstandorte* bestimmt.
- *Entwicklung des Mitarbeiterbestands*: Mitarbeiter können entlassen oder neu eingestellt werden. Dabei müssen die Verfügbarkeit von Mitarbeitern (initial und im weiteren Zeitverlauf) und ihre initialen Qualifikationen berücksichtigt werden. Es ergibt sich der Gesichtspunkt *Personal*.
- *Entwicklung der Mitarbeiterqualifikationen*: Jeder Mitarbeiter besitzt eine Menge von initialen Qualifikationen, definiert als Qualifikationsmatrix. Diese Menge wird durch Qualifikationsmaßnahmen erweitert. Diese Teilaufgabe bezieht sich ebenfalls auf den Punkt *Personal*.
- *Treffen der Make-or-Buy-Entscheidung*: Für Erzeugnisse, die alternativ entweder selbst gefertigt oder fremdbeschafft werden können, muss entschieden werden, auf welche dieser Arten sie der Fertigung zur Verfügung gestellt werden. Diese Teilaufgabe definiert die *Produktionstiefe*.
- *Auswahl zwischen alternativen Fertigungsprozessen*: Eine Prozessalternative legt fest, welche Prozessschritte zur Erstellung eines Erzeugnisses durchgeführt werden. Gemäß der Nomenklatur von Günther/Tempelmeier wird damit die *Technologie* ausgewählt. Außerdem wird hierdurch auch indirekt die *Produktionsqualität* bestimmt, da diese insbesondere von dem verwendeten Fertigungsprozess abhängt. Eine explizite Betrachtung dieses Punktes wird allerdings nicht vorgenommen. Der Grund hierfür liegt darin, dass jeder betrachtete Produktionsprozess Output in hinreichender Qualität liefern muss. Variiert die Qualität eines Erzeugnisses bei der Verwendung unterschiedlicher Produktionsprozesse, so ist eine Darstellung in Form unterschiedlicher Erzeugnisse vorzunehmen.
- *Auswahl und Konfiguration von Dispositionsverfahren*: Zunächst muss für jedes Erzeugnis entschieden werden, ob es verbrauchsorientiert¹⁹ oder bedarfsorientiert²⁰ disponiert wird. Bei verbrauchsorientierter Disposition kann das Verfahren anschließend

¹⁹ Von verbrauchsorientierter Disposition spricht man, wenn das Produktionsprogramm keine Berücksichtigung findet, der Lagerbestand kontrolliert wird und in Abhängigkeit von der Höhe dieses Bestands entschieden wird, ob das Lager aufgefüllt wird oder nicht (vgl. [Zäpf96], S. 1395-1396).

konfiguriert werden. Dadurch werden die *Planungs- und Steuerungskonzepte* festgelegt. Die Konfiguration bei verbrauchsorientierter Disposition geschieht durch die folgenden Parameter:

- *Einstellen von Meldebeständen*²¹
- *Entscheidung über die Nutzung eines Bestellzyklus*²²
- *Bestimmung von Losgrößen*²³
- *Definition von Lagerstufen*: Um den Kunden eine zuvor determinierte Lieferzeit garantieren zu können, müssen Lagerstufen im Erzeugniszusammenhang definiert werden, die eine Entkopplung der Planung zwischen zwei Fertigungsprozessen ermöglichen. Diese Teilaufgabe ist nicht explizit in der Auflistung von Günther/Tempelmeier enthalten, ist aber von großer Bedeutung, da sich die Allokation von Lagerstufen im Erzeugniszusammenhang insbesondere auf den Punkt *Planungs- und Steuerungskonzepte* auswirkt.

Damit sind die oben aufgelisteten wesentlichen Gesichtspunkte durch diese Teilaufgaben abgedeckt. Lediglich die *Produktionsorganisation* wurde nicht direkt in eine Teilaufgabe überführt. Allerdings werden Ablauf- und Aufbauorganisation der Produktion über die Auswahl des Fertigungsprozesses sowie die Entwicklung von Maschinen- und Mitarbeiterbestand implizit festgelegt.

2.2.2 Aggregation zu Partialmodellen

Aus den oben erläuterten Gründen für die Aufteilung der gesamten Planungsaufgabe in ein hierarchisches Modell lassen sich die Kriterien für die Aufgliederung und die Bildung der Hierarchie der einzelnen Teilmodelle ableiten. Entscheidungen, die auf Grund hoher Anpas-

20 Die bedarfsorientierte Disposition nutzt zunächst reale und prognostizierte Primärbedarfe als Grundlage. Aus diesen, sowie aus Informationen über den Erzeugniszusammenhang werden Sekundärbedarfe ermittelt. Die gesamten Bedarfsmengen werden dann genutzt, um unter Berücksichtigung diverser Restriktionen und Kosteneinflüsse ein möglichst verzögerungsfreies und bestandsarmes Produktionsprogramm zu bestimmen (vgl. [Witt96], S. 1170-1171).

21 Der Meldebestand ist der Wert, bei dessen Unterschreitung ein Beschaffungsvorgang (intern oder extern) ausgelöst wird.

22 Bei der Verwendung eines Bestellzyklus wird in regelmäßigen zeitlichen Abständen kontrolliert, ob die Voraussetzungen für die Auslösung eines Beschaffungsvorgang (intern oder extern) gegeben sind.

23 Die Losgröße gibt die Menge an, die intern oder extern beschafft wird.

sungsaufwände und -dauern langfristige Planungshorizonte erfordern, werden in einer höheren Hierarchieebene des Planungsmodells behandelt. Dabei können hier stärker aggregierte Inputdaten genutzt werden, um eine Planung in hinreichend kurzer Zeit zu ermöglichen und das Datenvolumen bis zum Planungshorizont zu begrenzen und damit eine effiziente Stammdatenpflege zu ermöglichen. Teilmodelle, deren Output kurzfristig änderbare Parameter des Fertigungssystems sind, werden auf tieferen Hierarchieebenen des Planungsmodells mit weniger aggregierten Inputdaten, aber einem kurzfristigeren Planungshorizont betrachtet. Tabelle 2.1 stellt diese Eigenschaften für zwei über- und untergeordnete Hierarchieebenen im hier entwickelten Planungsverfahren im Überblick dar.

| <i>Hierarchieebene</i> | <i>Betrachtungshorizont</i> | <i>Aggregation Inputdaten</i> | <i>Planungshäufigkeit</i> | <i>Aufwand Anpassung</i> |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| übergeordnet | langfristig | hoch | selten | hoch |
| untergeordnet | kurzfristig | gering | häufig | gering |

Tabelle 2.1: Eigenschaften der Hierarchieebenen des Planungsmodells

Entsprechend dieser Tabelle können die in Abschnitt 2.2.1 erarbeiteten Elementaraufgaben zu Partialmodellen aggregiert werden. Die unterschiedlichen Betrachtungshorizonte der einzelnen Hierarchieebenen können als primäres Kriterium genutzt werden, um die Teilprobleme einzuteilen (dies erfolgt im folgenden Abschnitt 2.2.2.1). Als sekundäres Entscheidungskriterium müssen die Abhängigkeiten der einzelnen Teilaufgaben berücksichtigt werden. Auf dieser Basis werden die Teilaufgaben im Abschnitt 2.2.2.2 schließlich in Partialmodelle eingeteilt.

2.2.2.1 Einteilung der Fertigungsplanungs-Teilaufgaben nach ihrem Betrachtungshorizont

Entsprechend der Planungshorizonte kann man die zu bearbeitenden Teilaufgaben zunächst in zwei grundlegende Klassen einteilen (die Partialmodelle werden anschließend jeweils aus Teilaufgaben einer Klasse gebildet). Die Ergebnisse der strategischen Unternehmensplanung bilden dabei wie oben beschrieben einen Teil der exogen gegebenen Variablen der hier entwickelten Modelle.

Der ersten Planungsebene lassen sich die folgenden Teilaufgaben zuordnen, die einen relativ langen Betrachtungshorizont erfordern:

- Auswahl zwischen alternativen Fertigungsprozessen
- Treffen der Make-or-Buy-Entscheidung

-
- Entwicklung des Maschinenbestands
 - Entwicklung des Mitarbeiterbestands
 - Entwicklung der Mitarbeiterqualifikationen

Der zweiten Planungsebene lassen sich die folgenden Teilaufgaben zuordnen. Der benötigte Betrachtungshorizont ist dabei geringer:

- Definition von Lagerstufen
- Auswahl von Dispositionsverfahren
- Konfiguration des Dispositionsverfahrens

2.2.2.2 Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den Fertigungsplanungs-Teilaufgaben

Da die Partialmodelle unabhängig voneinander zur Planung genutzt werden sollen, wobei die Koordinationsprozesse eine gerichtete Kommunikation entlang der Hierarchieebenen definieren, müssen zwei Aufgaben, deren Ergebnisse direkt voneinander abhängen (in beide Richtungen) in einem gemeinsamen Partialmodell bearbeitet werden. Für die einzelnen, auf diese Weise identifizierten Partialmodelle können an dieser Stelle bereits die benötigten Inputdaten (die in Tabelle 2.1 dargestellte Reihenfolge von hohem zu niedrigem Aggregationsgrad ergibt sich dabei implizit) und die Ergebnisse festgelegt werden, so dass jedes einzelne Partialmodell als Blackbox definiert ist.

2.2.2.2.1 Partialmodelle auf der ersten Planungsebene (langer Betrachtungshorizont)

Abbildung 2.5 zeigt die wesentlichen Abhängigkeiten zwischen den auf der ersten Planungsebene identifizierten Teilaufgaben. Die Entscheidungen über die genutzten Fertigungsprozesse, die Make-or-Buy-Entscheidung sowie den Maschinenbestand sind eng miteinander verknüpft. Maschinen werden nur für die Ausführung derjenigen Fertigungsprozesse benötigt, die ausgewählt werden. Auf der anderen Seite muss die Auswahl der Fertigungsprozesse auf einer Kostengröße basieren. Dabei sind insbesondere die benötigten Maschinen ein entscheidender Kostenfaktor. Die Make-or-Buy-Entscheidung hängt wiederum direkt mit dem Maschinenbestand zusammen. Für Erzeugnisse, die zugekauft werden, brauchen keine Kapazitäten zur Fertigung zur Verfügung zu stehen, andererseits konkurriert die Fremdbeschaffung mit der Anschaffung der Maschinen zur Fertigung eines Erzeugnisses.

Die Entscheidungen bezüglich des Mitarbeiterbestands und der Mitarbeiterqualifikationen hängen zwar auch direkt mit den anderen Entscheidungen dieser Ebene zusammen, allerdings kann hier vereinfachend davon ausgegangen werden, dass die Richtung dieser Abhängigkeiten einseitig ist. Voraussetzung hierfür ist die Annahme, dass der Anteil der Kosten, die durch direkt dem Fertigungsprozess zuzuordnende Löhne und Gehälter entstehen, im Vergleich zu den weiteren Kosten (Kapitalkosten und Abschreibungen für Maschinen, Betriebsmittel etc.) gering ist.

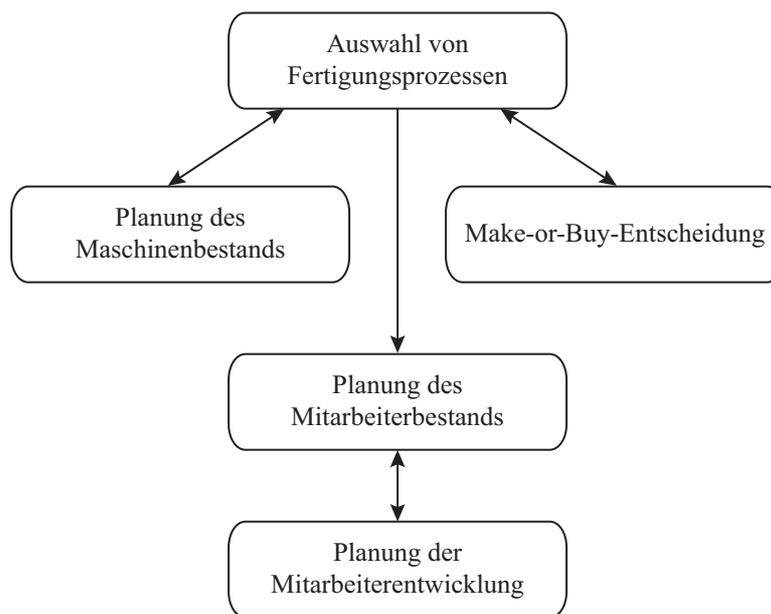


Abbildung 2.5: Abhängigkeiten der Planungsaufgaben auf der ersten Planungsebene

Damit können auf der Ebene mit längerem Betrachtungshorizont zwei Partialmodelle definiert werden. Das erste Modell stellt die Entscheidungen bezüglich der alternativen Fertigungsprozesse, der Make-or-Buy-Entscheidung sowie dem Maschinenbestand dar. Es wird im Folgenden als *Modell I* bzw. *Auswahl von Produktionsprozessen und Planung des Maschinenbestands* bezeichnet. Das zweite Modell baut auf den dort getroffenen Entscheidungen auf und optimiert den Mitarbeiterbestand und die Entwicklung der Qualifikationen. Es wird *Modell II* bzw. *Mitarbeiterplanung* genannt.

2.2.2.2 Partialmodelle auf der zweiten Planungsebene (kurzer Betrachtungshorizont)

Die Planungsaufgaben der zweiten Ebene sind, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, voneinander abhängig. Die Festlegung von Lagerstufen im Erzeugniszusammenhang wird als abhängig von den zugehörigen Meldebeständen dargestellt. Die Hälfte der Meldebestände bestimmt die

Minima für die Durchschnittsbestände auf den Lagerstufen bei verbrauchsorientierter Disposition und damit die davon abhängigen minimalen Kosten für die Bestände. Wiederum werden Meldebestände für genau die Erzeugnisse angelegt, die als Lagerstufe festgelegt werden. Da die Entscheidung über die Nutzung des Bestellzyklus- oder Bestellpunktverfahrens ebenfalls die für die Versorgung benötigte Höhe der Meldebestände beeinflusst, werden diese Aufgaben in einem Partialmodell zusammen mit der Definition von Lagerstufen und der Festlegung des Dispositionsverfahrens integriert dargestellt. Dieses Partialmodell wird im Weiteren als *Modell III* bzw. *Definition von Lagerstufen und Bestimmung der Meldebestände* bezeichnet. Die verbleibende Planungsaufgabe der Festlegung von Losgrößen wird isoliert im hierarchisch auf der untersten Stufe angeordneten Partialmodell *Modell IV* bzw. *Bestimmung optimaler Losgrößen* modelliert.

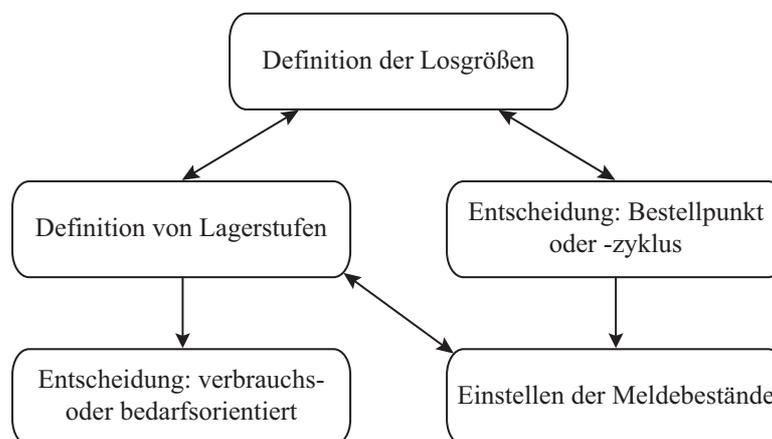


Abbildung 2.6: Abhängigkeiten der Planungsaufgaben auf der zweiten Planungsebene

2.2.3 Hierarchische Darstellung der Partialmodelle

Abbildung 2.7 stellt die zuvor beschriebenen Partialmodelle entsprechend ihrer Hierarchie angeordnet graphisch dar (die Partialmodelle formen die Knoten des Netzwerks) und zeigt die Schnittstellen zwischen ihnen in Form von Kanten.

In dieser Abbildung werden zusätzlich zu den bisher beschriebenen Partialmodellen die Ebene der strategischen Unternehmensplanung und ihre Ergebnisse dargestellt. Die Planungsprozesse dieser Ebene werden hier zwar nicht näher betrachtet, allerdings sind die Ergebnisse die Basis für die Planung auf den anderen Ebenen. Es werden drei verschiedene Gruppen von Eingangsparametern aus der strategischen Ebene unterschieden:

- *Zieldefinitionen* (z. B. maximale Lieferzeit): Die Zieldefinitionen der Unternehmensleitung gehen in die Restriktionen der hier definierten Planungsmodelle als Minimal-

oder Maximalwerte ein, die die entsprechenden Variablen des Planungsmodells begrenzen.

- *Entwicklung der Systemumwelt* (insbesondere die Entwicklung der Primärbedarfe): Die Entwicklung der Systemumwelt beschreibt die Rahmenbedingungen der Planungsmodelle. Sie stellt im eigentlichen Sinne kein Ergebnis einer Planung auf strategischer Ebene dar, sondern ist eine Schätzung der zukünftigen Entwicklung einiger Parameter. Die Grundlage für diese Schätzungen können dabei Vergangenheitsdaten sowie Kenntnisse über die Zukunft, z. B. bereits existierende Aufträge oder Rahmenverträge, bilden. Allerdings sind in diesen Schätzungen implizit Planungsergebnisse der strategischen Planung enthalten, z. B. die Definition des Erzeugnisspektrums.
- *Strategiealternativen* (z. B. alternative Fertigungsprozesse): Für einige Entscheidungen der hier definierten Partialmodelle werden auf übergeordneter Ebene Alternativen definiert, aus denen dann in den Modellen ausgewählt wird.

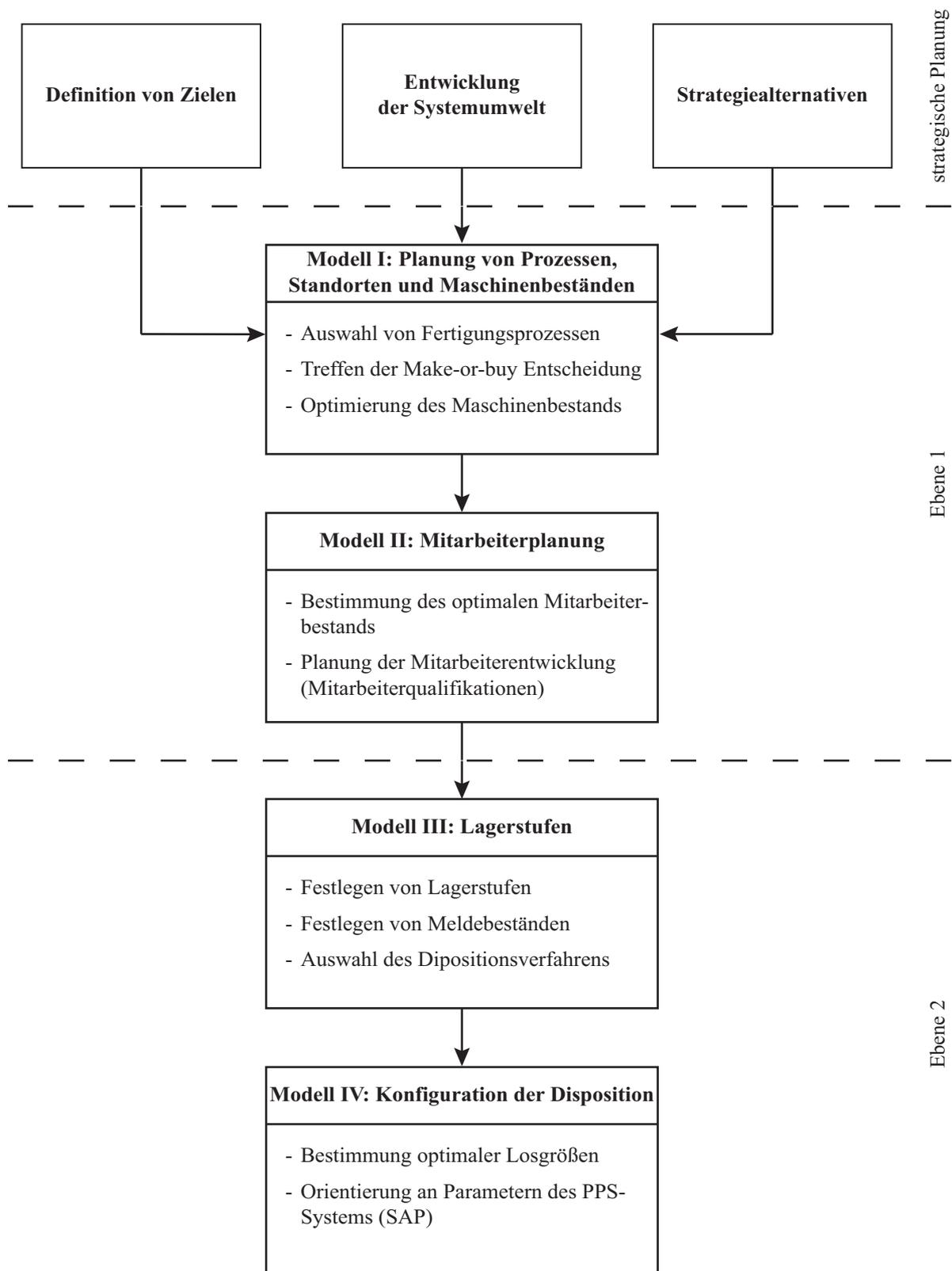


Abbildung 2.7: Hierarchische Darstellung der Partialmodelle

3 Stand der Technik

3.1 Hierarchische Planung von Fertigungssystemen

Die Bearbeitung komplexer und umfangreicher Planungsaufgaben führt bei Lösung durch optimale Verfahren zu nicht praxistauglichen Laufzeiten. So stellt die simultane Planung mit einem Totalmodell im Zusammenhang mit einem Solver²⁴ zwar eine Lösungsmöglichkeit für die Planungsaufgabe dar, allerdings führt diese Methode bei einem großen Umfang der Planungsaufgaben trotz gesteigener Performance²⁵ zu hohen Laufzeiten. Bei der Einbindung der Modelle in die Geschäftsprozesse eines Unternehmens kann es daher zu Problemen kommen, wenn die Wartezeit für die Lösung begrenzt ist. Ein weiteres Problem in der betrieblichen Praxis ist, dass häufig nur die Lösung für einige Teilaufgaben benötigt wird, was bei der Nutzung von Totalmodellen immer auch eine Lösung der gesamten Planungsaufgabe nach sich zieht. Um diese Probleme zu umgehen werden Methoden der hierarchischen Planung eingesetzt. Der Ansatz der hierarchischen Planung wird im folgenden Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Abschnitt 3.1.2 fasst grundlegende Arbeiten zur hierarchischen Planung zusammen, ohne dass diese einen konkreten Bezug zur Problemstellung haben müssen. In Abschnitt 3.1.3 werden dann relevante Vorarbeiten, die die Methode der hierarchischen Planung für die Planung von Fertigungssystemen nutzen, beschrieben.

24 Ein Solver ist eine Software zur Bearbeitung linearer und gemischt-ganzzahliger Probleme. Er findet eine optimale Lösung entweder auf Grundlage des Simplex-Algorithmus (sucht die optimale Lösung, indem er den Rand des Bereichs zulässiger Variablenkombinationen untersucht) oder eines Interior Point-Verfahrens (diese beginnen mit einer im Inneren des Bereichs zulässiger Variablenkombinationen liegenden Lösung) (vgl. [DoDr05], S.21).

25 Der Simplex-Algorithmus wurde bereits Ende der 40er Jahre durch George B. Dantzig entwickelt und vorgestellt. Aufgrund der Entwicklung im Bereich der Computerhardware sowie der Weiterentwicklung der Lösungsmethoden seit über 50 Jahren ist deren Anwendbarkeit auch für relativ große praktische Probleme gegeben (vgl. [SuMe06], S.78).

3.1.1 Hierarchische Planung

Der grundsätzliche Ansatz der Methoden der hierarchischen Planung ist, dass die gesamte Planungsaufgabe in Partialmodelle zerlegt wird, wodurch sich Optimierungsaufgaben ergeben, deren Lösung einen geringeren Aufwand darstellt (vgl. [Stad96], S. 631). Dieses Vorgehen kann durchaus analog zur Aufgabenteilung in Unternehmen gesehen werden: Auf der obersten Ebene des Top-Managements werden diejenige Entscheidungen getroffen, die einen langfristigen Charakter haben. Hierdurch erfolgt die strategische Ausrichtung des Unternehmens. Außerdem werden hier Rahmenbedingungen für die weiteren Ebenen geschaffen, d. h. es werden Regeln beschlossen, an die sich die weiteren Entscheidungsträger zu halten haben. Die folgende Ebene nutzt diese Entscheidungen als Input um wiederum Entscheidungen zu treffen, die allerdings einen kurzfristigeren Charakter haben usw. Auf der untersten Ebene werden schließlich kurzfristige, operative Entscheidungen getroffen, z. B. die Reihenfolgeplanung für eine konkrete Maschine. Dabei ist zu beachten, dass die Entscheidungen der übergeordneten Ebenen, z. B. Prioritätsregeln oder grundsätzlich zu nutzende Planungsverfahren, eingehalten werden müssen.

Die einzelnen Partialmodelle der Planungsaufgabe werden anschließend durch Koordinationsprozesse miteinander verbunden. Durch die koordinierte Lösung der Partialmodelle sowie dynamische Einbindung von Feedback-Schleifen (d. h. von der Ebene des untergeordneten Partialmodells wird Information an die übergeordnete Ebene zurückgegeben) ergibt sich dann eine Lösung für das gesamte Planungsproblem. Dieses Verfahren findet zwar nicht immer die optimale Lösung, es wird allerdings angestrebt, durch sinnvolle Aufteilung der Teilaufgaben in die Partialmodelle sowie die Feedback-Schleifen zu einer insgesamt guten Lösung zu kommen.

Die Planungsaufgabe wird dabei, wie für das hier betrachtete Problem bereits in 2.2 geschehen, hierarchisch in Partialmodelle zerlegt. Die sich dabei ergebende eindeutige Beziehung der Unter- und Überordnung zwischen den Partialmodellen lässt bereits die grundsätzliche Ausrichtung für die Koordinationsprozesse erkennen. Die Ergebnisse der übergeordneten Partialmodelle stellen Eingangsgrößen für die untergeordneten Partialmodelle dar. In den Koordinationsprozessen muss also zunächst eine Lösung für das jeweils übergeordnete Partialmodell gefunden werden, bevor das untergeordnete gelöst werden kann.

3.1.2 Grundlegende Arbeiten zur hierarchischen Planung

3.1.2.1 Hierarchische Modelle nach Rieper

Rieper entwickelte bereits 1979 einen systemtheoretischen Bezugsrahmen für hierarchische Modelle (vgl. [Riep79]). Sein Ansatz wird in Abschnitt 3.1.3.2 detailliert dargestellt, da er auch eine konkrete Umsetzung eines Systems zur hierarchischen Planung von Fertigungssystemen beschreibt. Die Erwähnung an dieser Stelle ist allerdings notwendig, da er ebenfalls einen Bezugsrahmen für die Konzeption hierarchischer Planungsverfahren darstellt. Die Umsetzung erfolgt dabei in Form von Basis- bzw. Grundmodellen, die betriebliche Systeme in ihrer prinzipiellen Funktionsweise wiedergeben. Die einzelnen Basismodelle werden zeitlich sowie sachlich miteinander verknüpft und bilden damit ein hierarchisch strukturiertes System. Der Input, die Struktur und die Funktionsweise des Systems bestimmen dabei den Output. Rieper teilt das betriebliche System in zwei Ebenen ein. Anschließend entwickelt er verschiedene hierarchische Strukturen, die die Ordnung in den Planungsprozessen betrieblicher Systeme darstellen. Darauf aufbauend formuliert er ein hierarchisches Grundmodell betrieblicher Systeme.

3.1.2.2 Konzeptioneller Rahmen nach Schneeweiß

Schneeweiß hat einen grundlegenden konzeptionellen Rahmen für die hierarchische Modellierung von Planungsproblemen definiert (vgl. [Schn94]). Er beschreibt hierarchische Planungsprobleme in Form von stochastischen dynamischen Programmen. Dieser Ansatz wird im Folgenden näher erläutert, da er im Weiteren die Basis der Darstellung von hierarchischen Planungsproblemen bildet und die wesentlichen Elemente definiert.

Ansatzpunkt eines stochastischen dynamischen Programms ist das N -stufige Optimierungskriterium C sowie eine Zustandstransformationsbeziehung, die in den Gleichungen 3.1 und 3.2 gegeben ist.

$$C = E \left\{ \sum_{t=0}^N C_t(z_{t+1}, a_t) \right\} \quad (3.1)$$

$$z_{t+1} = G_t(z_t, a_t, r_t) \quad (3.2)$$

Dabei gilt, dass N die Anzahl der Stufen im dynamischen Programm ist, C_t das Optimierungskriterium, z_t der Zustand, a_t die Entscheidung und r_t die stochastische Störung jeweils für die Stufe t . C stellt damit den Erwartungswert der Summe der Werte der Optimierungskriterien aller Stufen dar. Die Zustandstransformationsbeziehung zeigt, wie aus dem Zustand der unter-

geordneten Stufe t , der Entscheidung auf dieser Stufe sowie der stochastischen Störung bestimmt werden kann, welcher Zustand auf der folgenden Stufe eingenommen wird.

Die Optimierung des dynamischen Programms ist stufenweise durchführbar. Dazu wird eine Wertfunktion f_t wie in Gleichung 3.3 angegeben formuliert, die einen Zielfunktionswert für die jeweilige Stufe t angibt.

$$f_t(z^t) = \max_{a_t \in A_t(z^t)} E \left\{ C_t(z_{t+1}, a_t) + f_{t+1}(z^{t+1}) \mid z^t \right\} \quad (3.3)$$

Über den Vektor $z^t = (z_t, z_{t-1}, \dots, z_0)$ wird die Zustandsvergangenheit, also die Zustände aller vorhergehenden Stufen angegeben. Die Menge $A_t(z^t)$ definiert für diese Zustandsvergangenheit den resultierenden Entscheidungsraum der Stufe t . Die Abarbeitung der Funktionalgleichungen erfolgt dann in einer Rückwärtsrekursion. Schneeweiß illustriert dieses Vorgehen anhand eines auf zwei Stufen begrenzten Problems wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Es wird zunächst in der Top-Ebene das zweistufige dynamische Programm gelöst, dessen Ergebnis allerdings nur als Lösung der ersten Planungsaufgabe genutzt wird. Es wird also eine optimale Entscheidung $a_1^{T^*}$ für die Top-Ebene unter Beachtung der Basis-Ebene aus der Menge $A_t(z^t)$ ausgewählt.

Anschließend wird dieses Ergebnis genutzt, um die zweite Stufe zu lösen. Im Rahmen der dynamischen Programmierung, die die Stufen mit aufeinander folgenden Perioden identifiziert, wird die Lösung der zweiten Stufe erst in der zweiten Periode, also auf der zweiten Ebene (hier Basis-Ebene genannt) gelöst. Das Ergebnis ist die optimale Entscheidung $a_2^{B^*}$, wobei 2 dafür steht, dass die Entscheidung auf Stufe 2 getroffen wurde und B den Geltungsbereich, nämlich die Basis-Ebene darstellt.

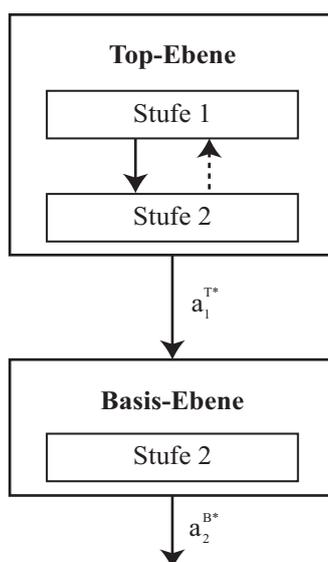


Abbildung 3.1: Dynamische Programmierung als hierarchische Planung²⁶

Die Bezeichnungen Top-Ebene und Basis-Ebene werden genutzt, um den Zusammenhang zur hierarchischen Planung darzustellen. Auf der Top-Ebene wird bei der Planung, die sich auf ihre Stufe 1 bezieht, bereits Wissen über die untergeordnete Basis-Ebene mit einbezogen. Die Basis-Ebene wird an dieser Stelle (durch eine Antizipationsfunktion) antizipiert. Dabei stellt die Antizipationsfunktion allerdings nur einen (unvollständigen) Informationsstand der Top-Ebene bezüglich der Basis-Ebene dar. Das Ergebnis der Planung auf der Top-Ebene ist eine entsprechend der antizipierten Reaktionen der Basis-Ebene günstige Entscheidung, die als $a_1^{T^*}$ bezeichnet wird.

Die Entscheidung der Top-Ebene bestimmt den Zustand $z_2^{B^*}$ und wird anschließend der Basis-Ebene mitgeteilt. Diese trifft darauf aufbauend die Entscheidung $a_2^{B^*}$. Diese muss nicht der antizipierten Reaktion auf der Top-Ebene entsprechen, da die antizipierte Basis-Ebene das Verhalten der realen Basis-Ebene nur ungenau wiedergeben kann.

Aus dieser Abbildung der hierarchischen Planung auf die dynamische Programmierung leitet Schneeweiß das in Abbildung 3.2 dargestellte allgemeine Schema hierarchischer Planung ab. Dabei stellt er die Information, die auf der Top-Ebene über das Basis-Modell für die Antizipation desselben genutzt wird, als Feedforward-Einfluss dar. Das Ergebnis $a_1^{T^*}$ der Top-Ebene wird hier als Instruktion bezeichnet. Außerdem wird zusätzlich zum Top-Down-Einfluss eine Feedback-Schleife eingeführt. Das Ergebnis der Planung auf der Basis-Ebene kann so zu einer erneuten Planung auf der Top-Ebene führen. In Form eines mehrstufigen Aushandlungspro-

²⁶ Vgl. [Schn94], S. 162

zesses zwischen den Ebenen werden dann die finalen Entscheidungen getroffen. Eine Feedback-Schleife muss nicht notwendigerweise in einem System zur hierarchischen Planung umgesetzt werden.

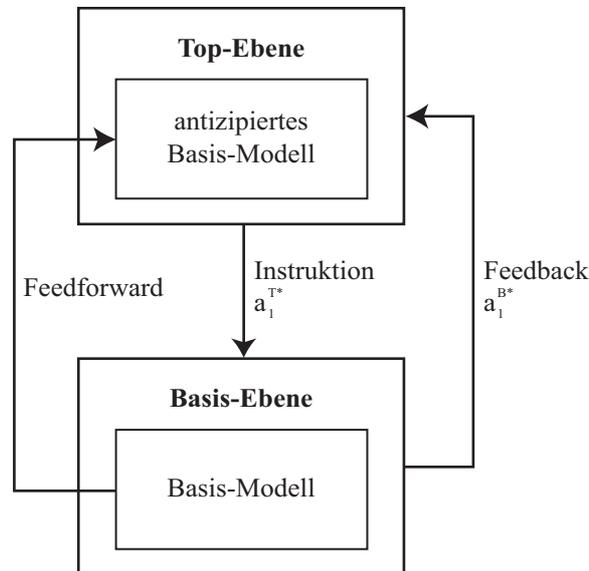


Abbildung 3.2: Allgemeines Schema hierarchischer Planung nach Schneeweiß²⁷

Das so entwickelte allgemeine Schema hierarchischer Planung kann bei Nichtberücksichtigung des Aushandlungsprozesses formal beschrieben werden. Dies ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Das Top-Modell M^T nutzt die Feedforward-Information FF , die es über das Basis-Modell besitzt, die Antizipationsfunktion AF , die die Reaktionen des Basis-Modells estimiert, sowie den Informationsstand I_t^T . Das Ergebnis a^{T*} der Planung auf der Top-Ebene wird der Basis-Ebene als Instruktion $IN(a^{T*})$ mitgeteilt. Das Basis-Modell M^B nutzt diese Instruktion sowie den Informationsstand I_t^B . Dabei wird definiert, dass $t' \geq t$ gilt, das heißt, die Basis-Entscheidung muss nicht gleichzeitig mit der Top-Entscheidung fallen, sie erfolgt im Normalfall zu einem späteren Zeitpunkt.

²⁷ Vgl. [Schn94], S. 163

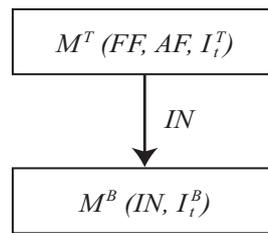


Abbildung 3.3: Formale Darstellung hierarchischer Planung²⁸

3.1.3 Vorarbeiten im Bereich der hierarchischen Planung von Fertigungssystemen

3.1.3.1 Hierarchische Planung nach Anthony

Der erste Ansatz zur hierarchischen Anordnung der Aufgaben zur Planung von Fertigungssystemen wurde 1965 von Anthony entwickelt (vgl. [Anth65]). Er nutzt eine Einteilung in drei Ebenen für sein hierarchisches Modell:

- **Strategic Planning:** „Die strategische Planung ist der Entscheidungsprozess bezüglich der Unternehmensziele, Änderungen dieser Ziele, der Ressourcen, die genutzt werden, um diese Ziele zu erreichen und der Richtlinien, die genutzt werden, um diese Ressourcen zu akquirieren, zu nutzen und zu disponieren“ ([Anth65], S. 16, eigene Übersetzung). Beispiele für Planungsaufgaben dieser Ebene sind die Auswahl neuer Produktlinien sowie das Festlegen von Personal-, Finanz-, Marketing- oder Entwicklungsrichtlinien.
- **Management Control:** „Management Control ist der Prozess, durch welchen Manager sicherstellen, dass Ressourcen zur Durchführung der Unternehmensziele effektiv und effizient beschafft und genutzt werden“ ([Anth65], S. 17, eigene Übersetzung). Beispiele für Planungsaufgaben dieser Ebene sind das Festlegen von Budgets, die Gestaltung von Werken, sowie die Auswahl von Produktinnovationen.
- **Operational Control:** „Die operative Kontrolle ist der Prozess zur Sicherstellung der effektiven und effizienten Durchführung spezifischer Aufgaben“ ([Anth65], S. 18, eigene Übersetzung). Beispiele für Planungsaufgaben dieser Ebene sind die Terminierung der Produktion, die Kontrolle von Beständen, sowie die Kontrolle der Einstellung von Mitarbeitern.

²⁸ Vgl. [Schn94], S. 163

Diese Einteilung der einzelnen Teilaufgaben in Ebenen, die anschließend zur zeitlich abgestuften Planung genutzt werden, wird in später entwickelten Ansätzen zur hierarchischen Planung im Bereich der Produktion übernommen. Dabei wird die durch Anthony getroffene Benennung der Ebenen allerdings häufig durch die allgemeineren Bezeichnungen strategische, taktische und operative Planung ersetzt (vgl. [Reus06]), und die Einteilung wird entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung angepasst. Insbesondere die Teilaufgaben, die Anthony den Ebenen Management Control und Operational Control zuordnet, werden häufig aufgegriffen (vgl. [Swit89], S. 5).

3.1.3.2 Hierarchisches betriebliches System von Rieper

Bei der Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens hierarchischer betrieblicher Systeme (vgl. [Riep79]) entwirft Rieper auch ein konkretes dreistufiges hierarchisches System. Er zerlegt dazu zunächst das gesamte betriebliche System in zwei Ebenen, zwischen denen bereits eine eindeutige hierarchische Struktur gegeben ist:

- Das betriebliche Informations- und Entscheidungssystem, das die Leistungsprozesse des betrieblichen Systems enthält, die das Verhalten dieses Systems steuern, lenken, regeln oder beeinflussen.
- Das betriebliche Realisationssystem, das die Leistungsprozesse des betrieblichen Systems enthält, deren Output der Systemumwelt zugute kommt, die also die Realisierungsaufgabe erfüllen.

Die zweistufige Struktur dieses Ansatzes lässt dabei keine direkten Auswirkungen der Entscheidungen des Top-Systems (das betriebliche Informations- und Entscheidungssystem) auf die Systemumwelt zu, wie sie im konzeptionellen Rahmen von Schneeweiß vorgesehen sind. Das betriebliche Informations- und Entscheidungssystem bestimmt lediglich Steuergrößen für das System auf der Basis-Ebene (das betriebliche Realisationssystem). Das betriebliche Realisationssystem entspricht in diesem Ansatz weitgehend der Ebene Operational Control im Modell von Anthony.

Rieper teilt anschließend das betriebliche Informations- und Entscheidungssystem in seine beiden Bestandteile Informationssystem und Entscheidungssystem. Dabei soll das betriebliche Informationssystem dem Entscheidungssystem die notwendigen Informationen über das Verhalten des untergeordneten Realisationssystems liefern. Damit nimmt das Informationssystem in der Nomenklatur späterer Veröffentlichungen die Rolle der Antizipationsfunktion ein, um Feedforward-Informationen in die Prozesse der übergeordneten Entscheidungsebene einfließen zu lassen.

Rieper klassifiziert mögliche Varianten hierarchischer Strukturen betrieblicher Systeme wie in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Kriterien, nach denen diese hierarchischen Strukturen eingeteilt werden können, sind:

- *Art der Ordnungsrelation:* Es können zwei durch unterschiedlichen Eigenschaften beschriebene Ordnungsrelationen zwischen den Einheiten der Systeme unterschieden werden. Im Falle einer vollständigen Ordnung zwischen den Systemeinheiten ist jede Einheit des dekomponierten Systems jeder anderen Einheit entweder über- oder untergeordnet. Im Falle einer strikten partiellen Ordnung hingegen können eine oder mehrere Einheiten zu den anderen Einheiten in einer Über- oder Unterordnungsbeziehung stehen.
- *Anzahl der zentralen Systeme:* Diese Anzahl legt fest, ob auf der obersten Hierarchieebene der Struktur genau ein zentrales System existiert oder mehrere zentrale Systeme existieren können.
- *Anzahl der Unterordnungsbeziehungen:* Gibt an, ob einem System jeweils genau ein System auf der untergeordneten Hierarchiestufe zugeordnet ist, oder ob mehrere untergeordnete Systeme möglich sind.

Nachdem Rieper die möglichen formalen hierarchischen Konzepte analysiert und klassifiziert hat, überträgt er sie auf betriebliche Entscheidungssysteme. Er formuliert ein Grundmodell hierarchisch strukturierter betrieblicher Systeme aufbauend auf den Ebenen „betriebliches Realisationssystem“, „betriebliches Objektentscheidungssystem“ und „betriebliches Koordinationsentscheidungssystem“. Eine konkrete Umsetzung der Partialmodelle, z. B. in Form von mathematischen Modellen, findet bei Rieper nicht statt.

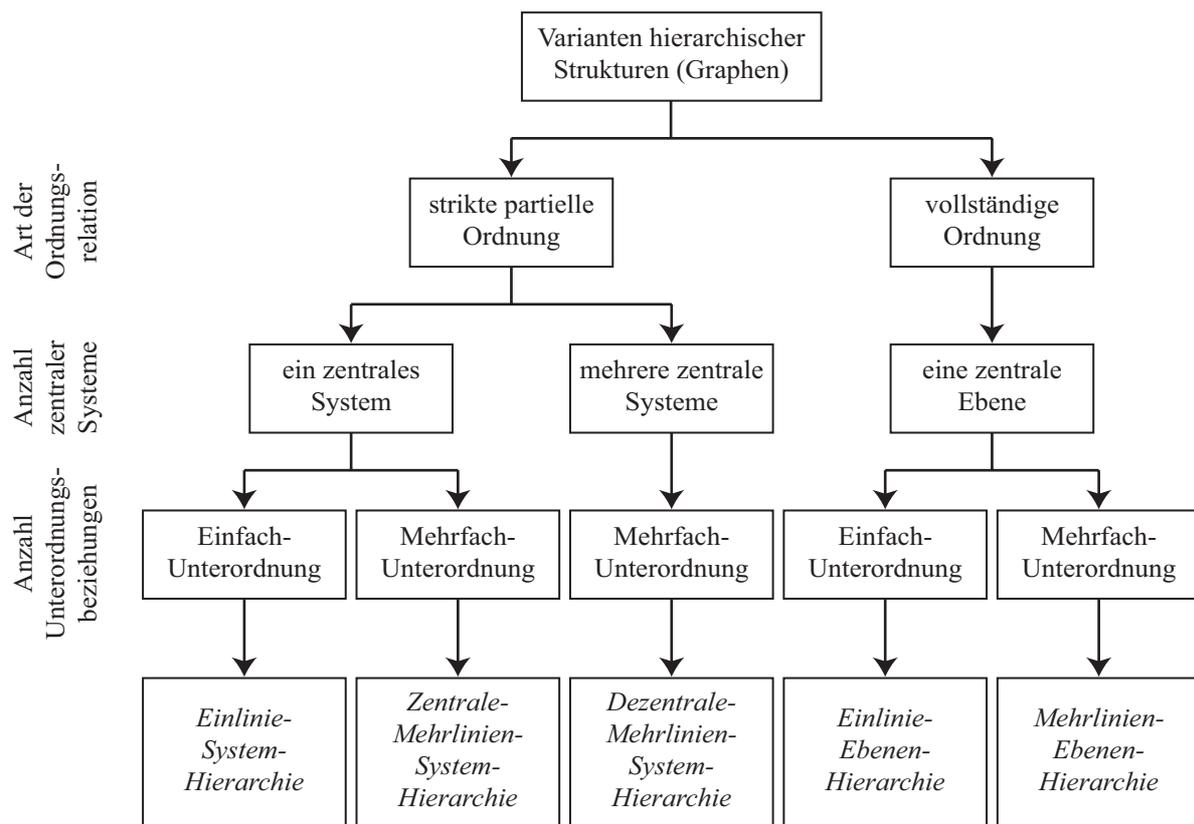


Abbildung 3.4: Varianten hierarchischer Strukturen²⁹

3.1.3.3 Hierarchische Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung

Boysen et. al. [BFS06] stellen ein hierarchisches Planungssystem für die Variantenfließfertigung³⁰ vor. Dabei werden für die folgenden Planungsaufgaben Verfahren aus der Literatur dargestellt, die anschließend wie in Abbildung 3.5 dargestellt in ein hierarchisches System integriert werden:

- Fließbandabstimmung (unterteilt in Ersteinstallation und Rekonfiguration)
- Produktionsprogrammplanung
- Reihenfolgeplanung (unterteilt in Bestimmung der Ausgangsreihenfolge und Resequencing)

²⁹ Vgl. [Riep79], S.140

³⁰ „Die Produktionsform der Variantenfließfertigung erlaubt es, unterschiedliche Varianten eines Grundmodells gemeinsam auf einem Fließsystem in wahlfreier Reihenfolge (Losgröße 1) zu fertigen. Auf diese Weise wird auch der effizienten Fließfertigung eine kundenindividuelle Anpassung ihrer Produkte (Mass-Customization) zugänglich gemacht.“ ([BFS06], S. 759)

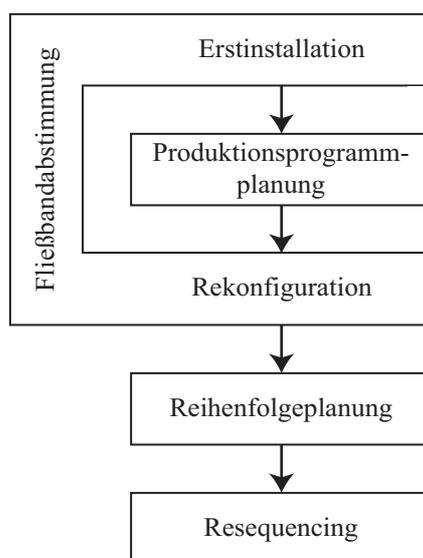


Abbildung 3.5: Hierarchische Planung bei der Variantenfließfertigung³¹

Bei diesem Ansatz ist zu beachten, dass er der hier betrachteten Problemstellung zwar thematisch ähnlich ist, sich allerdings direkt an den Erfordernissen der Variantenfließfertigung, wie sie z. B. in der Automobil- oder der Elektroindustrie vorherrscht, orientiert. Durch diese Spezifität bezüglich des Produktionssystems kann das Verfahren nicht direkt auf das dieser Arbeit zugrunde liegende Anwendungsszenario des Unternehmens aus der Schienenfahrzeugindustrie angewendet werden. Die dem Modell von Boysen et. al. zu Grunde liegenden Planungsaufgaben weichen von den Problemstellungen der in Abschnitt 2.2 herausgearbeiteten Partialmodelle des Anwendungsszenarios ab.

3.1.3.4 Robuste hierarchische Produktionsplanung mit Bedarfsszenarien

Gebhard und Kuhn (vgl. [GeKu07]) entwerfen ein zweistufiges hierarchisches Planungsverfahren für die Produktionsplanung. Auf der oberen Planungsebene (aggregierte Planung) werden für einen mittelfristigen Planungshorizont Entscheidungen über den Aufbau saisonaler Lagerbestände und die Erweiterung der vorhandenen Kapazitäten durch Überstunden getroffen. Auf der untergeordneten Planungsebene werden die kurzfristigen (operativen) Produktionspläne entwickelt. Zur Lösung der Planungsaufgaben entwerfen sie jeweils ein mathematisches Modell.

Um die zum Planungszeitpunkt existierende Unsicherheit über die Entwicklung gewisser Parameter (insb. der Nachfragemengen) zu berücksichtigen, stellen Gebhard und Kuhn diese in Abhängigkeit unterschiedlicher Szenarien dar. Die Zielfunktion für die Planungsmodelle bil-

³¹ Vgl. [BFS06], S.762

det in Anlehnung an Scholl (vgl. [Scho01], S. 240) die Summe der relativen Abweichungen vom optimalen Zielfunktionswert des jeweiligen Szenarios. Die Autoren zeigen anschließend die Anwendbarkeit des hierarchischen Planungssystems in Form einer beispielhaften Fallstudie.

3.1.3.5 Advanced Planning and Scheduling (APS) Systeme

Advanced Planning and Scheduling (APS) Systeme stellen eine Erweiterung von klassischen ERP Systemen dar. Eine allgemein anerkannte Definition des Begriffs existiert derzeit nicht. Gemeinsames Kennzeichen von APS Systemen ist, dass sie Planungsfunktionalitäten zur Verfügung stellen, die in den bestehenden Produkten nicht verfügbar sind, aus spezialisierten Softwaremodulen bestehen (vgl. [Reus06], S. 49) und auf dem Konzept der hierarchischen Planung beruhen (vgl. [Stad08], S. 19). Die einzelnen Module des hierarchischen APS Systems werden durch heuristische Methoden oder mathematische Optimierungsmodelle umgesetzt. Die Verbreitung von APS Systemen als Basis für die Planungs- und Steuerungsaufgaben nimmt in den Unternehmen zu, das jährliche Marktwachstum wird auf 10-20% geschätzt (vgl. [BDPR03], S. 110).

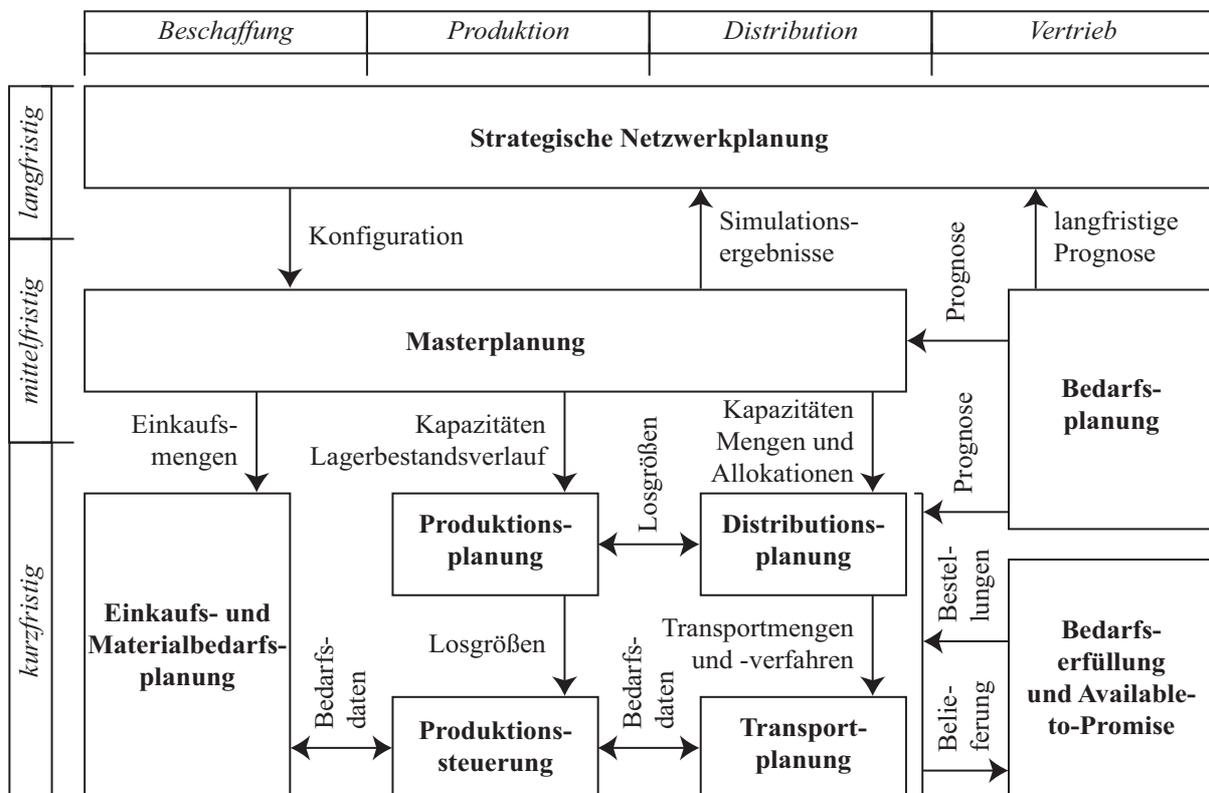


Abbildung 3.6: Modularer Aufbau von APS Systemen³²

32 Vgl. [Rohd08], S. 249

Die Entwicklung von APS Systemen fand durch kommerzielle Anbieter von ERP Systemen parallel statt, ohne dass eine generische (akademische fundierte) Basis für die Struktur dieser Systeme genutzt wurde. Allerdings wurden bei nachgelagerten Untersuchungen der Systeme Übereinstimmungen in der Struktur und den einzelnen Elementen nachvollzogen. Rohde (vgl. [Rohd08], S. 248) entwickelte daraus die in Abbildung 3.6 dargestellte herstellerunabhängige Struktur.

Die einzelnen Module von APS Systemen beschreibt Rohde (vgl. [Rohd08], S. 248-250) wie folgt:

- *Strategische Netzwerkplanung*: Die Strategische Netzwerkplanung konfiguriert die Supply Chain, d. h. es werden die Lokationen der Entitäten und die Distributionskanäle zwischen diesen Entitäten festgelegt. Die Datenbasis hierfür bilden Prognosedaten der langfristigen Bedarfsplanung (Trends in der Bedarfsentwicklung) und Simulationsergebnisse für Masterpläne. Die Rahmenbedingungen der strategischen Netzwerkplanung bilden die strategischen Ziele der Supply Chain.
- *Bedarfsplanung*: Die Bedarfsplanung prognostiziert Bedarfsdaten für die mittelfristige Masterplanung und die kurzfristige Produktions- und Distributionsplanung. Dabei bilden die Prognosen für die Endprodukte der Supply Chain die Eingangsdaten für die Masterplanung. Die kurzfristigen Planungsmodule verwenden genauere und weniger aggregierte Prognosen.
- *Masterplanung*: In der Masterplanung werden auf aggregierter Ebene Pläne für die gesamte Supply Chain bestimmt. Daher wird dieser Baustein in den meisten Umsetzungen von APS Systemen durch einen zentralen Partner der Supply Chain übernommen. Die Ergebnisse der Masterplanung sind Beschaffungs-, Produktions- und Distributionspläne, die für die verteilten Partner der Supply Chain einen Rahmen festlegen, innerhalb dessen sich das operative Programm bewegt. In diese Planung fließen in Form von aktuellen Bestandsdaten, Prognosen und Kapazitätsauslastungen Daten aus der operativen Ebene ein. Außerdem bietet die durchschnittliche Planerfüllung der operativen Durchführung eine Feedbackfunktion für die Masterplanung.
- *Bedarfserfüllung und Available-to-Promise (ATP)*: In diesem Modul wird festgelegt, welche Liefertermine in der Supply Chain zugesagt bzw. festgelegt werden können. Dabei wird eine Vielzahl von Planungsergebnissen als Einflussgrößen berücksichtigt: Bedarfsprognosen aus der Bedarfsplanung, Produktionsstammdaten für End- und Zwischenprodukte, Distributionspläne und detaillierte logistische Routingpläne, Beschaffungspläne und die Auswahl der Lieferanten. Außerdem gibt es auch hier eine Feed-

backfunktion aus den Ergebnissen der operativen Durchführung, die zur Anpassung der Modelle genutzt werden kann.

- *Produktionsplanung und -steuerung*: Den Rahmen für die Produktionsplanung und -steuerung bilden die Pläne der übergeordneten Masterplanung. Allerdings wird hier auf einer disaggregierten Ebene gearbeitet, die eine entsprechende Datenbasis benötigt. Die operativen Pläne, die hier erstellt werden, werden mit der Einkaufs- und Materialbedarfsplanung abgestimmt. Außerdem findet eine Koordination mit der Distributions- und Transportplanung statt.
- *Einkaufs- und Materialbedarfsplanung*: Die Einkaufs- und Materialbedarfsplanung betreibt auf mittelfristiger und kurzfristiger Ebene die Auswahl von Lieferanten, die Vereinbarung von Beschaffungsplänen und entsprechender Verträge. Die Inputdaten bilden auf mittelfristiger Ebene die Mengengerüste, die sich aus der Masterplanung ergeben. Auf der operativen Ebene ergibt sich die Beschaffung aus den Produktionsplänen sowie den kurzfristigen Prognosedaten.
- *Distributions- und Transportplanung*: Die kurzfristige Distributions- und Transportplanung ähnelt den Modulen Produktionsplanung und -steuerung und ist mit diesen eng verknüpft. Die zuvor bestimmten Losgrößen und Bedarfsdaten ermöglichen es, einen Distributionsplan zu erstellen. Als weiterer Input werden hier Prognosen und Bestelldaten aus den Modulen Bedarfsplanung sowie Bedarfserfüllung und ATP herangezogen.

Betge entwickelt auf Basis dieser Darstellung der Module von APS Systemen einen Koordinationsansatz, der die Abhängigkeiten der einzelnen Module voneinander berücksichtigt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass in den einzelnen Modulen konsistente Pläne erstellt werden. Der Ansatz beschränkt sich dabei allerdings auf die APS-Module Masterplanung, Produktionsplanung und Produktionssteuerung. Die Struktur des Konzepts von Betge und die Abhängigkeiten und Informationsbeziehungen zwischen den Modulen sind in Abbildung 3.7 dargestellt.

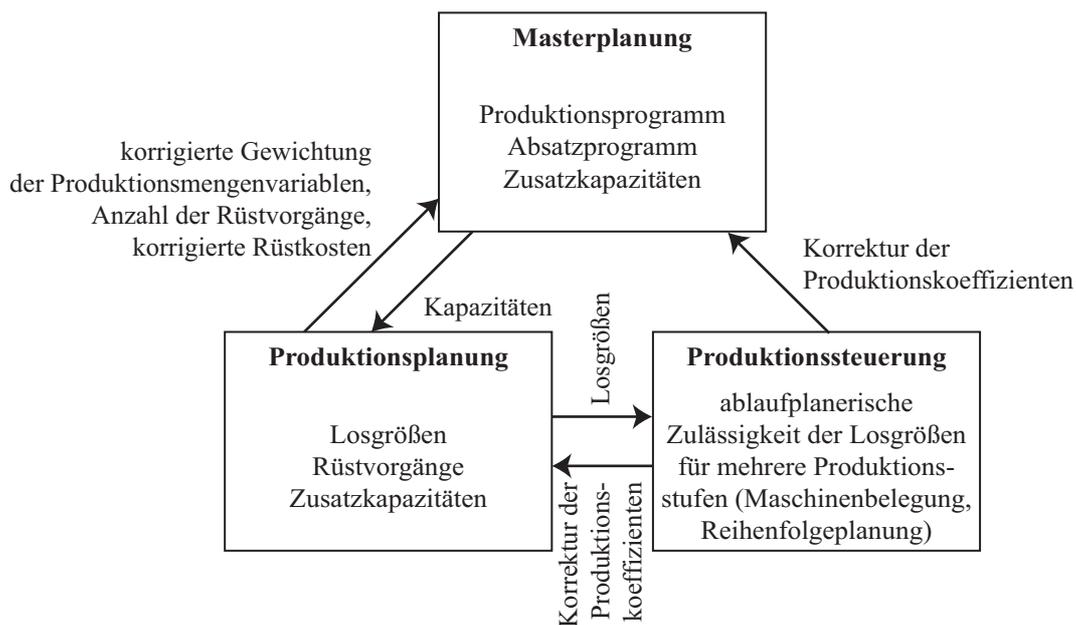


Abbildung 3.7: Hierarchisches Modell von APS Systemen nach Betge³³

3.1.3.6 Beispiel für APS Systeme: SAP Advanced Planner & Optimizer

Der SAP Advanced Planner & Optimizer (SAP APO) ist eine konkrete Umsetzung eines APS Systems der Firma SAP, das hier als die am meisten verbreitete Lösung vorgestellt werden soll. Damit wird der Stand der Technik von in der Praxis genutzten APS Systemen erfasst und damit die Nutzung von hierarchischen Planungsansätzen in betrieblichen Prozessen analysiert. Des Weiteren bietet sich SAP APO als APS-Lösung für das der Ausarbeitung zu Grunde liegende Praxisbeispiel an, da sich in dem betrachteten Unternehmen bereits ein System der Firma SAP im Einsatz befindet. Damit kann die Struktur von SAP APO als Maßstab dienen, ob das hier entwickelte System in die Systemlandschaft des Unternehmens integriert werden kann.

SAP APO erweitert die ERP-Software SAP ERP um Module zur Produktionsplanung und -steuerung insbesondere auch über Unternehmensgrenzen hinweg. Dadurch ermöglicht SAP APO ein aktives Supply Chain Management mit einer direkten Anbindung an die Stamm- und Bewegungsdaten eines SAP ERP Systems.

Die einzelnen in Abbildung 3.8 dargestellten SAP APO-Applikationskomponenten übernehmen im System die folgenden Funktionen:

³³ Vgl. [Betg06], S. 160

- *APO-DP (Absatzplanung)*: „Die Absatzplanung bietet umfangreiche Möglichkeiten einer Prognose auf Basis aggregierter Vergangenheitsdaten“ ([BaLa06], S. 17). Normalerweise bilden eine Vertriebsprognose sowie Vergangenheitsdaten (Zeitreihen) die Datenbasis für die Absatzplanung. Auf diesen Daten kann eine Vielzahl statistischer Funktionen durchgeführt werden, die Trendkomponenten und saisonale Schwankungen identifizieren können. Außerdem können Lebenszyklusmodelle und Promotionen berücksichtigt werden. APO-DP stellt unterstützende Funktionalitäten für die kollaborative Absatzplanung zur Verfügung (vgl. [Dick06], S. 33-82).

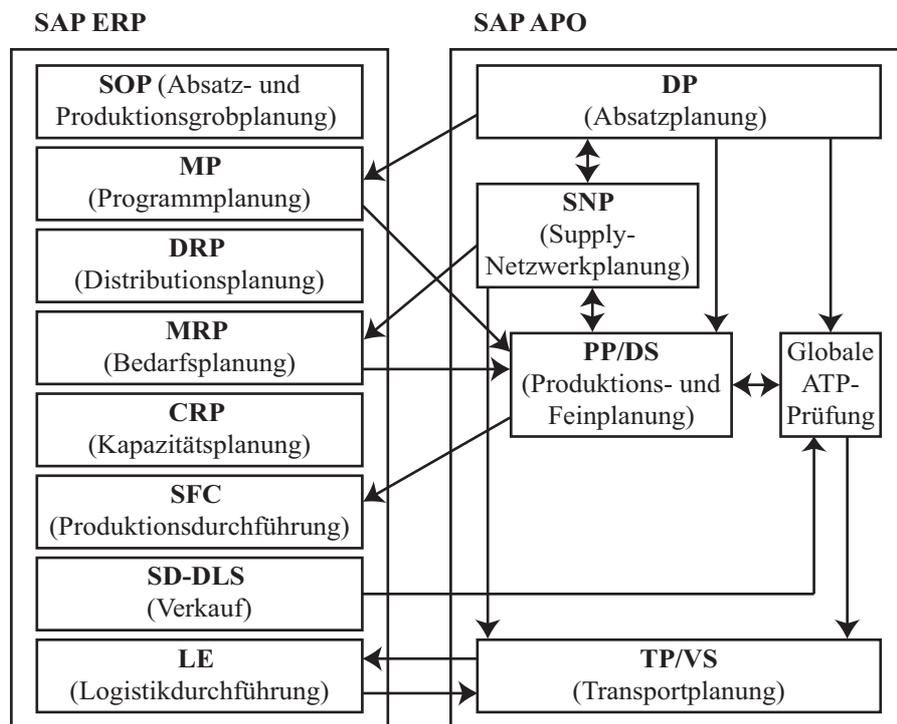


Abbildung 3.8: Applikationskomponenten von SAP APO und Integration mit SAP ERP³⁴

34

- *APO-SNP (Supply-Netzwerkplanung)*: „Ziel des Supply Network Planning ist eine werksübergreifende Beschaffungsplanung im mittel- bis langfristigen Zeithorizont. Typisch ist die Verwendung aggregierter Daten (vereinfachte Stammdaten, periodenorientierte Planung“ (vgl. [BaLa06], S. 17). Es werden Bezugsquellen, Produktionspläne, Distributionspläne und Einkaufspläne festgelegt. Zur Erstellung der Pläne werden Optimierungsalgorithmen sowie heuristische Verfahren genutzt. Es wird dem Planer eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt, über die er Regeln und Lagerhaltungsverfahren definieren kann (vgl. [Hopp07], S. 445).

³⁴ Vgl. [Pati06], S. 12

- *APO-PP/DS (Produktions- und Feinplanung)*: „Mit der Produktions- und Feinplanung wird die werksbezogene (kapazitive) Feinplanung im kurzfristigen Zeithorizont vorgenommen“ (vgl. [BaLa06], S. 17). Die Produktions- und Feinplanung kann insbesondere im Verbund mit der Supply-Netzwerkplanung genutzt werden. Dann plant die Produktions- und Feinplanung den Kurzfristhorizont und die Supply-Netzwerkplanung den sich anschließenden Mittel- bis Langfristhorizont. Die Stammdaten, die in der Supply-Netzwerkplanung benötigt werden, werden in diesem Fall zum Teil aus denen der Produktions- und Feinplanung generiert (vgl. [BaLa06], S. 18).
- *APO-TT/VS (Transportplanung)*: Die Applikationskomponenten APO-TT/VS führt „die Transportplanung bis hin zur Routen- und Transportmittelloptimierung“ (vgl. [BaLa06], S. 18) durch. Hier werden die Transportaufträge gesammelt und zu zuvor festgelegten Zeitpunkten eine Planung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Planung werden anschließend im SAP ERP Modul LE (Logistics Execution) für die Logistikdurchführung genutzt.

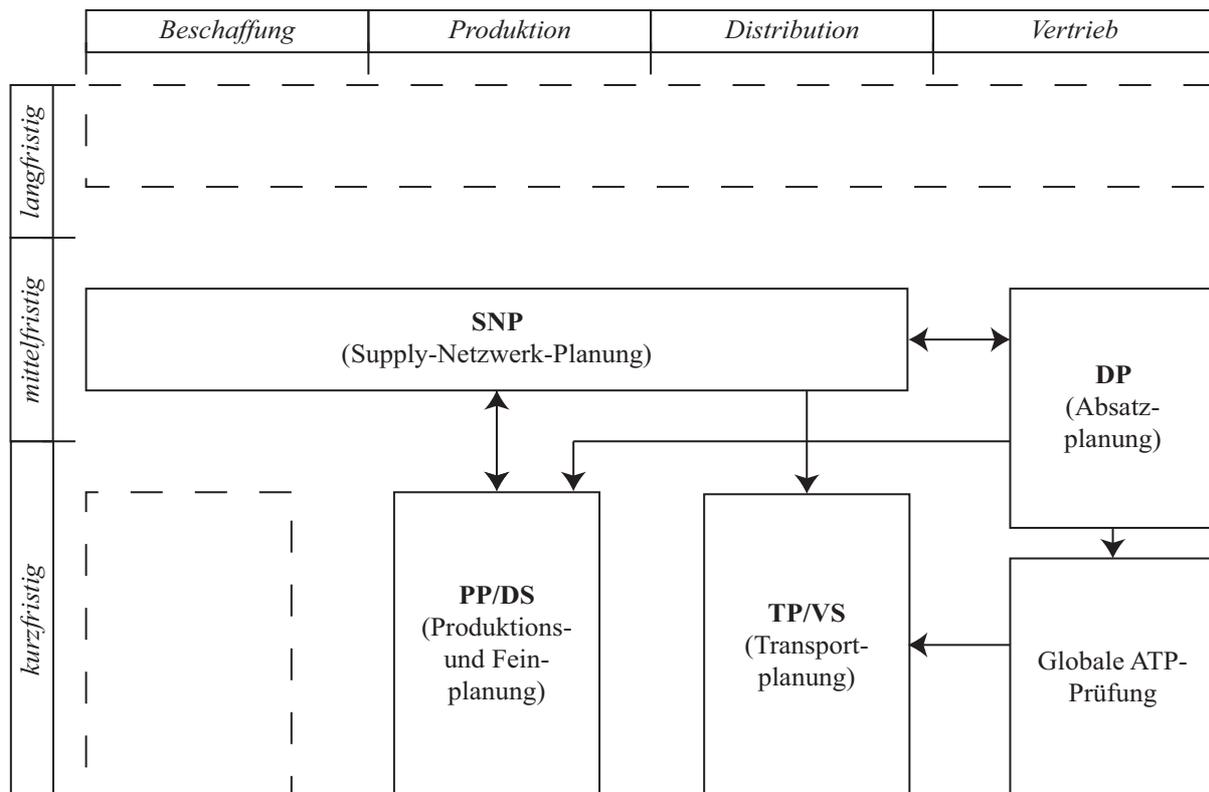


Abbildung 3.9: SAP APO Struktur als Teil der generischen Struktur von APS Systemen³⁵

³⁵ Vgl. [MRS+08], S. 363

- *Globale ATP-Prüfung*: Die globale ATP-Prüfung stellt Funktionen zur Verfügung, mit denen geprüft werden kann, ob ein Liefertermin für ein Produkt zugesagt werden kann. Dies erfolgt auf Grundlage der Produktverfügbarkeitsprüfung, der Kontingentierung (Verfügbarkeitsprüfung gegen zuvor festgelegte Kontingente), der Vorplanungsprüfung (Verfügbarkeitsprüfung gegen eine bestehende Vorplanung) oder einer Kombination dieser Verfahren (vgl. [Hopp07], S. 431-432).

Meyer et al. bilden die Applikationskomponenten von SAP APO auf die Module der in Abbildung 3.6 dargestellten generische Struktur von APS Systemen ab (vgl. [MRS+08], S. 362-364), wie in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Zuordnungen zwischen generischen Modulen und Applikationskomponenten stellt Tabelle 3.1 dar.

In SAP APO sind die meisten Module der generischen Strukturierung von APS Systemen umgesetzt. Lediglich eine Komponente für die Einkaufs- und Materialbedarfsplanung sowie für die Strategische Netzwerkplanung sind nicht enthalten. Dies bedeutet, dass eine langfristige Planung in SAP APO nicht integriert ist.

| <i>Generisches Modul in APS Systemen</i> | <i>SAP APO Applikationskomponente</i> |
|---|--|
| Strategische Netzwerkplanung | nicht vorhanden |
| Masterplanung | APO-SNP (Supply-Netzwerkplanung) |
| Bedarfsplanung | APO-DP (Absatzplanung) |
| Bedarfserfüllung und Available-to-Promise | Globale ATP-Prüfung |
| Einkaufs- und Materialbedarfsplanung | nicht vorhanden |
| Produktionsplanung | APO-PP/DS (Produktions- und Feinplanung) |
| Produktionssteuerung | APO-PP/DS (Produktions- und Feinplanung) |
| Distributionsplanung | TP/VS (Transportplanung) |
| Transportplanung | TP/VS (Transportplanung) |

Tabelle 3.1: Abbildung von generischen Modulen und Applikationskomponenten

3.2 Mathematische Losgrößenprobleme

Die im Rahmen dieser Ausarbeitung entworfenen, hierarchisch angeordneten mathematischen Modelle sollen auf einer einheitlichen Struktur beruhen. Dafür bieten sich insbesondere mathematische Modelle zur Losgrößenbildung an. Da diese Modelle die relevanten Eigenschaften aufweisen, um als Basis der in 2.2 definierten Partialmodelle zu dienen, wird an dieser Stelle auf die Darstellung weiterer Standardmodelle verzichtet.

Mathematische Modelle zur Losgrößenbildung bestimmen aufbauend auf den Primärbedarfen der Erzeugnisse eines Unternehmens sowie diversen Rahmenbedingungen wie den verfügbaren Ressourcen, erforderlichen Rüstzeiten, diversen Kostenkomponenten etc. optimale Produktionslose. Durch Nutzung dieser Standardmodelle als Basis für die hier entwickelten Modelle wird bereits der Rahmen für deren Formulierung vorgegeben, wodurch sich einige grundlegende Voraussetzungen implizit ergeben. Diese Voraussetzungen sind ausschlaggebend für die Entscheidung, mathematische Modelle zur Losgrößenbildung als Basis der Modellformulierung zu nutzen:

- Zeitmodell für die Formulierung der Modelle
- Zu- und Abflüsse der Verbrauchsfaktoren und Sicherstellung der Nichtnegativität von Bestandswerten
- Ableitung von Sekundärbedarfen durch Stücklistenauflösung

In der Standardliteratur (vgl. [Temp06]) wird eine Vielzahl von Losgrößenproblemen mathematisch beschrieben. Diese unterscheiden sich darin, welche Parameter bzw. Zusammenhänge im Modell berücksichtigt werden, und von welchen abstrahiert wird. Beispiele hierfür sind:

- **Verfügbare Kapazität:** Einige Modelle unterstellen unbegrenzte Kapazitäten, andere bieten die Möglichkeit, die Kapazitäten für die dargestellten Maschinen zu begrenzen.
- **Möglichkeit der Bedarfsunterdeckung:** Ist eine Bedarfsunterdeckung zum Ende einer Planungsperiode möglich, so werden für diesen Fall meist Strafkosten in der Zielfunktion verrechnet.
- **Darstellung mehrerer Produkte:** Einprodukt-Modelle stellen nur die Produktion eines einzelnen Produkts dar, Mehrprodukt-Modelle zeigen den in der betrieblichen Praxis in der Regel vorherrschenden Fall.
- **Darstellung des Erzeugniszusammenhangs:** Bei mehrstufigen Erzeugnisstrukturen müssen diese zur Bestimmung der Sekundärbedarfe herangezogen werden, wobei sich der Bedarfszeitpunkt aus dem Verbrauchszeitpunkt ergibt.

Außerdem können Losgrößenmodelle in Small Bucket- und Big Bucket-Modelle unterschieden werden. Small Bucket-Modelle sind dadurch gekennzeichnet, dass in einer Periode pro Maschine jeweils nur ein Produkt hergestellt werden kann. In Big Bucket-Modellen ist diese Restriktion aufgehoben, die Periodenlänge ist so groß, dass mehrere Produkte in einer Periode produziert werden können. Eine Erweiterung bilden Modelle mit Linked Lotsizes (vgl.

[DEWZ93]). Hierbei wird der Rüstzustand der Maschinen am Ende der Perioden als Anfangszustand für den Beginn der Folgeperiode vorgegeben. Auf diese Weise können Lose, die über Periodengrenzen hinweg reichen, dargestellt werden.

Die Darstellung der Losgrößenprobleme an dieser Stelle beschränkt sich auf die für die Arbeit relevanten Probleme. In den folgenden Abschnitten werden daher die Big Bucket-Modelle Capacitated Lot Sizing Problem (Abschnitt 3.2.1) und das Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem (Abschnitt 3.2.2) beschrieben. Warum sich gerade die hier dargestellten Modelle als Basis der hier entwickelten Partialmodelle anbieten, wird in Kapitel 4 ausgeführt. Eine umfassende Übersicht mathematischer Losgrößenprobleme findet sich u. a. bei Tempelmeier (vgl. [Temp06]).

3.2.1 Capacitated Lot Sizing Problem

Das Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP) betrachtet mehrere Produkte, für die Bedarfe vorliegen, und die um eine Menge knapper Ressourcen konkurrieren (vgl. [Salo91], S. 30). Dabei wird jeweils eine bestimmte Teilmenge der Ressourcen für die Produktion eines Produkts benötigt. Die zur Verfügung stehende Kapazität der Ressourcen darf in jeder Periode nicht überschritten werden. Dieses Modell wird nach Tempelmeier (vgl. [Temp06], S. 161-162) ergänzt um Verzugskosten und angepasst an die Nomenklatur dieser Arbeit, wie folgt dargestellt.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{n^E} \sum_{j=1}^{n^P} (b_{ij}^R \cdot t_i^R \cdot c^R + x_{ij}^P \cdot t_i^P \cdot c^P + \max(x_{ij}^L, 0) \cdot c_i^L - \min(x_{ij}^L, 0) \cdot c_i^V) \quad (3.4)$$

$$\text{s.t.} \quad x_{ij-1}^L + x_{ij}^P - x_{ij}^L = n_{ij}^B \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.5)$$

$$x_{ij}^P - M \cdot b_{ij}^R \leq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^{n^E} (t_{ij}^P \cdot x_{ik}^P + t_{ij}^R \cdot b_{ik}^R) \leq t_{jk}^{KW} \quad \begin{array}{l} \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.7)$$

$$x_{ij}^P \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.8)$$

$$x_{i0}^L = 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (3.9)$$

$$x_{in^P}^L = 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (3.10)$$

Die in Gleichung 3.4 dargestellte Zielfunktion des CLSP besteht aus einer Doppelsumme über alle Erzeugnisse, die hergestellt werden, sowie über alle Perioden des Zeitmodells. In jedem Summanden wird wiederum die Summe aus drei Bestandteilen gebildet: Rüstkosten, Produk-

tionskosten und Lager- und Verzugskosten. Die Rüstkosten berechnen sich als Produkt einer binären Rüstvariable, der Rüstzeit und des Rüstkostensatzes. Äquivalent ergeben sich die Produktionskosten aus Produktionsmenge, Produktionszeit und Produktionskostensatz. Besteht am Ende einer Periode ein positiver Lagerbestand, so fallen Lagerkosten an. Diese enthalten neben den direkten Kosten auch indirekte Bestandteile wie die Kapitalkosten. Ist der Lagerbestand negativ, so müssen für den Lieferverzug Strafkosten gezahlt werden. Über den Minimum- und den Maximum-Operator werden Perioden mit positivem bzw. negativem Lagerbestand identifiziert.

Die in Gleichung 3.5 dargestellte Restriktion ist die Gleichgewichtsbedingung für Produktion, Bedarf und Lagerbestand. Die Summe aus dem Lagerbestand der Vorperiode x_{ij-1}^L und der Produktionsmenge x_{ij}^P abzüglich der Lagermenge am Ende der betrachteten Periode x_{ij}^L muss den Bedarf n_{ij}^B ergeben. Durch Gleichung 3.6 wird sichergestellt, dass Erzeugnis i in Periode j nur dann produziert werden kann, wenn in dieser Periode der entsprechende Rüstvorgang durchgeführt wird.

Durch Gleichung 3.7 wird die verwendete Kapazität jedes Werkzeugs in jeder Periode begrenzt. Dazu wird die Summe der Rüstzeiten und der Produktionszeiten über alle Erzeugnisse gebildet. Die Rüstzeit ist abhängig davon, ob für das jeweilige Erzeugnis in der Periode gerüstet wird, die Produktionszeit ist linear abhängig von der Produktionsmenge. Diese Summe muss für jedes Werkzeug kleiner oder gleich der zugehörigen Kapazität sein. Gleichung 3.8 ist die Nichtnegativitätsbedingung für die Produktionsmengen, Gleichungen 3.9 und 3.10 stellen sicher, dass der Lagerbestand zu Beginn der ersten Periode und am Ende der letzten Periode 0 ist.

3.2.2 Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem

Das Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem (MLCLSP) (vgl. [MaWa91], S. 1236) erweitert das CLSP für einen mehrstufigen Produktionsprozess. In der hier dargestellten Variante des MLCLSP wird nicht nur die Lagerung von Erzeugnissen über Periodengrenzen hinweg erlaubt, es wird außerdem eine verspätete Produktion ermöglicht, die durch Verzugskosten bewertet wird.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{n^E} \sum_{j=1}^{n^W} \sum_{k=1}^{n^P} (b_{ijk}^R \cdot t_{ij}^R \cdot c_j^R + x_{ijk}^P \cdot t_{ij}^P \cdot c_j^P) + \sum_{i=1}^{n^E} \sum_{j=1}^{n^P} (\max(x_{ij}^L, 0) \cdot c_i^L - \min(x_{ij}^L, 0) \cdot c_i^V) \quad (3.11)$$

$$\text{s.t.} \quad b_{ijk}^R \leq b_{ij}^{PW} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.12)$$

$$n_i^{R_{max}} \geq \sum_{j=1}^{n^W} b_{ijk}^R \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.13)$$

$$x_{ijk}^P \leq M \cdot b_{ijk}^R \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^{n^E} (b_{ijk}^R \cdot t_{ij}^R + x_{ijk}^P \cdot t_{ij}^P) \leq t_{jk}^{KW} \quad \begin{array}{l} \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.15)$$

$$x_{ik}^L = x_{ik-1}^L + \sum_{j=1}^{n^W} x_{ijk}^P - n_{ik}^B - \sum_{l=1}^{n^E} \sum_{j=1}^{n^W} g_{il} \cdot x_{ljk}^P \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.16)$$

$$0 \leq x_{i0}^L + \sum_{j=1}^{n^W} \sum_{l=1}^k x_{ijl}^P - \sum_{m=1}^{n^E} \sum_{j=1}^{n^W} \sum_{l=1}^{\min(k+t_i^V, n^P)} g_{im} \cdot x_{mjk}^P \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.17)$$

$$x_{ijk}^P \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (3.18)$$

$$x_{i0}^L = 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (3.19)$$

$$x_{in^P}^L = 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (3.20)$$

Die Zielfunktion des MLCLSP, dargestellt in Gleichung 3.11, ist die Minimierung der Summe der auftretenden Kosten. Dabei werden in der ersten Summe die Rüstkosten und die Produktionsstückkosten über alle Erzeugnisse, Werkzeuge und Perioden aufaddiert. Die zweite Summe addiert für jedes Erzeugnis in jeder Periode entweder die Kosten für Lagerhaltung oder die Verzugskosten, je nachdem, ob der Bestand x_{ij}^L am Ende der Periode größer oder kleiner als 0 ist.

Gleichung 3.12 stellt sicher, dass ein Werkzeug nur für die Produktion eines Erzeugnisses gerüstet wird, das auf ihm gefertigt werden kann. Die Matrix der Binärvariable b_{ij}^{PW} bildet dafür die erlaubten Werkzeug-Erzeugnis-Kombinationen ab. Durch Gleichung 3.13 wird die Anzahl der Rüstvorgänge je Periode durch die Obergrenze $n^{R_{max}}$ begrenzt. Die in Gleichung 3.14 dargestellte Restriktion begrenzt die in Periode k mit Werkzeug j von Erzeugnis i zu produzierende Menge x_{ijk}^P so, dass nur dann die Produktion stattfinden kann, wenn auch ein entsprechender Rüstvorgang eingeplant ist.

Die Zeit, die ein Werkzeug pro Periode zur Verfügung steht, ist begrenzt. Daher wird in Gleichung 3.15 eine Restriktion definiert, die die Summe der Rüst- und Produktionszeiten je Maschine und Periode auf der linken Seite summiert und diese durch die insgesamt zur Verfügung stehende Zeit t_{jk}^{KW} begrenzt.

Gleichung 3.16 berechnet die Variable x_{ik}^L , die den Lagerbestand bzw. die Fehlmenge des Erzeugnisses i am Ende der Periode k angibt. Dazu wird zu dem Lagerbestand bzw. der Fehlmenge der Vorperiode die aufsummierte Produktionsmenge über alle Werkzeuge und die Bedarfsmenge addiert. Die Bedarfsmenge ergibt sich dabei aus den externen Bedarfen n_{ik}^B und den Sekundärbedarfen. Sekundärbedarfe wiederum berechnen sich aus dem Produkt des Faktors g_{il} , der angibt, wie groß der direkte Verbrauch von Erzeugnis l für die Herstellung einer Mengeneinheit von Erzeugnis i ist, und der Produktionsmenge des Erzeugnisses l .

Das Zulassen von Lieferrückständen in Gleichung 3.16 sorgt zwar für eine größere Realitätsnähe der mathematischen Problemmodellierung, aber es muss sichergestellt werden, dass sich trotzdem immer ein realisierbares Programm ergibt, in dem die Sekundärbedarfe gedeckt werden. Diese Forderung erfüllt die in Gleichung 3.17 dargestellte Restriktion, die besagt, dass die Summe des Lagerbestandes zum Zeitpunkt 0 und der Produktionsmengen bis zum Ende jeder Periode größer oder gleich der Summe des Sekundärbedarfs bis zu dieser Periode sein muss. In Gleichung 3.18 wird die Nichtnegativität der Produktionsmengen sichergestellt, in Gleichungen 3.19 und 3.20 wird der Lagerbestand zu Beginn der ersten Periode und am Ende der letzten Periode auf 0 gesetzt.

4 Zu leistende Arbeit

In diesem Kapitel wird dargestellt, welche Arbeiten in Kapitel 5 zu leisten sind, um die in Kapitel 2 definierte Problemstellung unter Berücksichtigung des in Kapitel 3 beschriebenen Stands der Technik der relevanten Bereichen zu lösen. Insbesondere werden Anforderungen definiert, die sich daraus ergeben, dass die Ergebnisse sich in die im Stand der Technik dargestellten Basismodelle integrieren sollen.

4.1 Einordnung in APS Systeme

Das hier entworfene System soll sich in die durch Rohde definierten Module von APS Systemen (vgl. [Rohd08]) einpassen. Damit ist es möglich, das hier entworfene System in APS Systeme zu integrieren und so eine Nutzbarkeit auch im Zusammenspiel mit Modulen bestehender Systeme einzusetzen.

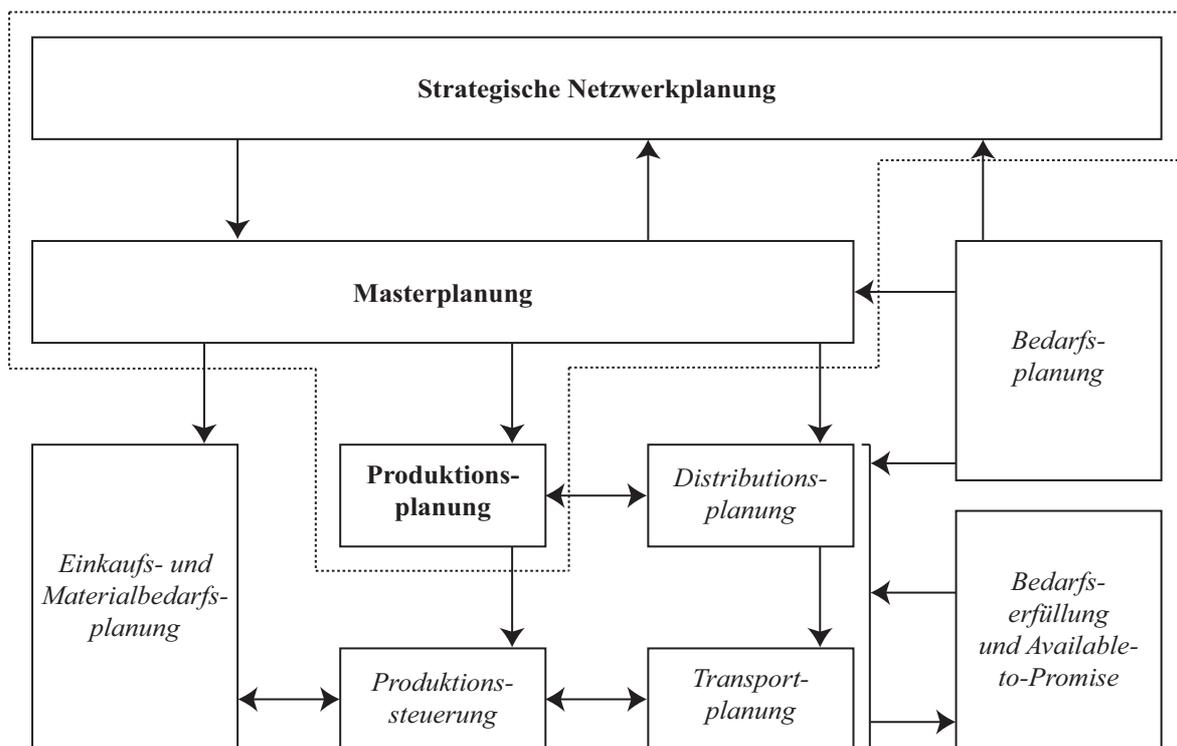


Abbildung 4.1: Einordnung der Problemstellung in die Module von APS Systemen

Abbildung 4.1 hebt in der Darstellung von APS Systemen nach Rohde die Module hervor, die durch den im Rahmen dieser Ausarbeitung entwickelten Ansatz abgedeckt werden. Die Entscheidungen der Partialmodelle I und II lassen sich teilweise im Modul Strategische Netzwerkplanung, also der Konfiguration des Fertigungsnetzwerks, sowie im Modul Masterplanung finden. Die Masterplanung wird dabei insbesondere zur Unterstützung der Planung genutzt, indem über sie bestimmt wird, ob eine Netzwerkkonfiguration für dessen operative Nutzung geeignet ist. Diese Verwendung entspricht der (gerichteten) Beziehung zwischen Masterplanung und Strategischer Netzwerkplanung mit der Bezeichnung Simulationsergebnisse, die Rohde in seiner strukturellen Darstellung der Module (vgl. Abbildung 3.6) zeigt. Die Partialmodelle III und IV finden sich in den durch Rohde definierten Modulen Masterplanung und Produktionsplanung. Sie legen, wie im modularen System nach Rohde, in der operativen Fertigungssteuerung zu nutzende Parameter wie die Losgröße, Lagerstufen im Fertigungsnetzwerk und Lagerbestände fest.

Allerdings geht die dieser Ausarbeitung zu Grunde liegende Problemstellung über den Funktionsumfang und Betrachtungshorizont von APS Systemen hinaus. Insbesondere die Definition von Maschinenbeständen, die Standortentscheidung und die langfristige Mitarbeiterplanung inklusive der Entwicklung von Qualifikationen werden in APS Systemen nicht betrachtet.

4.2 Koordinationsprozesse

Die Arbeiten von Schneeweiß (vgl. [Schn94], S. 163-164, [Schn02], S. 294) geben den grundsätzlichen konzeptionellen Rahmen wie in Abbildung 3.2 dargestellt vor, an dem sich die hierarchischen Modelle und die zwischen den Partialmodellen zu definierenden Prozesse und Informationsflüsse orientieren sollen. Ein Modell auf der übergeordneten Ebene antizipiert bereits für seine Planung Feedforward-Informationen über untergeordnete Modelle. Seine Ergebnisse bilden in Form einer Instruktion einen Teil des Inputs für diese. Schließlich kann es Feedback-Schleifen geben, in denen Informationen entgegen der Hierarchie kommuniziert werden. In den Prozessen, die Kapitel 5 definiert, werden durch die Feedback-Schleifen Regelkreise festgelegt. Diese Regelkreise ermöglichen es, Lösungen aus übergeordneten Partialmodellen zu verwerfen und einen neuen Optimierungslauf zu starten, wenn diese zu nicht praktikablen Lösungen auf den untergeordneten Ebenen geführt haben.

4.3 Nutzung von mathematischen Losgrößenproblemen

Die mathematischen Modelle, die im nächsten Kapitel konzipiert werden, sollen auf Standardmodellen der Losgrößenbildung aufbauen. Um eine effiziente Optimierung auf Basis der Modelle zu ermöglichen, sollen möglichst viele, für die Lösungsfindung irrelevante, Parameter

bzw. Zusammenhänge ausgeblendet werden. Daher ist die Nutzung des CLSP dem MLCLSP vorzuziehen, wenn auf die Betrachtung der Mehrstufigkeit in der Erzeugnisstruktur wie im Produktionssystem verzichtet werden kann. Dies wird im Partialmodell IV genutzt, es wird aufbauend auf dem CLSP entwickelt. Primär- und Sekundärbedarfe werden entsprechend der Abrufe vor der Ausführung des Programms summiert und dann aggregiert betrachtet. In den Partialmodellen I und II wird hingegen das MLCLSP als Basis genutzt, da hier die zu nutzenden Fertigungsprozesse noch nicht festgelegt sind und damit die Betrachtung des Erzeugniszusammenhangs notwendig ist. Partialmodell III baut nicht auf mathematischen Losgrößenproblemen auf.

4.4 Berücksichtigung der Unsicherheit

Aufbauend auf dem in Abschnitt 3.1.3.4 beschriebenen Vorgehen von Gebhard und Kuhn (vgl. [GeKu07]) zur Berücksichtigung der Unsicherheit der Entwicklung der Bedarfsmengen, soll in den hier entwickelten mathematischen Modellen die Zukunft in Form von Szenarien dargestellt werden. Den Szenarien soll jeweils die Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens zugewiesen werden, die für eine Gewichtung in der Zielfunktion genutzt wird. Damit können unterschiedliche Quellen für die Lösung der Problemstellung genutzt werden und auch Ausnahmefälle berücksichtigt werden, die mit einer entsprechend geringen Wahrscheinlichkeit gewichtet werden.

5 Konzeption

In diesem Kapitel wird die Konzeption des integrierten hierarchischen Planungsverfahrens zur Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen dargestellt. Die Struktur des Verfahrens ist bereits durch die in Abschnitt 2.2 hergeleiteten Partialmodelle bestimmt. Außerdem wurden dort für jedes Partialmodell die Eingangsgrößen und Ergebnisse festgelegt.

Zunächst werden in Abschnitt 5.1 gemischt-ganzzahlige mathematische Programme entwickelt, die die Teilaufgaben der Partialmodelle abbilden. Diese Formulierungen können direkt durch eine Optimierungssoftware genutzt werden, um eine optimale Lösung für die jeweiligen Partialmodelle zu bestimmen. Die Variablen, die die Lösungen darstellen, müssen den Schnittstellen zu untergeordneten Partialmodellen entsprechen, die wie die verwendete Datenbasis während der Schnittstellendefinition festgelegt werden. In untergeordnete Partialmodelle gehen sie anschließend als Parameter ein.

Die Schnittstellen der Partialmodelle bilden die Basis, um im folgenden Abschnitt 5.2 Koordinationsprozesse zu definieren, die das Planungsverfahren steuern und damit die Lösung der Fertigungsplanungs-Teilaufgaben zu einer Lösung der gesamten Fertigungsplanungs-Aufgabe integrieren. Zusätzlich zu dem bereits durch die hierarchische Struktur der Modelle vorgegebenen linearen Ablauf der Planung werden hier Kennzahlen der gefundenen Lösungen in den Koordinationsprozessen genutzt, um bei einer Neuplanung eine den Unternehmenszielen entsprechende Lösungen zu gewährleisten. Entspricht die auf einer untergeordneten Hierarchiestufe gefundene Lösung nicht den zuvor definierten Anforderungen, so findet eine erneute Planung auf der übergeordneten Ebene statt. Hiermit wird die Feedback-Schleife im konzeptionellen Rahmen von Schneeweiß umgesetzt. Durch Anpassungsprozesse wird eine regelmäßige oder durch relevante Ereignisse hervorgerufene Neuplanung betroffener Partialmodelle initiiert, so dass sichergestellt wird, dass der Plan sich stets an den sich ändernden Gegebenheiten orientiert.

5.1 Definition von Planungsmodellen

Nachdem in Abschnitt 2.2 die Struktur der Planungsmodelle entwickelt wurde, wobei die Partialmodelle nur als Blackbox definiert wurden, werden sie in diesem Abschnitt in Form mathematischer Modelle dargestellt. Die so ausformulierten Partialmodelle dienen in den anschließend entwickelten Koordinationsprozessen zur Lösung der in den Partialmodellen beinhalteten Teilprobleme.

Zunächst wird die formale Systembeschreibung, bestehend aus grundsätzlichen Modellierungstechniken, einer Beschreibung der verwendeten Variablen sowie der Definition von Konsistenzbedingungen, definiert. Auf dieser Grundlage werden dann die Modelle der einzelnen Planungsebenen entwickelt und Kennzahlen abgeleitet. Diese Kennzahlen werden im anschließenden Abschnitt 5.2 zur Steuerung des integrierten hierarchischen Planungsverfahrens genutzt.

5.1.1 Systembeschreibung

5.1.1.1 Grundsätzliche Modellierungstechniken

Zur Abbildung der Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Systemumwelt und damit insbesondere des Absatzes, werden in den Planungsmodellen unterschiedliche Prognosen in Form von Szenarien abgebildet. Außerdem werden in den verschiedenen Planungsebenen unterschiedlich granulare Zeitmodelle verwendet, wobei die Datenkonsistenz zwischen den Zeitmodellen gewährleistet sein muss. Diese Modellierungstechniken erfordern eine eindeutige Definition, um die Pflege und Konsistenzprüfung der entsprechenden Stammdaten zu ermöglichen.

5.1.1.1.1 Darstellung in Form von Szenarien

Die zukünftige Entwicklung der Systemumwelt (insbesondere die Entwicklung der Nachfrage) ist nicht deterministisch vorgegeben, sondern hängt von nicht durch die Entscheidungsträger des Unternehmens zu beeinflussenden Faktoren ab. Daher werden verschiedene Szenarien ausgearbeitet, die konsistente Bilder möglicher zukünftiger Entwicklungsstränge modellieren. Die Partialmodelle betrachten die verschiedenen möglichen Entwicklungen der Systemumwelt gleichzeitig und kommen so zu einer Lösung, die für das Eintreten der einzelnen Szenarien geeignet ist.

In den Partialmodellen werden für die einzelnen Szenarien unterschiedliche Entwicklungen dargestellt (so werden z. B. die Lagerbestände in Abhängigkeit vom Lagerbestand des Vor-

gängerszenarios berechnet), allerdings sind die als Ergebnis der Partialmodelle betrachteten Variablen nur von der Periode abhängig. So lassen sich einheitliche Pläne definieren, die unabhängig davon sind, welches Szenario tatsächlich eintritt.

In Unternehmen existieren grundsätzlich verschiedene Prognosen bezüglich der zukünftigen Absätze. Eine durch den Vertrieb als konservativ angesehene Prognose schätzt die Absatzzahlen möglichst gering ein. Damit ist der Vertrieb mit einer großen Wahrscheinlichkeit in der Lage, diese Prognosewerte zu erreichen, oder sie sogar zu übertreffen, was zu einer positiven Bewertung der Arbeit führt. In der Produktion und Logistik hingegen tendiert eine konservative Prognose dazu, Bedarfe zu hoch einzuschätzen. So ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass aufbauend auf dieser Prognose geplante Kapazitäten ausreichen, um die auftretenden Bedarfe befriedigen zu können. Es existiert also im Unternehmen ein grundsätzlich unterschiedliches Verständnis davon, was eine konservative Prognose auszeichnet. Das hier definierte Verfahren nutzt diese verschiedenen Prognosen, indem es sie in Form von Szenarien modelliert. Damit lässt sich sicherstellen, dass die Ergebnisse der Planung eine relativ große Bandbreite möglicher Entwicklungen der Umwelt (insb. der Bedarfe) erfüllen können.

Die Szenarien werden in Form einer Baumstruktur angeordnet, wobei ein Szenario immer Nachfolger genau eines anderen Szenarios ist (Ausnahme ist das Ausgangsszenario, das die Situation in der ersten Planungsperiode darstellt, dieses hat kein Vorgängerszenario). Zum Aufbau des Szenariobaums werden $n^P + 1$ Perioden und $n^S + 1$ Szenarien definiert, wobei die Wurzel des Baumes (das Ausgangsszenario) Szenario 0 ist. Dieses Ausgangsszenario dient nur zur Initialisierung der Modelle und stellt keine Kapazitäten zur Fertigung von Erzeugnissen zur Verfügung. Jedem Szenario wird durch die Funktion $\pi: \{0 \dots n^S\} \rightarrow \{0 \dots n^P\}$ eine Periode zugeordnet, wobei die Wurzel des Szenariobaums in der ersten Periode liegen muss, also $\pi(0) = 0$. Die Struktur des Szenariobaums wird durch $\nu: \{0 \dots n^S\} \rightarrow \{0 \dots n^S\} \cup \{\emptyset\}$ definiert. Diese Funktion ordnet jedem Szenario ein Nachfolgeszenario zu, sofern es sich nicht in der letzten Periode des Zeitmodells n^P befindet. Außerdem wird jedem Szenario durch die Funktion $\omega: \{0 \dots n^S\} \rightarrow]0 \dots 1]$ eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ausgangsszenarios ist grundsätzlich $\omega(0) = 1$. Um die Konsistenz des Szenariobaums sicher zu stellen, müssen die Bedingungen in Gleichungen (5.1) und (5.2) erfüllt sein.

$$\pi(j) - \pi(i) = 1 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{0 \dots n^S\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S \mid \nu(j) = i\} \end{array} \quad (5.1)$$

$$\sum_{\forall j \in \{0 \dots n^S \mid \nu(j) = i\}} \omega(j) = \omega(i) \quad \forall i \in \{0 \dots n^S \mid \pi(i) < n^P\} \quad (5.2)$$

Die in Gleichung 5.1 dargestellte Konsistenzbedingung stellt sicher, dass jedes Nachfolgeszenario j eines Szenarios i der jeweils nachfolgenden Periode zugeordnet ist. Gleichung 5.2 gibt an, dass die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Nachfolger eines Szenarios i gleich der Eintrittswahrscheinlichkeit des betrachteten Szenarios sein muss. Diese Bedingung muss für alle Szenarien, die keine Blätter des Szenariobaums sind, die also nicht in der letzten modellierten Periode n^P (Planungshorizont) liegen, gelten.

Die Einschränkung, dass die Summe aller Eintrittswahrscheinlichkeiten in jeder Periode 1 sein muss, sowie die Einschränkung, dass jedes Szenario des Entscheidungsbaums, das kein Blatt ist, mindestens ein Nachfolgeszenario hat, ergeben sich implizit aus den oben dargestellten Konsistenzbedingungen und müssen daher nicht über separate Gleichungen sichergestellt werden.^{36, 37}

5.1.1.1.2 Integration unterschiedlicher Zeitmodelle

Zur Modellierung der Partialmodelle wird jeweils ein diskretes Zeitmodell verwendet. Allerdings werden in den einzelnen Partialmodellen unterschiedlich granulare Raster zur Einteilung des Planungshorizonts in Zeitabschnitte verwendet. Eine solche Unterscheidung ist insbesondere zwischen den Partialmodellen, die auf Grund der in Abschnitt 2.2.2.1 dargestellten unterschiedlichen relevanten Betrachtungshorizonte für Teilaufgaben gebildet wurden, sinnvoll. Damit würden unterschiedlich lange diskrete Zeitabschnitte in den Partialmodellen I und II einerseits und III und IV andererseits gerechtfertigt. Allerdings kann natürlich auch eine unterschiedliche Rasterung innerhalb dieser Gruppen genutzt werden. Dies wird an dieser Stelle

36 Die Summe aller Eintrittswahrscheinlichkeiten in jeder Periode muss 1 sein: Dies kann induktiv bewiesen werden. Für Periode 1 gilt dies, da in dieser Periode nur das Ausgangsszenario 1 existiert (folgt aus Gleichung 5.1) und diesem Szenario grundsätzlich die Eintrittswahrscheinlichkeit 1 zugeordnet ist. Es sei in Periode k mit $j < n^P$ die Summe aller Eintrittswahrscheinlichkeiten gleich 1. Dann gilt für jedes Szenario i in Periode j , dass die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Nachfolgeszenarien der Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenario i entspricht (dies folgt direkt aus Gleichung 5.2). Nach Gleichung 5.1 müssen alle diese Nachfolgeszenarien in Periode $j+1$ liegen. Da nach der Definition der Funktion v jedes Szenario in Periode $j+1$ genau ein Vorgängerszenario haben muss, können Szenarien in Periode j keine gemeinsamen Nachfolgeszenarien haben und damit muss die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten in Periode $j+1$ minimal 1 sein. Da der Vorgänger jedes Szenarios in Periode $j+1$ nach Gleichung 5.1 in Periode j liegen muss, kann die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten in Periode $j+1$ auch nicht größer als 1 sein. Damit muss also die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten in Periode $j+1$ gleich 1 sein. Damit ist die Aussage für alle Perioden bewiesen.

37 Jedes Szenario, das kein Blatt ist, hat mindestens ein Nachfolgeszenario: Hätte ein Szenario keinen Nachfolger, so müsste die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Szenarios gemäß Gleichung 5.2 0 sein. Dies widerspricht aber der Definition der Funktion.

allerdings nicht modelliert, sondern würde eine Erweiterung des hier dargestellten Modells darstellen.

Die Dauer eines Zeitintervalls wird nicht bereits an dieser Stelle festgelegt, sondern als Parameter definiert, damit die Modellbildung davon unabhängig durchgeführt werden kann. Folgende Aussagen über die Zeitabschnitte in den unterschiedlichen Modellen können aber grundsätzlich bereits hier getroffen werden:

- In den Modellen III und IV (vgl. Abschnitt 5.1.3) wird ein fein gerastertes Zeitmodell (z. B. Schichten oder Tage als Zeitabschnitte) zugrunde gelegt. Dies ist notwendig, um das mathematische Modell zur Bestimmung des Sicherheitsbestands zu definieren. Die Dauer des im Zeitmodell dieser Partialmodelle zugrunde gelegten Zeitabschnittes wird als $T^{B,o}$ bezeichnet.
- In den Modellen I und II (vgl. Kapitel 5.1.2) werden die Zeitabschnitte des diskreten Zeitmodells größer gewählt (z. B. Monate oder Quartale). Zwar wäre auch hier die Nutzung des Zeitmodells der Partialmodelle III und IV möglich, allerdings würde dies zu erheblichem Aufwand bei der Modellierung und Optimierung der Modelle führen, da der betrachtete Zeitraum größer als in den Partialmodellen III und IV sein muss. Die Dauer des in diesem Zeitmodell zugrunde gelegten Zeitabschnittes wird als $T^{B,t}$ bezeichnet.

Für beide Zeitmodelle wird ein eigener Szenariobaum aufgebaut. Dementsprechend gibt es einerseits die Variablen $n^{P,o}$ und $n^{S,o}$ sowie die Funktionen $\pi^o: \{1 \dots n^{S,o}\} \rightarrow \{1 \dots n^{P,o}\}$, $\nu^o: \{1 \dots n^{S,o}\} \rightarrow \{1 \dots n^{S,o}\} \cup \emptyset$ und $\omega^o: \{1 \dots n^{S,o}\} \rightarrow]0 \dots 1]$ für die Partialmodelle I und II und andererseits die Variablen $n^{P,t}$ und $n^{S,t}$ sowie die Funktionen $\pi^t: \{1 \dots n^{S,t}\} \rightarrow \{1 \dots n^{P,t}\}$, $\nu^t: \{1 \dots n^{S,t}\} \rightarrow \{1 \dots n^{S,t}\} \cup \emptyset$ und $\omega^t: \{1 \dots n^{S,t}\} \rightarrow]0 \dots 1]$ für die Partialmodelle III und IV. Da in den Abschnitten und Modellen dieser Ausarbeitung eindeutig aus dem Kontext hervorgeht, ob es sich um die entsprechenden Variablen für das über- oder untergeordnete Zeitmodell handelt, wird diese Notation vermieden. Sie wird nur dann genutzt, wenn dies für das Verständnis notwendig ist.

Damit die Szenariobäume über beide Zeitmodelle integriert betrachtet werden können, müssen einige grundlegende Konsistenzbedingungen erfüllt sein, die in Abschnitt 5.1.1.4 definiert werden:

- Konsistenz der Zeitmodelle
- Konsistente Abbildung der Szenarien

- Konsistenz der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen
- Konsistenz der Eintrittswahrscheinlichkeiten
- Konsistenz der Bedarfsmengen

5.1.1.1.3 Darstellung der Produktionsfaktoren

Die Produktionsfaktoren des Fertigungssystems müssen wie in 2.1.1.1 dargestellt in den Partialmodellen berücksichtigt werden. Daher werden sie in Form mathematischer Variablen dargestellt. Es werden lediglich die Elementarfaktoren modelliert, die dispositiven Faktoren können vernachlässigt werden. Sie gehen nur in Form von Gemeinkosten in die Berechnungen ein. Daher müssen alle Kostenbestandteile, die im Folgenden definiert werden, diese Gemeinkosten bereits enthalten.

Zunächst müssen die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel modelliert werden. Dabei kann die Gruppe der Betriebs- und Hilfsstoffe vernachlässigt werden, da hier grundsätzlich von der Verfügbarkeit für die Fertigung ausgegangen wird. Die relevanten Betriebsmittel der Gruppe „Maschinen, Werkzeuge, Gebäude, Grundstücke“ werden so gruppiert, dass eine Gruppe jeweils für die Durchführung einer Menge von Fertigungsprozessen genutzt werden kann³⁸. Diese Zusammenfassungen von Betriebsmitteln werden im Folgenden jeweils als ein Werkzeug bezeichnet.

Es wird also eine Menge $\{1 \dots n^W\}$ von möglichen Werkzeugen definiert. Dabei ist eine Teilmenge dieser Werkzeuge bereits im Ausgangsszenario vorhanden, die anderen können in den Folgeszenarien angeschafft oder veräußert werden. Mit der Beschaffung von Werkzeugen sind Kosten in Höhe von c_i^N verbunden, und für vorhandene Werkzeuge sind pro Periode Fixkosten in Höhe von c_i^F zu entrichten. Der Anfangszustand des Fertigungssystems ist durch den Vektor b_i^{w0} gegeben, der darstellt, welche Werkzeuge in der Ausgangsperiode 0 vorhanden sind.

Ebenfalls einen relevanten Produktionsfaktor stellen die Mitarbeiter $\{1 \dots n^M\}$ dar. Diese können im Gegensatz zu Werkzeugen durch Schulungsmaßnahmen weiterentwickelt werden, so dass sie auch zur Durchführung anderer Prozesse genutzt werden können. Außerdem ist die Menge der pro Periode verfügbaren Einheiten durch Überstunden innerhalb von Grenzen erweiterbar, womit Mehrkosten über den normalen Stundensatz hinaus verbunden sind. Die

38 Eine mögliche Zusammenfassung ist beispielsweise ein Bearbeitungszentrum mit den zugehörigen Werkzeugen, um eine Menge von Fertigungsprozessen durchzuführen, dem benötigten Standort, den Gebäudeeinrichtungen usw.

Kosten für Mitarbeiter werden als lineare Funktion der regulären Arbeitsstunden und der Überstunden berechnet. Mitarbeiter können freigestellt und eingestellt werden. Zu diesem Zweck sind mit dem Vektor b_i^{M0} die im Ausgangsszenario beschäftigten Mitarbeiter gegeben. Die Einstellung eines Mitarbeiters führt zu den Kosten c^{ME} , die Freisetzung zu den Kosten c^{MR} .

Des Weiteren wird die Menge der möglichen Qualifikationen $\{1 \dots n^Q\}$ definiert. Im Ausgangsszenario ist die Zuordnung von Qualifikationen zu Mitarbeitern durch die Matrix b_{ij}^{MQ0} festgelegt. In den Folgeperioden können die Mitarbeiter weitere Qualifikationen erlernen, wobei hierfür abhängig von der zu erlernenden Qualifikation Zeit aufgewendet wird und Kosten entstehen.

Die Gruppe der Rohstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse stellt den Input und den Output der Fertigungsprozesse dar. Im Weiteren wird der zusammenfassende Begriff Erzeugnisse³⁹ verwendet. Die Erzeugnisse, definiert durch die Menge $\{1 \dots n^E\}$, bilden einerseits den Output der Fertigungsprozesse. Andererseits gehen auch Erzeugnisse als Verbrauchsfaktoren in die Fertigungsprozesse ein.

5.1.1.1.4 Darstellung alternativer Fertigungsprozesse

Als kreativer Prozess, der außerhalb der hier betrachteten Fertigungsplanungs-Teilaufgaben erfolgt, müssen verschiedene mögliche Fertigungsprozesse identifiziert werden. Für diese alternativen Prozesse muss eine mathematische Darstellungsform definiert werden, die es ermöglicht, eine Auswahl zwischen ihnen in den in diesem Kapitel entworfenen Partialmodellen vorzunehmen.

Die herkömmlichen Losgrößenmodelle wie das MLCLSP stellen einen Produktionsfaktor als benötigt dar, um den Fertigungsprozess mit mehreren Erzeugnissen als Input und einem Erzeugnis als Output durchzuführen. Alternativ kann das Erzeugnis auf einer anderen Ressource gefertigt werden. In der Realität werden aber (spätestens bei der Einbeziehung von Mitarbeitern als benötigtem Produktionsfaktor) zur Durchführung eines Fertigungsprozesses mehrere Ressourcen parallel benötigt. Abbildung 5.1 stellt einen solchen Prozess dar. Um diese Form von Fertigungsprozessen in einem mathematischen Modell abbilden zu können, muss eine abstrakte Variable geschaffen werden, die den Zusammenhang zwischen Input, Output und den

39 Es wird nicht der Begriff Werkstoffe verwendet, um zu verdeutlichen, dass nur eine Teilmenge der Werkstoffe abgebildet wird. Einige Werkstoffe müssen nicht berücksichtigt werden, da von der Verfügbarkeit implizit ausgegangen wird. Lediglich wertmäßig bedeutende Werkstoffe werden abgebildet, die z. B. durch eine ABC-Analyse bestimmt werden können, wobei nur A-Teile sowie evtl. B-Teile berücksichtigt werden.

verwendeten Ressourcen herstellt. In dieser Arbeit wird daher der Begriff Technologie unter Verwendung der Definition aus Abschnitt 2.2.1 als Basis für die Darstellung der Fertigungsprozesse genutzt.

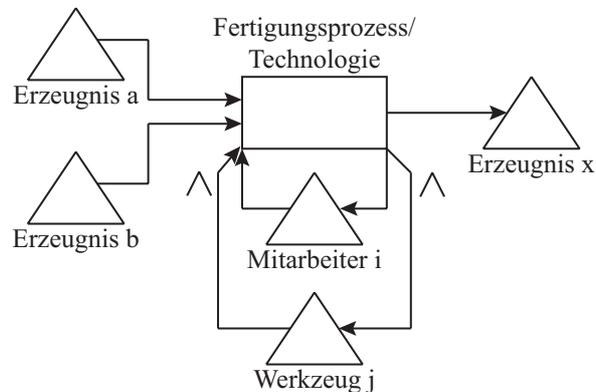


Abbildung 5.1: Fertigungsprozess als Technologie

Um alternative Fertigungsprozesse darzustellen werden die Technologien $\{1 \dots n^T\}$ definiert. Für jede Technologie wird in den Partialmodellen eine Anzahl abstrakter Einheiten x_{ij}^T bestimmt, die von dieser Technologie in einer Periode ausgeführt wird. Es ist allerdings je Technologie definiert, wie groß der Input n_{ij}^{TB} und der Output n_{ij}^{TE} für jedes einzelne Erzeugnis ist. n_{ij}^{TB} und n_{ij}^{TE} stellen Matrizen dar, die jeweils alle Erzeugnisse auf alle Technologien abbilden. Im Normalfall werden diese Matrizen sehr viele Nullen enthalten, da der Output und der Input eines Fertigungsprozesses nur eine Teilmenge des gesamten Erzeugnisspektrums enthält. Außerdem wird für jede Technologie über die Matrizen t_{ij}^{TW} und t_{ij}^{TQ} definiert, welche Werkzeuge und Mitarbeiter mit welchen Qualifikationen wie lange zur Durchführung einer abstrakten Einheit der Technologie benötigt werden.

In der strategischen Planung (die nicht durch die hier entwickelten Modelle unterstützt wird) werden zunächst die verschiedenen, alternativen Fertigungsprozesse als Technologien definiert. Allerdings sollen auch globale Strategiealternativen darstellbar sein, die über die Nutzung unterschiedlicher Standorte und Varianten der Erzeugnisse entscheiden. Dazu werden durch die Matrix, die durch die Binärvariable b_{ij}^P gebildet wird, n^{PA} Teilmengen der Menge aller Technologien $\{1 \dots n^T\}$ definiert. Jede Zeile der Matrix definiert eine Prozessalternative⁴⁰. Die einzelnen Prozessalternativen geben an, welche Technologie für die Herstellung welches Erzeugnisses genutzt werden soll. In Abschnitt 5.1.1.4 werden zusätzliche Konsistenzbedingungen für die Menge der Prozessalternativen definiert.

⁴⁰ Eine Prozessalternative entspricht damit der Technologiemenge in der Nomenklatur von Dinkelbach und Rosenber (vgl. Abschnitt 2.2.1)

5.1.1.2 Schnittstellen zu den Ergebnissen der strategischen Planung

Die Schnittstellen zur strategischen Planung dienen dazu, Zieldefinitionen, Entwicklungsalternativen der Systemumwelt sowie Strategiealternativen zu definieren. In diesem Abschnitt werden diese Eingangsparameter des Planungssystems definiert.

5.1.1.2.1 Zieldefinitionen

Die aus der strategischen Planung entstehenden grundsätzlichen Ziele der Unternehmung sind in Form der maximalen Lieferzeit und der minimalen Liefertreue definiert. Diese Parameter stellen dar, wie sich die Unternehmung am Markt positionieren möchte. Sie sind eine Grundlage der definierten Szenarien, die Primärbedarfe prognostizieren, da diese Parameter direkte Auswirkungen auf den Absatz haben. Eine geringere Lieferzeit und eine höhere Liefertreue machen die Produkte für potentielle Kunden attraktiver, da auf diese Weise auch eine schnellere Reaktion des Kunden auf Nachfragen möglich wird. Dementsprechend kann der Kunde seine Lagerbestände verringern und dadurch Kosten sparen. Die Parameter „angestrebte maximale Lieferzeit“ und „angestrebte minimale Liefertreue“ werden durch die Variablen $t^{L_{max}}$ sowie p^{min} angegeben.

Der kalkulatorische Zinsfuß und das verfügbare Kapital stellen die finanzwirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Unternehmung dar. Durch den kalkulatorischen Zinsfuß wird die Rentabilität jeder Investition um die Kosten für die dabei entstehende Kapitalbindung belastet. Entsprechend werden Investitionen nur dann durchgeführt, wenn sich ein positiver Betrag ergibt. Der kalkulatorische Zinsfuß muss dabei nicht unbedingt den Kapitalkosten des Unternehmens für Fremdkapital entsprechen, vielmehr sollte er die angestrebte Eigenkapitalrentabilität mit einbeziehen. Der Parameter c^Z gibt den kalkulatorischen Zinsfuß des Unternehmens an. Die Kapitalbindung wird in den Modellen über den kalkulatorischen Zinsfuß in die Kapitalbindungskosten übertragen. Diese werden durch die Parameter $KB^{d,max}$ für die durchschnittlichen Kapitalbindungskosten bis zum Planungshorizont sowie $KB^{d,max}$ für die maximalen Kapitalbindungskosten über alle Perioden begrenzt.

5.1.1.2.2 Entwicklungsalternativen der Systemumwelt

Die einzelnen alternativen Entwicklungsstränge der Systemumwelt werden wie oben beschrieben in Form von Szenarien dargestellt. Hierdurch ist es möglich, diverse alternative Prognosen integriert zu betrachten und zu einem Ergebnis zu kommen, das für alle Alternativen sinnvoll ist.

Die in einem Szenario nachgefragten Primärbedarfe werden dabei durch die Matrix n_{ij}^B angegeben. Die einzelne Variable gibt für ein Erzeugnis i an, wie viele Einheiten in Szenario j benötigt werden, um die Nachfrage zu befriedigen. Dabei ist nicht festgelegt, dass diese Nachfragemenge notwendigerweise der Produktionsmenge entspricht, sie kann auch ganz oder teilweise aus Lagerbeständen bedient werden.

5.1.1.2.3 Strategiealternativen

Die durch die Matrix b_{ij}^{PA} gebildete Menge von Prozessalternativen, die mögliche Kombinationen von Technologien zeigt, stellt eine Auswahlmöglichkeit für die Partialmodelle dar. Die Änderung der genutzten Prozessalternative wirft Kosten auf, die durch den Parameter c^{PNA} gegeben sind. Die derzeit genutzte Prozessalternative ist durch die Variable b_i^{PNO} gekennzeichnet.

Die Findung neuer Prozessalternativen ist ein Prozessbaustein, der in den in Abschnitt 5.2 entwickelten Koordinationsprozessen ausgelöst wird, wenn die aktuell definierte Menge der Prozessalternativen $\{1 \dots n^{PA}\}$ es nicht zulässt, eine Lösung zu finden, die den Zieldefinitionen entspricht. Dieser Prozessbaustein, der kreativen Charakter hat, wird allerdings als Blackbox betrachtet und nicht näher definiert.

5.1.1.3 Exogene Variablen

Eine Vielzahl von exogenen Variablen geht in das Planungsmodell ein. Dabei handelt es sich insbesondere um Kosten- (z. B. Kosten für den Kauf von Maschinen oder die Fremdbeschaffung von Erzeugnissen) und Zeitvariablen (z. B. Rüstzeiten). Diese werden hier nicht ausführlich definiert, sondern im Rahmen der Beschreibungen der Partialmodelle, die sie verwenden, erläutert.

5.1.1.4 Konsistenzbedingungen

Um die zuvor definierten Variablen in den Partialmodellen nutzen zu können, muss sichergestellt sein, dass das durch sie definierte Modell der Systemumwelt widerspruchsfrei und konsistent ist. Daher werden hier Konsistenzbedingungen formuliert, die dies sicherstellen. Die Darstellung der Konsistenzbedingungen erfolgt formal-mathematisch, so dass es möglich ist, diese zur automatisierten Prüfung der Datenbasis zu nutzen. In die zur Koordination der Planung entworfenen Prozessdefinitionen werden diese Prüfungen eingebunden, um die Terminierung des Planungsprozesses zu garantieren.

5.1.1.4.1 Konsistenz der Zeitmodelle

Da die beiden Zeitmodelle die gleichen Szenarien auf unterschiedlichen Aggregationsebenen darstellen, muss die Integrität der Modelle gewährleistet sein. Dazu wird zunächst festgelegt, dass die Zeitmodelle miteinander vereinbar sein müssen, d. h. die Dauer eines Zeitabschnittes in den Partialmodellen I und II ($T^{B,t}$) muss ein ganzzahliges Vielfaches n^{ZM} der Dauer eines Zeitabschnittes in den Partialmodellen III und IV ($T^{B,o}$) sein (vgl. Gleichung 5.3).

$$\exists n^{ZM} \in \mathbb{N} : n^{ZM} \cdot T^{B,o} = T^{B,t} \quad (5.3)$$

Aufbauend auf n^{ZM} lässt sich die Funktion $\theta: \{0 \dots n^{P,o}\} \rightarrow \{0 \dots n^{P,t}\}$ definieren, die jeder Periode im Zeitmodell der Partialmodelle III und IV eine Periode im Zeitmodell der Partialmodelle I und II zuordnet. Die Funktion wird definiert als: $\theta(i) = \left\lfloor \frac{i}{n^{ZM}} \right\rfloor$.

5.1.1.4.2 Abbildung von Szenarien zwischen den Zeitmodellen

Im Folgenden wird eine Abbildung definiert, über die die Szenarien, die für die Partialmodelle III und IV definiert wurden, in Szenarien der ihnen übergeordneten Partialmodelle I und II überführt werden können. Ein Szenario im Szenariomodell der untergeordneten Ebene ist dabei die Vereinigungsmenge von Szenarien auf der unteren Ebene, wobei diese Szenarien einen Weg durch den Szenariobaum beschreiben. Betrachten wir Periode i im Zeitmodell der Partialmodelle I und II, so wird jedem Weg in den Partialmodellen III und IV, der von einem Szenario in der ersten Periode j , der die Periode i durch die Funktion θ zugeordnet wird, zu einem Szenario in Periode $j + n^{ZM} - 1$ führt, genau ein Szenario im Modell der Partialmodelle I und II zugeordnet. Den Zusammenhang zwischen Szenarien in beiden Zeitmodellen illustriert Abbildung 5.2.

Die Zuordnung von Wegen im Szenariobaum der untergeordneten Ebene zu Szenarien in der übergeordneten Ebene wird durch die Funktion $\sigma: \{0 \dots n^{S,o}\}^{n^{ZM}} \rightarrow \{0 \dots n^{S,t}\}$ durchgeführt. Die unten stehende Gleichung 5.4 definiert formal logisch, dass für jeden oben beschriebenen Weg im untergeordneten Szenariobaum eine Zuordnung zu einem übergeordneten Szenario über diese Funktion geschehen muss. Der Weg wird dabei durch einen n^{ZM} -Tupel $(p_1 \dots p_{n^{ZM}})$ von Szenarien repräsentiert, die jeweils über die Vorgänger-Nachfolger-Beziehung miteinander verbunden sind.

$$\begin{aligned} \forall (p_1 \dots p_{n^{ZM}}) \in \{0 \dots n^{S,o}\}^{n^{ZM}} : p_1 \in v(p_2) \dots p_{n^{ZM}-1} \in v(p_{n^{ZM}}) \\ \exists i \in \{1 \dots n^{S,t}\} : \sigma(p_1 \dots p_{n^{ZM}}) = i \end{aligned} \quad (5.4)$$

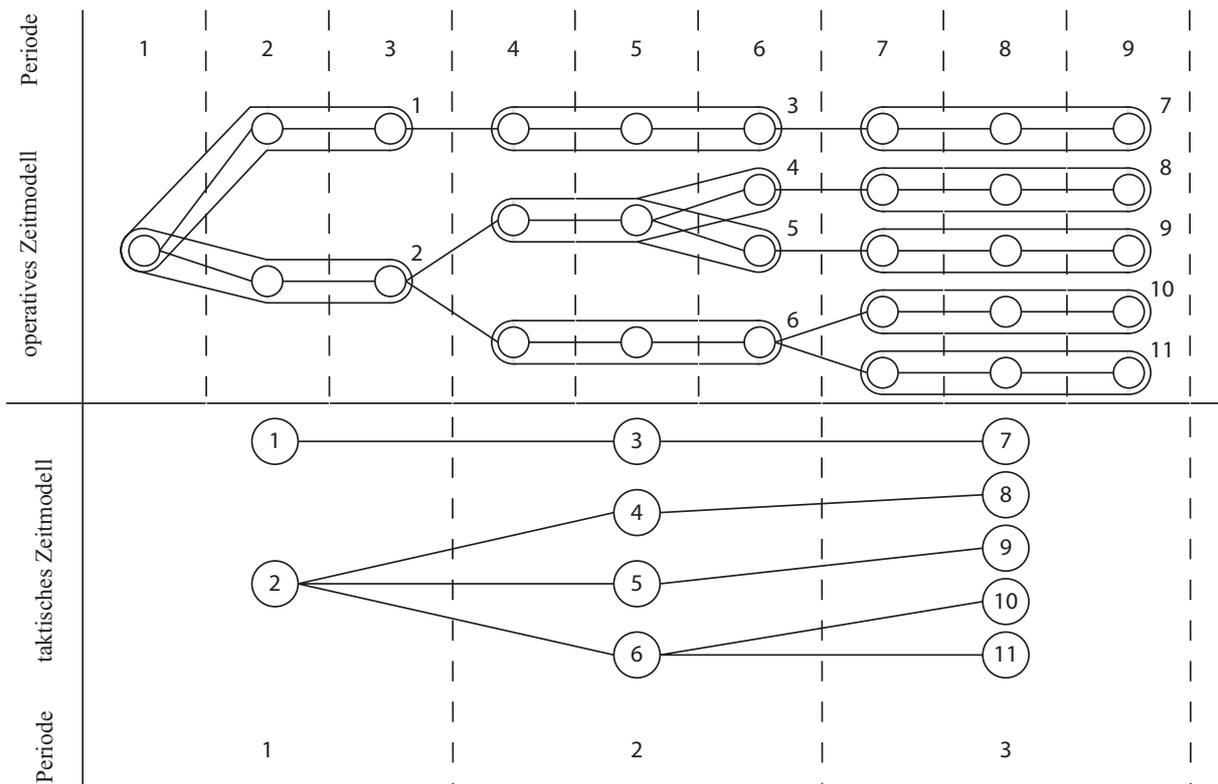


Abbildung 5.2: Szenarien in verschiedenen Zeitmodellen

5.1.1.4.3 Konsistenz der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen

Die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Szenarien in den Partialmodellen III und IV werden einerseits innerhalb einer Periode der Partialmodelle I und II in verschiedene Szenarien des Modells überführt. Andererseits werden Beziehungen, die die Grenzen der Betrachtungszeiträume überbrücken, auch in der Planung durch die Partialmodelle I und II als Beziehungen dargestellt.

5.1.1.4.4 Konsistenz der Eintrittswahrscheinlichkeiten

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten auf der untergeordneten Ebene müssen denen auf der übergeordneten Ebene entsprechen. Dazu muss die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios i in den Partialmodellen I und II gleich der Eintrittswahrscheinlichkeit des letzten Szenarios des ihm in den Partialmodellen III und IV entsprechenden Weges sein. Es muss also der in Gleichung 5.5 dargestellte logische Zusammenhang zwischen den Eintrittswahrscheinlichkeiten bestehen.

$$\forall (p_1 \dots p_{n^{ZM}}) \in \{0 \dots n^{S,o}\}^{n^{ZM}}, i \in \{0 \dots n^{S,t}\}, \sigma(p_1 \dots p_{n^{ZM}}) = i : \omega^t(i) = \omega^o(p_{n^{ZM}}) \quad (5.5)$$

5.1.1.4.5 Konsistenz der Bedarfsmengen

Die Bedarfsmenge eines Szenarios in den Partialmodellen I und II muss identisch sein mit der Summe der Bedarfe in den entsprechenden Szenarien in den Partialmodellen III und IV. Dies wird in Gleichung 5.6 in mathematischer Form dargestellt.

$$\forall (p_1 \dots p_{n^{zm}}) \in \{0 \dots n^{s,o}\}^{n^{zm}}, i \in \{0 \dots n^{s,t}\}, \sigma(p_1 \dots p_{n^{zm}}) = i : \omega^t(i) = \omega^o(p_{n^{zm}}) \quad (5.6)$$

5.1.1.4.6 Konsistenz der Prozessalternativen

Es wird definiert, dass in jeder Prozessalternative nur genau eine Technologie zur Herstellung eines Erzeugnisses verwendet werden darf. Welche dies ist, wird durch die Binärvariable b_{ij}^p bestimmt. In dem hier definierten Planungssystem wird es dadurch möglich, auf der Ebene der Partialmodelle III und IV, aufbauend auf der Auswahl einer Prozessalternative in Partialmodell I, einen eindeutigen Erzeugniszusammenhang zu definieren. Praktisch lässt diese Entscheidung sich dadurch begründen, dass ein Erzeugnis eines Betriebes immer durch denselben Fertigungsprozess erzeugt werden sollte. Dadurch kann eine höhere Produktivität erreicht und eine gleichbleibende Qualität gewährleistet werden. Gleichung 5.7 stellt diesen Zusammenhang formal dar.

$$\sum_{l \in \{1 \dots n^t | l \neq j\}} b_{il}^p \cdot n_{kl}^{TE} = 0 \quad \begin{aligned} \forall i \in \{1 \dots n^{PA}\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^t | b_{ij}^p = 1\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^E | n_{kj}^{TE} > 0\} \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.1.2 Partialmodelle des übergeordneten Zeitmodells

5.1.2.1 Partialmodell I: Auswahl von Produktionsprozessen und Planung des Maschinenbestands

In diesem Partialmodell werden die Fertigungsplanungs-Teilaufgaben „Auswahl von Fertigungsprozessen“ (nachdem sie zuvor manuell definiert wurden) „Optimierung des Maschinenbestands“ sowie „Treffen der Make-or-Buy-Entscheidung“ für Erzeugnisse in ein gemeinsames mathematisches Programm integriert. Damit wird einerseits die Standortfrage implizit (über die Auswahl der Maschinen) beantwortet, andererseits auch die Kernkompetenz und damit die optimale Fertigungstiefe des Unternehmens und der einzelnen Standorte immer wieder neu bestimmt. Erzeugnisse, die eine Kostenersparnis bei Outsourcing und gleicher Qualität versprechen, können nicht die Kernkompetenz des Unternehmens darstellen. Derartige Erzeugnisse werden in diesem Modell als sinnvolle Kaufteile identifiziert und entsprechend markiert.

Die Ergebnisse dieses ersten Partialmodells stellt Abbildung 5.3 dar. Die auf der rechten Seite dargestellten Variablen werden durch die Ergebnisse dieses Modells bestimmt und durch die in Abschnitt 5.1.2.3 definierten Gleichungen berechnet. Sie bilden lediglich den Input für die Partialmodelle III und IV und keinen Output des Gesamtsystems. Die auf der linken Seite dargestellte Variable K^t ist eine Kennzahl, die von den Ergebnissen dieses Partialmodells und des zweiten Modells abhängt. Als für den Output des gesamten Planungssystem genutzte Planungsergebnisse dieses Partialmodells ergeben sich die unter dem Modell dargestellten Variablen. Die Binärvariable b_{ij}^W gibt dabei an, ob Werkzeug i in Periode j vorhanden ist. Wenn diese Variable ihren Wert von 0 auf 1 ändert, wird dies durch b_{ij}^{WN} angezeigt. b_{ij}^{PN} stellt dar, ob Prozessalternative i in Periode j genutzt wird, die Änderung des Werts dieser Variable zeigt b_j^{PNA} an. b_{ij}^K Gibt an, ob Erzeugnis i in Periode j als Kaufteil markiert ist.

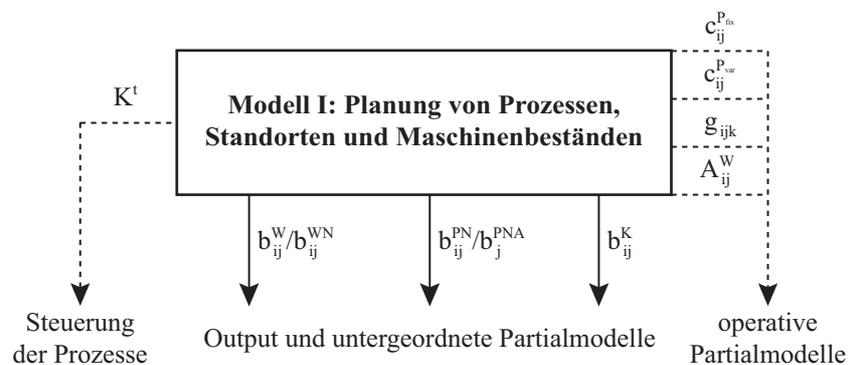


Abbildung 5.3: Ergebnisse des ersten Partialmodells

Als Eingangsgrößen fließt in dieses Modell je Periode eine Menge von Werkzeugen, die zur Herstellung der nachgefragten Erzeugnisse genutzt werden können, ein. Als Alternative werden auch die Kaufkonditionen möglicher Lieferanten dargestellt. Die verschiedenen Herstellungsprozesse von Erzeugnissen werden durch Technologien dargestellt.

Eine Technologie stellt einen Produktionsprozess als Input-Output-Prozess dar. Durch die Erweiterung des klassischen MLCLSP-Modells um Technologien ist es möglich, Prozesse zu modellieren, in denen mehr als nur ein Werkzeug zum Einsatz kommt. Außerdem sind dadurch die für die Durchführung von Produktionsprozessen benötigten Mitarbeiter in die mathematische Darstellung integrierbar. Diese Erweiterung wird allerdings erst im Partialmodell zur Optimierung der Mitarbeiterplanung (vgl. 5.1.2.2) eingeführt, da die Verfügbarkeit von Mitarbeitern zur Durchführung der Technologien in der Maschinenbestandsoptimierung implizit vorausgesetzt wird.

Die weiteren Eingangsgrößen des Modells bilden die verschiedenen Bedarfsverläufe aufgliedert nach Szenarien, die Begrenzungen für Rüstvorgänge, Werkzeugkapazität, sowie die möglichen Prozessalternativen mit den in ihnen nutzbaren Technologien.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=0}^{n^S} \omega(i) \cdot (1+c^Z)^{-\pi(i)} \cdot \left[b_{\pi(i)}^{PNA} \cdot c^{PNA} + \sum_{j=1}^{n^W} \sum_{k=1}^{n^T} (b_{kji}^{RT} \cdot t_{kj}^{RT} \cdot c_j^R + x_{ki}^T \cdot t_{kj}^{TW} \cdot c_j^P) \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{n^E} (\max(x_{ji}^L, 0) \cdot c_j^L - \min(x_{ji}^L, 0) \cdot c_j^V) + \sum_{j=1}^{n^E} x_{ji}^K \cdot c_j^K + \sum_{j=1}^{n^W} (b_{j\pi(i)}^W \cdot c_j^F + b_{j\pi(i)}^{WN} \cdot c_j^N) \right] \quad (5.8)$$

$$\text{s.t.} \quad n_i^{RT_{max}} \geq \sum_{j=1}^{n^W} b_{ijk}^{RT} \quad \forall i \in \{1 \dots n^T\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.9)$$

$$x_{ik}^T \leq M \cdot b_{ijk}^{RT} \quad \forall i \in \{1 \dots n^T\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.10)$$

$$\sum_{i=1}^{n^T} (b_{ijk}^{RT} \cdot t_{ij}^{RT} + x_{ik}^T \cdot t_{ij}^{TW}) \leq t_{j\pi(k)}^{KW} \cdot b_{j\pi(k)}^W \quad \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.11)$$

$$x_{ik}^L = x_{i\nu(k)}^L + \sum_{j=1}^{n^T} x_{jk}^T \cdot n_{ij}^{TE} + x_{ik}^K - n_{ik}^B - \sum_{j=1}^{n^T} n_{ij}^{TB} \cdot x_{jk}^T \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.12)$$

$$b_{ij}^W \leq b_{i(j-1)}^W + b_{ij}^{WN} \quad \forall i \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^P\} \quad (5.13)$$

$$x_{ij}^K \leq b_{i\pi(j)}^K \cdot M \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.14)$$

$$\sum_{j=1}^{n^T} x_{jk}^T \cdot n_{ij}^{TE} \leq (1 - b_{i\pi(k)}^K) \cdot M \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.15)$$

$$x_{ij}^T \leq M \cdot \sum_{k=1}^{n^{PA}} b_{ki}^P \cdot b_{k\pi(j)}^{PN} \quad \forall i \in \{1 \dots n^T\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.16)$$

$$\sum_{i=1}^{n^{PA}} b_{ij}^{PN} = 1 \quad \forall j \in \{0 \dots n^P\} \quad (5.17)$$

$$b_j^{PNA} \geq b_{ij}^{PN} - b_{ij-1}^{PN} \quad \forall i \in \{1 \dots n^{PA}\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^P\} \quad (5.18)$$

$$x_{i0}^L = 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (5.19)$$

$$b_{i0}^W \leq b_i^{W0} \quad \forall i \in \{1 \dots n^W\} \quad (5.20)$$

$$b_{i0}^{PN} = b_i^{PNO} \quad \forall i \in \{1 \dots n^{PA}\} \quad (5.21)$$

$$x_{ij}^T \geq 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^T\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.22)$$

$$x_{ij}^K \geq 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \quad (5.23)$$

Die mathematische Modellierung der Auswahl von Produktionsprozessen und der Planung des Maschinenbestands ist in den Gleichungen 5.8 bis 5.23 dargestellt und baut auf dem Standardmodell MLCLSP auf (vgl. 3.2.2). Dabei wird das Modell um die folgenden Punkten erweitert:

- Auswahl zwischen verschiedenen alternativen Produktionsprozessen zur Erstellung der Erzeugnisse
- Die Verfügbarkeit von Werkzeugen in einer Periode ist nicht deterministisch vorgegeben; Anschaffung bzw. Abschaffung ist Teil der Fertigungsplanungs-Teilaufgabe und die Verfügbarkeit ergibt sich daraus
- Nutzung von Technologien für die Modellierung der Produktionsprozesse
- Berücksichtigung der Planungsunsicherheit durch mehrere parallele Szenarien in jeweils einer Periode
- Bestimmung der Auslastung der einzelnen Werkzeuge je Periode als Grundlage für die untergeordneten Partialmodelle

Die in Gleichung 5.8 dargestellte Zielfunktion dieses Partialmodells minimiert den Erwartungswert der kumulierten anfallenden Kosten über alle Szenarien. Dabei wird jedes Szenario i mit seiner Eintrittswahrscheinlichkeit $\omega(i)$ gewichtet und die Kosten über die Zeit durch den kalkulatorischen Zinsfuß c^Z je Periode abgezinst. Der erste Summand stellt die Kosten für eine Änderung der Prozessalternativenutzung dar. Die folgende Doppelsumme addiert analog zu Zielfunktion des MLCLSP (vgl. Gleichung 3.11) die variablen Rüst- und Produktionskosten für die in diesem Partialmodell bestimmten Produktionslose. Dabei werden die binäre Rüstvariable b_{kji}^{RT} , die angibt, ob Werkzeug j in Szenario i zur Durchführung von Technologie k gerüstet wird, sowie die Anzahl der ausgeführten Mengeneinheiten x_{ki}^T von Technologie k in Szenario i genutzt. Die nächste Summe ist identisch mit der Summe der Lager- bzw. Verzugskosten in Gleichung 3.11.

Zusätzlich zu diesen bereits im herkömmlichen MLCLSP verwendeten Kosten werden in diesem mathematischen Modell die Kosten für die Fremdbeschaffung von Erzeugnissen, die Anschaffung von Werkzeugen und die Fixkosten für vorhandene Werkzeuge betrachtet, um die Optimierung des Maschinenbestands über den Szenariobaum zu ermöglichen. Die Kosten für den Zukauf werden als linear angenommen. Sie ergeben sich damit aus dem Produkt der Anzahl x_{ji}^K , die in der jeweiligen Periode zugekauft wird, und des Einkaufspreises c_j^K . Dies ist in der dritten Summe dargestellt.

Die Fixkosten pro Periode für den Betrieb von Werkzeug j sind durch c_j^F gegeben. Sie werden für jedes Szenario i mit der Binärvariable $b_{j\pi(i)}^W$ multipliziert, die angibt, ob das Werkzeug in diesem Szenario vorhanden ist. Den letzten Kostenbestandteil bilden die Neuanschaffungskosten für Werkzeug j , die durch die Konstante c_j^N gegeben sind und jeweils mit der eine Neuanschaffung ausdrückenden Binärvariable $b_{j\pi(i)}^{WN}$ multipliziert werden. Die Neuanschaffung und der Bestand von Maschinen sind nicht vom Szenario, sondern nur von der Periode abhängig, die über die Funktion $\pi(i)$ bestimmt wird. Da diese Variablen Teil der Zielfunktion dieses Partialmodells sind, dürfen sie nicht von den Szenarien abhängig sein, sondern es soll, unabhängig davon, wie sich die durch den Szenariobaum dargestellten verschiedenen Möglichkeiten der weiteren Entwicklung des Systemumwelt verwirklichen, ein Plan für die zukünftige Entwicklung erstellt werden.

Die in Gleichung 5.9 dargestellte Restriktion entspricht Gleichung 3.13 im MLCLSP, die die Anzahl der Rüstvorgänge begrenzt. Dabei werden hier die Rüstvorgänge über die Binärvariable b_{ijk}^{RT} dargestellt, die genau dann 1 ist, wenn Werkzeug j in Szenario k zur Durchführung von Technologie i gerüstet wird. Gleichung 5.10 entspricht Gleichung 3.14 und beschränkt damit die durchführbaren Technologien auf diejenigen, für die die entsprechenden Maschinen gerüstet werden. Im Zuge der Umstellung auf die Verwendung von Technologien wurde die Variable für die Produktionsmenge aus dem MLCLSP durch die Technologienutzung x_{ik}^T ersetzt.

Gleichung 5.11 entspricht der Restriktion zur Begrenzung der Maschinenlaufzeit im MLCLSP (Gleichung 3.15), angepasst an die Systembeschreibung in diesem Modell. Einerseits wird auf der linken Seite der Gleichung die Summe über alle Technologien berechnet, so dass die Rüst- und die Produktionszeit dem neuen Modell entsprechend errechnet werden. Andererseits wird die Kapazität des Werkzeugs im jeweiligen Szenario mit der Binärvariable b_{ij}^W multipliziert, so dass berücksichtigt wird, ob das Werkzeug im Zuge der Optimierung des Maschinenbestands zur Verfügung steht.

Die in Gleichung 5.12 dargestellte Restriktion berechnet für jedes Szenario den Lagerbestand am Ende der zugehörigen Periode und entspricht Gleichung 3.16 im MLCLSP. Der zweite Summand auf der rechten Seite der Gleichung, der die produzierte Menge des betrachteten Erzeugnisses aufaddiert, wurde durch das Produkt aus Technologiemenge und der Outputmenge dieser Technologie ersetzt, um dem neuen Modell zu entsprechen. Der dritte Summand, die Kaufteilmenge, wurde neu eingeführt, um die Fremdbeschaffung von Erzeugnissen abzubilden.

Der letzte Summand wurde ebenfalls für die Nutzung von Technologien umgestellt. n_{ij}^{TB} ist die Inputmenge an Erzeugnis i , die für die Durchführung einer Einheit von Technologie j benötigt wird. Daher ergibt sich der interne Verbrauch an Erzeugnis i als die Summe aus n_{ij}^{TB} und der jeweils durchgeführten Technologiemenge x_{jk}^T . Auf das Einbeziehen von Transportzeiten, die zu einer Verschiebung der Bedarfszeitpunkte zwischen den Werkzeugen führen würden, wird hier verzichtet, da die Zeitintervalle in den Partialmodellen I und II so groß sind, dass die Transportzeit zu vernachlässigen ist.

In Gleichung 5.13 wird die Binärvariable b_{ij}^{WN} eingestellt, die anzeigt, ob Werkzeug i in Periode j neu eingeführt wird. Außerdem wird darauf aufbauend die Binärvariable b_{ij}^W beschränkt, die angibt, ob Werkzeug i in Periode j vorhanden ist und damit zur Durchführung von Technologien genutzt werden kann. b_{ij}^{WN} kann gemäß der Gleichung nur dann 1 sein, wenn entweder $b_{iv(j)}^W$ bereits 1 ist, das heißt das Werkzeug war bereits im Vorgängerszenario vorhanden, oder wenn die Binärvariable b_{ij}^{WN} gleich 1 ist, das Werkzeug also neu angeschafft wird.

Gleichung 5.14 begrenzt die Kaufteilmenge x_{ij}^K so, dass in einem Szenario nur dann Erzeugnisse zugekauft werden können, wenn diese auch durch die Binärvariable $b_{i\pi(j)}^K$ als Kaufteil markiert ist. Gleichung 5.15 stellt in die umgekehrte Richtung sicher, dass Teile, die als Kaufteile markiert sind, nicht selbst gefertigt werden. Dazu wird die Summe der Outputs über alle Technologien berechnet und durch den Umkehrwert von $b_{i\pi(j)}^K$ multipliziert mit einer hinreichend großen Zahl M begrenzt.

Die in Gleichung 5.16 dargestellte Restriktion stellt die ausschließliche Nutzung von in der gewählte Prozessalternative verfügbaren Technologien sicher. Die Prozessalternative wird durch den Vektor b_{ki}^P definiert, der für jede Technologie i angibt, ob sie in der jeweiligen Prozessalternative k zur Verfügung steht. Dieser Wert wird mit der binären Auswahlvariablen $b_{k\pi(j)}^{PN}$ multipliziert, so dass das Produkt genau dann 1 ist, wenn in der Periode $\pi(j)$ die jeweilige Technologie genutzt werden kann. Durch die Multiplikation mit einem hinreichend großen Wert M kann das Produkt dann als Obergrenze für den Wert x_{ik}^T (durchgeführte Technologiemenge) dienen. Gleichung 5.18 stellt die Binärvariable ein, die eine Änderung der Prozessalternative signalisiert.

Gleichung 5.17 begrenzt die Anzahl der in einer Periode zu nutzenden Prozessalternativen auf 1. Gleichung 5.19 initialisiert den Lagerbestand im Ausgangsszenario mit 0. Es wäre auch denkbar, den Lagerbestand im Ausgangsszenario mit dem aktuellen Lagerbestand zu beginnen, dies wird an dieser Stelle allerdings nicht umgesetzt. Gleichung 5.20 und 5.21 initialisie-

ren die Verfügbarkeit der Werkzeuge und die Nutzung der Prozessalternative im Ausgangsszenario. Gleichungen 5.22 und 5.23 beschränken die Ausführungsmenge von Technologien sowie die Beschaffungsmenge für Kaufteile auf den positiven Wertebereich.

5.1.2.2 Partialmodell II: Mitarbeiterplanung

In der Mitarbeiterplanung wird festgelegt, welche Mitarbeiter durch Qualifizierungsmaßnahmen neue Qualifikationen erlernen sollen und wie die Mitarbeiterstruktur des Unternehmens im zeitlichen Verlauf optimal den Gegebenheiten anzupassen ist. Dabei geht die im mathematischen Modell der Investitionsplanung in 5.1.2.1 bestimmte Werkzeugverfügbarkeit je Periode als Menge von Restriktionen in dieses Modell ein. Die Technologiemenen (und dementsprechend die Eigenfertigungsmengen), die dort bestimmt wurden, werden nicht als gegebene Eingangsgrößen betrachtet, da in der Optimierung in diesem Partialmodell zusätzlich die zu bestimmenden Mitarbeiter berücksichtigt werden können und sich so eine von der reinen Maschinenbestandsoptimierung abweichende effiziente Ressourcenverteilung ergeben kann.

Wie bereits in 5.1.2.1 erläutert, werden die Technologien für dieses Modell zusätzlich um die Zeit, in der Mitarbeiter mit einer bestimmten Menge an Qualifikationen benötigt werden, erweitert. Außerdem werden die Qualifikationen und ihre Erweiterung über Qualifizierungsmaßnahmen integriert. Die Verfügbarkeitsmatrix stellt die Möglichkeiten dar, Mitarbeiter in den verschiedenen Szenarien des Szenariobaums als für die Beschäftigung verfügbar bzw. nicht verfügbar zu markieren.

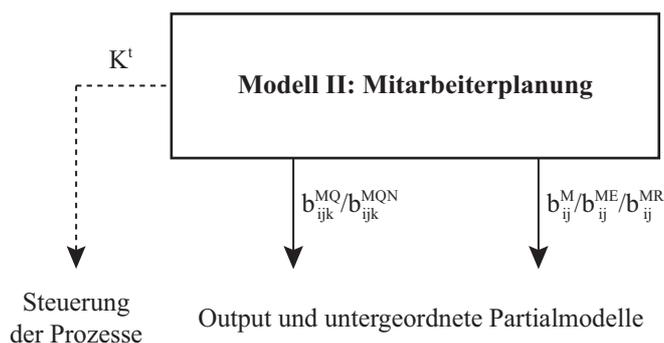


Abbildung 5.4: Ergebnisse des zweiten Partialmodells

Ergebnis dieses Partialmodells ist, wie in Abbildung 5.4 dargestellt, einerseits die Matrix b_{ij}^M , die angibt, ob Mitarbeiter i in Periode j beschäftigt wird und damit zur Verfügung steht. Die Variablen b_{ij}^{ME} und b_{ij}^{MR} zeigen Änderungen in dieser Matrix an. Andererseits wird durch die Matrix von Binärvariablen b_{ijk}^{MQ} je Mitarbeiter und Periode angegeben, ob eine Qualifikation vorhanden ist. Die Matrix b_{ijk}^{MQN} stellt parallel dazu dar, ob ein Mitarbeiter in einer Periode

eine Qualifikation neu erlernt. Die Ergebnisse dieses Partialmodells gehen ebenfalls in die Kennzahl K^t , die zur Steuerung der Koordinationsprozesse verwendet wird, ein.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{n^S} \omega(i) \cdot (1+c^Z)^{-\pi(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{n^W} \sum_{k=1}^{n^T} (b_{kji}^{RT} \cdot t_{kj}^{RT} \cdot c_j^R + x_{ki}^T \cdot t_{kj}^{TW} \cdot c_j^P) + \sum_{j=1}^{n^E} x_{ji}^K \cdot c_j^K \right. \\ \text{Min} & \left. + \sum_{j=1}^{n^E} \left(\max(x_{ji}^L, 0) \cdot c_j^L - \min(x_{ji}^L, 0) \cdot c_j^V \right) \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^{n^M} \left(b_{j\pi(i)}^M \cdot c_j^M + x_{ji}^U \cdot c_j^U + b_{j\pi(i)}^{ME} \cdot c^{ME} + b_{j\pi(i)}^{MR} \cdot c^{MR} + \sum_{k=1}^{n^Q} b_{jk\pi(i)}^{MQN} \cdot c_k^Q \right) \right] \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\text{s.t.} \quad n_i^{RT} \geq \sum_{j=1}^{n^W} b_{ijk}^{RT} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^T\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.25)$$

$$x_{ik}^T \leq M \cdot b_{ijk}^{RT} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^T\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.26)$$

$$\sum_{i=1}^{n^T} (b_{ijk}^{RT} \cdot t_{ij}^{RT} + x_{ik}^T \cdot t_{ij}^{TW}) \leq t_{j\pi(k)}^{KW} \cdot b_{j\pi(k)}^W \quad \begin{array}{l} \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.27)$$

$$x_{ik}^L = x_{i \vee(k)}^L + \sum_{j=1}^{n^T} x_{jk}^T \cdot n_{ij}^{TE} + x_{ik}^K - n_{ik}^B - \sum_{j=1}^{n^T} n_{ij}^{TB} \cdot x_{jk}^T \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.28)$$

$$x_{ik}^T \cdot t_{il}^{TQ} \leq \sum_{j=1}^{n^M} x_{ijk}^{QM} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{0 \dots n^S\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^Q\} \end{array} \quad (5.29)$$

$$\sum_{i=1}^{n^Q} (x_{ijk}^{QM} + b_{ji\pi(k)}^{MQN} \cdot t_i^L) \leq b_{j\pi(k)}^M \cdot t_{j\pi(k)}^M + x_{jk}^U \quad \begin{array}{l} \forall j \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.30)$$

$$x_{ijk}^{QM} \leq M \cdot b_{ji\pi(k)}^{MQ} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^Q\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.31)$$

$$b_{ijk}^{MQ} \leq b_{ij(k-1)}^{MQ} + b_{ijk}^{MQN} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^Q\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.32)$$

$$x_{jk}^U \leq n^{U_{max}} \cdot b_{j\pi(k)}^M \quad \begin{array}{l} \forall j \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.33)$$

$$n_{ik}^{TE} \cdot x_{kj}^T \leq M \cdot (1 - b_{i\pi(j)}^K) \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^T\} \end{array} \quad (5.34)$$

$$x_{ij}^K \leq M \cdot b_{i\pi(j)}^K \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.35)$$

$$b_{ij}^{ME} \geq b_{ij}^M - b_{ij-1}^M \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.36)$$

$$b_{ij}^{MR} \geq b_{ij-1}^M - b_{ij}^M \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.37)$$

$$b_{i0}^M = b_i^{M0} \quad \forall i \in \{1 \dots n^M\} \quad (5.38)$$

$$b_{ij0}^{MQ} \leq b_{ij}^{MQ0} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^Q\} \end{array} \quad (5.39)$$

$$x_{i0}^L = 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (5.40)$$

$$x_{ij}^T \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^T\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.41)$$

$$x_{ijk}^{QM} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^Q\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^M\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.42)$$

$$x_{ij}^K \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.43)$$

Das mathematische Modell der Mitarbeiterplanung baut wie bereits Partialmodell I (vgl. 5.1.2.1) auf dem MLCLSP auf (vgl. 3.2.2). Dabei wird das Modell um die folgenden Zusammenhänge erweitert:

- Nutzung verschiedener Szenarien, um verschiedene Möglichkeiten der Entwicklung, insbesondere der Nachfrage, darzustellen
- Verfügbarkeit von Mitarbeitern
- Qualifikation von Mitarbeitern und Erlernen neuer Qualifikationen

Die in Gleichung 5.24 dargestellte Zielfunktion des mathematischen Programms ist gegenüber Gleichung 3.11 im MLCLSP durch die letzte Summe über alle Mitarbeiter n^M um die Lohnkosten, um die Kosten für die Freistellung und Einstellung von Mitarbeitern sowie um die Kosten für Qualifizierungsmaßnahmen erweitert worden. Außerdem wurden wie bereits im vorhergehenden Partialmodell die einzelnen Szenarien mit ihrer, durch die Funktion $\omega(i)$ gegebenen, Eintrittswahrscheinlichkeit gewichtet und über ihre Periodenzugehörigkeit $\pi(i)$ und den kalkulatorischen Zinsfuß c^Z abgezinst. Der erste Summand der hinzugefügten Summe stellt die Grundgehälter der beschäftigten Mitarbeiter als Produkt aus der die Mitarbeiterbeschäftigung darstellenden Matrix $b_{j\pi(i)}^M$ und dem Grundgehaltsvektor c_j^M , der abhängig vom betrachteten Mitarbeiter j ist, dar. Zusätzlich zum Grundgehalt werden den Mitarbeitern die geleisteten Überstunden x_{ji}^U bezahlt. Diese werden im zweiten Summanden mit dem entsprechenden Kostenvektor c_j^U gewichtet. Die beiden folgenden Summanden addieren die Kosten für die Einstellung von Mitarbeitern c^{ME} und die Kosten für die Freisetzung von Mitarbeitern

c^{MR} in Abhängigkeit von den entsprechenden Binärvariablen. Der letzte Summand stellt die Kosten für Qualifizierungsmaßnahmen dar. Sie werden als Produkt aus Weiterbildungsmatrix $b_{jk\pi(i)}^{MON}$ und dem zugehörigen Kostenvektor c_k^Q berechnet.

Gleichung 5.25 ist identisch mit Gleichung 5.9 und begrenzt die Anzahl der Rüstvorgänge. Gleichung 5.26 entspricht wiederum Gleichung 5.10, die die Technologien so begrenzt, dass sie nur nach einem entsprechenden Rüstvorgang durchführbar sind. Gleichung 5.27 ist zwar identisch mit Gleichung 5.11, die die Maschinenlaufzeit begrenzt, allerdings ist hier zu beachten, dass b_{ij}^W in diesem Modell nicht als Variable, sondern als Matrix von gegebenen Konstanten betrachtet wird; die Werkzeugverfügbarkeit, die im vorherigen mathematischen Modell bestimmt wurde, fließt in dieses Modell als Eingangsgröße ein. Der in Gleichung 5.28 berechnete Lagerbestand am Ende der Perioden entspricht auch dem Modell der Maschinenbestandsplanung (Gleichung 5.12).

Die Zuordnung von Mitarbeitern zu der Nutzung ihrer Qualifikationen erfolgt über die Variable x_{ijk}^{OM} . Sie stellt die Anzahl der Zeiteinheiten dar, die Mitarbeiter j in Szenario k für die Anwendung von Qualifikation i verwendet. Dass die aus der Technologienutzung resultierende benötigte Summe an Zeiteinheiten der Nutzung einer Qualifikation durch die Mitarbeiter erbracht wird, stellt Gleichung 5.29 sicher.

Gleichung 5.30 begrenzt die Einsatzzeit eines Mitarbeiters je Periode. Der erste Summand ist die kumulierte Zeit, die der jeweilige Mitarbeiter für die Durchführung von Qualifikationen verwendet. Der zweite Summand addiert die Zeiten, die für Qualifizierungsmaßnahmen benötigt werden, wobei der Vektor t_i^L für die einzelnen Qualifikationen angibt, wie viel Zeit die Qualifizierung in Anspruch nimmt. Die Obergrenze für die Arbeitszeit wird durch die Summe aus vertraglicher Grundarbeitszeit t_{jk}^M und der Anzahl der geleisteten Überstunden x_{jk}^U gebildet. Dabei wird durch die Binärvariable $b_{j\pi(k)}^M$ berücksichtigt, ob der Mitarbeiter in der Periode dem Unternehmen zur Verfügung steht.

Die in Gleichung 5.31 dargestellte Restriktion stellt sicher, dass ein Mitarbeiter nur dann Arbeitszeit für die Durchführung einer Qualifikation verwendet, wenn er diese Qualifikation in der entsprechenden Periode auch besitzt. In Gleichung 5.32 wird analog zu Gleichung 5.13 in der Maschinenbestandsoptimierung die Qualifikationsmatrix entsprechend der Weiterbildungsmatrix aktualisiert. Die Variable b_{ijk}^{MO} , die das Vorhandensein der Qualifikation j in Periode k darstellt, kann nur dann 1 sein, wenn der Mitarbeiter die Qualifikation entweder schon in der vorhergehenden Periode hatte oder er sie durch eine Qualifizierungsmaßnahme erworben hat.

Durch Gleichung 5.33 wird die Anzahl der Überstunden auf den Maximalwert $n^{U_{max}}$ begrenzt, bzw. auf 0 gesetzt, wenn der Mitarbeiter in der entsprechenden Periode nicht beschäftigt wird. Gleichungen 5.34 und 5.35 stellen sicher, dass im vorherigen Partialmodell als Kaufteile gekennzeichnete Erzeugnisse nicht eigengefertigt und solche, die nicht als Kaufteile gekennzeichnet wurden, nicht fremdbeschafft werden können. Gleichungen 5.36 und 5.37 stellen die Binärvariablen b_{ij}^{ME} und b_{ij}^{MR} für die Kennzeichnung von Mitarbeiterereinstellungen und -freistellungen ein.

In Gleichungen 5.38 und 5.39 werden die Initialwerte für den Mitarbeiterbestand und die Qualifikationsmatrix den Binärvariablen für das Ausgangsszenario zugeordnet. Gleichung 5.40 setzt den Lagerbestand im Ausgangsszenario auf 0. Gleichungen 5.41, 5.42 und 5.43 stellen sicher, dass die Variablen für die Technologiemenge, die Qualifikationszeit je Mitarbeiter und Szenario sowie die Anzahl der geleisteten Überstunden nur positive Werte annehmen können.

5.1.2.3 Ableitung weiterer Variablen

Aus den Ergebnissen der beiden zuvor beschriebenen Partialmodelle müssen auf einem feineren Zeitmodell aufbauend zwei weitere Modelle aufgestellt werden. Dazu sollen für diese Modelle benötigte Variablen, die aus den Ergebnissen der Partialmodelle I und II abgeleitet werden müssen, in diesem Abschnitt bestimmt werden. Sie werden jeweils in Form von Berechnungsvorschriften angegeben.

5.1.2.3.1 Werkzeugauslastung

Aus den Ergebnissen des ersten Partialmodells kann die Auslastung der Werkzeuge in den einzelnen Szenarien abgeleitet werden. Dies geschieht mittels der in Gleichung 5.44 definierten Quotienten aus der verwendeten Kapazität des Werkzeugs und der zur Verfügung stehenden Gesamtkapazität. Ist ein Werkzeug in der Periode nicht vorhanden, so ergibt sich dementsprechend eine Kapazität von 0. Daher muss hier das Maximum aus Gesamtkapazität und einer hinreichend kleinen Zahl (diese wird als Kehrwert einer hinreichend großen Zahl M gebildet) $1/M$ gewählt werden, um eine Division durch 0 zu vermeiden. Da in diesem Fall allerdings auch die verwendete Kapazität des Werkzeugs 0 sein muss (ansonsten würde die in Gleichung 5.11 definierte Restriktion verletzt), ergibt sich in diesem Fall immer eine Werkzeugauslastung von 0.

$$A_{jk}^W = \frac{\sum_{i=1}^{n^T} (b_{ijk}^{RT} \cdot t_{ij}^{RT} + x_{ik}^T \cdot t_{ij}^{TW})}{\max(t_{j\pi(k)}^{KW} \cdot b_{ij}^W, 1/M)} \quad \begin{array}{l} \forall j \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.44)$$

5.1.2.3.2 Definition des Erzeugniszusammenhangs

In den beiden bisher hergeleiteten Partialmodellen wird zwischen den verschiedenen Produktionsprozessen gewählt, die es ermöglichen, die einzelnen Erzeugnisse herzustellen. In den folgenden Modellen wird diese Entscheidung als getroffen vorausgesetzt. Daher ist es möglich, eine Matrix zu bilden, die eindeutig definiert, wie der Erzeugniszusammenhang aufgebaut ist. Dafür wird die Variable g_{ijk} definiert, die je Periode k darstellt, wie viele Einheiten von Erzeugnis i gebraucht werden, um eine Einheit von Erzeugnis j herzustellen. Auf diese Weise wird ein Gozintograph definiert, der allerdings durch das Einbeziehen der Periode über die Zeit veränderbar ist.

Aus den Ergebnissen des ersten Partialmodells lässt sich der Gozintograph wie in Gleichung 5.45 angegeben berechnen. Es wird für jede Technologie über die zweite Doppelsumme geprüft, ob diese in der gegebenen Periode auf Grundlage der gewählten Prozessalternative genutzt wird. Da immer nur eine Prozessalternative verwendet wird (dies wird durch Gleichung 5.17 sichergestellt), kann die zweite Summe nur 0 oder 1 sein, aber niemals größer. Der Bruch aus Input- und Outputmenge der Technologie berechnet, wie groß die eingesetzte Menge von Erzeugnis i ist, um eine Einheit von Erzeugnis j herzustellen. Da gemäß der Konsistenzbedingungen, die zuvor definiert wurden, nur eine Technologie je Prozessalternative ein Erzeugnis erstellen darf, ergibt sich aus der Summe über alle Technologien der korrekte Faktor für die Darstellung des Erzeugniszusammenhangs.

$$g_{ijk} = \sum_{m=1}^{n^T} \frac{n_{im}^{TB}}{n_{jm}^{TE}} \cdot \sum_{l=1}^{n^{PA}} b_{lk}^{PN} \cdot b_{ml}^P \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^E \mid i \neq j\} \\ \forall k \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.45)$$

5.1.2.3.3 Bestimmung von Durchlaufzeiten

Weiterhin sollen in den beiden untergeordneten Partialmodellen feste Durchlaufzeiten für die Produktion der einzelnen Erzeugnisse genutzt werden. Die Durchlaufzeit für ein Erzeugnis in einer Periode lässt sich über die Technologie feststellen, die in dieser Periode für die Fertigung des Erzeugnisses verwendet wird (dies ist über die Konsistenzbedingung in Gleichung 5.17 sichergestellt). Gleichung 5.46 legt die Durchlaufzeit als die maximale Verwendungszeit eines Werkzeugs in dieser Technologie zuzüglich der maximalen Transportzeit für das Erzeugnis zum Bedarfsort fest. Dabei wird die Zeit mit dem reziproken Wert der Outputmenge

für das Erzeugnis multipliziert, so dass die Durchlaufzeit auf die Fertigungsmenge 1 normiert wird.

$$t_{ij}^{DL} = \sum_{k=1}^{n^{PA}} \sum_{l=1}^{n^T} \max \left\{ b_{kj}^{PN} \cdot b_{kl}^P \cdot \frac{1}{n_{il}^{TE}} \cdot t_{lm}^{TW} \mid \forall m \in \{1 \dots n^W\} \right\} + t_i^T \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.46)$$

5.1.2.3.4 Binäre Bedarfsvariable

Die binäre Bedarfsvariable gibt an, ob ein Erzeugnis ein Produkt ist, also ob für dieses Erzeugnis Primärbedarfe vorliegen können. Diese Variable kann entsprechend Gleichung 5.47 aus exogenen Variablen bestimmt werden und benötigt keine Ergebnisse der beiden ersten Partialmodelle.

$$b_i^B = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \sum_{j=1}^{n^S} n_{ij}^B > 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (5.47)$$

5.1.2.3.5 Variable Produktionskosten

Die variablen Produktionskosten für die Herstellung einer Einheit eines Erzeugnisses berechnen sich aus der Zeit, die die einzelnen Werkzeuge dafür benötigt werden. Dies kann ähnlich wie bei der Bestimmung des Erzeugniszusammenhangs über die in einer Periode genutzten Prozessalternativen und damit die genutzte Technologie geschehen. Allerdings muss dazu für jedes Werkzeug die benötigte Zeit der Technologie multipliziert mit den Kosten je Zeiteinheit für dieses Werkzeug hinzugerechnet werden. Gleichung 5.48 stellt die resultierende Formel für die variablen Produktionskosten dar.

$$c_{ij}^P = \sum_{k=1}^{n^T} \left[\frac{1}{n_{ik}^{TE}} \cdot \sum_{m=1}^{n^W} (t_{km}^{TW} \cdot c_m^F) \cdot \sum_{l=1}^{n^{PA}} (b_{lj}^{PN} \cdot b_{kl}^P) \right] \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.48)$$

Die Kosten, die für die Arbeitszeit der Mitarbeiter anfallen, werden ignoriert, da qualifizierte Mitarbeiter in den folgenden Partialmodellen für sämtliche Fertigungsaufgaben grundsätzlich als vorhanden angenommen werden. Dass genügend Mitarbeiter vorhanden sind, um die Fertigungsaufgaben zu übernehmen, soll durch das zweite Partialmodell (Mitarbeiterplanung) gegeben sein.

5.1.2.3.6 Fixe Produktionskosten

Die fixen Produktionskosten ergeben sich ähnlich wie die variablen. Allerdings muss hier nicht die benötigte Werkzeugzeit pro produzierter Einheit eines Erzeugnisses betrachtet werden, sondern die zugehörige Rüstzeit. Dementsprechend wird in Gleichung 5.49 die Summe

über alle Technologien gebildet, die das betrachtete Erzeugnis als Output haben und für diese wiederum die Summe der Rüstzeiten multipliziert mit dem Rüstkostensatz über alle Werkzeuge gebildet.

$$c_{ij}^P = \sum_{k \in \{1 \dots n^I \mid n_{ik}^{TE} > 0\}} \sum_{m=1}^{n^W} (t_{km}^{RT} \cdot c_m^F) \cdot \sum_{l=1}^{n^{PA}} (b_{lj}^{PN} \cdot b_{kl}^P) \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.49)$$

5.1.2.4 Gesamtbedarfsmenge

Die Gesamtbedarfsmenge je Erzeugnis und Szenario kann auf Grundlage der Ergebnisse aus Partialmodell I und II bestimmt werden. Dazu muss für jedes Erzeugnis in jedem Szenario die Summe aus Primärbedarf und Sekundärbedarf, resultierend aus Technologiemenge und Erzeugnisbedarf der jeweiligen Technologie, berechnet werden. Diese Berechnungsvorschrift ist in Gleichung 5.50 dargestellt.

$$n_{ij}^{ges} = n_{ij}^B + \sum_{k=1}^{n^T} x_{kj}^T \cdot n_{ik}^{TB} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.50)$$

5.1.2.5 Ableitung einer Kennzahl

Aus den Ergebnissen der Partialmodelle I und II muss eine Kennzahl abgeleitet werden, die in den später entwickelten Koordinationsprozessen als Entscheidungsvariable genutzt werden kann. Um durch eine einzelne Variable die Güte der hier gefundenen Lösung sowohl für die Auswahl von Produktionsprozessen und Planung des Maschinenbestands als auch für die Mitarbeiterplanung abbilden zu können, müssen die Zielfunktionen der beiden Modelle integriert werden. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Zielfunktionen bereits monetär die auf den aktuellen Zeitpunkt abgezinsten Kosten der jeweiligen gefundenen Lösungen abbilden und das dadurch abgeschätzt werden kann, ob die angestrebte Rentabilität erreicht wird oder nicht. Problematisch ist, dass in beiden Modellen jeweils ein unterschiedliches Produktionsprogramm in der optimalen Lösung genutzt werden kann.

$$K^t = \sum_{i=1}^{n^S} \omega(i) \cdot (1 + c^Z)^{-\pi(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{n^W} \sum_{k=1}^{n^T} (b_{kji}^{RT} \cdot t_{kj}^{RT} \cdot c_j^R + x_{ki}^T \cdot t_{kj}^{TW} \cdot c_j^P) \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{n^E} \left(\max(x_{ji}^L, 0) \cdot c_j^L - \min(x_{ji}^L, 0) \cdot c_j^V \right) + \sum_{j=1}^{n^M} \left(b_{j\pi(i)}^M \cdot c_j^M + x_{ji}^U \cdot c_j^U + \sum_{k=1}^{n^Q} b_{jk\pi(i)}^{MQN} \cdot c_k^Q \right) \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{n^E} x_{ji}^K \cdot c_j^K + \sum_{j=1}^{n^W} (b_{j\pi(i)}^W \cdot c_j^F + b_{j\pi(i)}^{WN} \cdot c_j^N) \right] \quad (5.51)$$

Gleichung 5.51 integriert die in den Gleichungen 5.8 und 5.24 angegebenen Zielfunktionen der beiden mathematischen Modelle indem sie alle Kostenbestandteile der Modelle aufnimmt und diese auf die Kennzahl K^t abbildet. An dieser Stelle ist der Zielfunktionswert aber nicht

eindeutig zu berechnen, da die Werte für b_{kji}^{RT} , x_{ki}^T und x_{ij}^L vom konkret geplanten Produktionsprogramm abhängen, das in beiden Modellen aber unterschiedlich aussehen kann. Daher gibt es zwei verschiedene Werte, die für K^t berechnet werden können. Diese sollen im folgenden als $K^{t,1}$ für die Auswahl von Produktionsprozessen und Planung des Maschinenbestands und $K^{t,2}$ für die Mitarbeiterplanung definiert werden.

5.1.3 Partialmodelle des untergeordneten Zeitmodells

5.1.3.1 Partialmodell III: Definition von Lagerstufen und Bestimmung der Meldebestände

Die Definition der Lagerstufen und die damit einhergehende Berechnung der Meldebestände für verbrauchsorientiert disponierte Teile ist ein Bereich der Materialbedarfsplanung und wird in einem mathematischen Modell integriert dargestellt. Ziel dieses Modells ist es, die Lagerstufen im Erzeugniszusammenhang so zu positionieren, dass einerseits sichergestellt ist, dass die angestrebte Lieferzeit eingehalten werden kann, aber andererseits die Lagerkosten, die auch die Kapitalbindung enthalten, minimal bleiben. Die angestrebte maximale Lieferzeit geht in Form der Variablen $t^{L_{max}}$ ein. Der kritische Pfad der Produktions- und Wiederbeschaffungszeit aller Erzeugnisse, die in ein Produkt einfließen und nicht durch eine Lagerstufe bedient werden, darf nicht größer als $t^{L_{max}}$ sein.

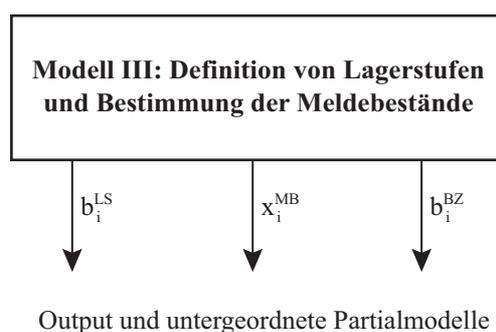


Abbildung 5.5: Ergebnisse des dritten Partialmodells

Wie in Abbildung 5.5 dargestellt, ist das Ergebnis dieses Modells zunächst für jedes Erzeugnis, die Binärvariable b_i^{LS} , die angibt, ob für dieses Erzeugnis eine Lagerstufe definiert wird. Die Variable x_i^{MB} definiert dann für die entsprechenden Erzeugnisse die Meldebestände für die Disposition durch verbrauchsorientierte Verfahren. Die Binärvariable b_i^{BZ} markiert abhängig von der Auslastung der benötigten Werkzeuge, ob die Disposition der Erzeugnisse durch

einen Bestellzyklus getaktet wird, um eine bessere Reihenfolgeplanung auf den Maschinen zu erreichen.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{n^P} (1+c^Z)^{-i} \cdot \sum_{j=1}^{n^E} x_j^{MB} \cdot c_j^L \quad (5.52)$$

$$\text{s.t.} \quad t_{ij}^{PD} \geq b_{ij}^K \cdot t_i^K + (1-b_{ij}^K) \cdot t_{ij}^{DL} + t_{kj}^{PD} - b_i^{LS} \cdot M \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^E \mid g_{ikj} > 0\} \end{array} \quad (5.53)$$

$$t_{ij}^{PD} \geq b_{ij}^K \cdot t_i^K + (1-b_{ij}^K) \cdot t_{ij}^{DL} - b_i^{LS} \cdot M - (1-b_i^B) \cdot M \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.54)$$

$$t_{ij}^{PD} \leq t^{L_{\max}} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.55)$$

$$x_i^{MB} \geq b_i^{LS} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (5.56)$$

$$b_i^{LS} \cdot M \geq x_i^{MB} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (5.57)$$

$$t_{ij}^{WB} \geq b_{ij}^K \cdot t_i^K + (1-b_{ij}^K) \cdot t_{ij}^{DL} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.58)$$

$$t_{ij}^{WB} \geq b_{ij}^K \cdot t_i^K + (1-b_{ij}^K) \cdot t_{ij}^{DL} - t_{kj}^{WBL} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^E \mid g_{ikj} > 0\} \end{array} \quad (5.59)$$

$$t_{ij}^{WBL} \geq t_{ij}^{WB} - M \cdot b_i^{LS} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.60)$$

$$b_i^{BZ} \cdot M \geq (A_{kl}^W - A^{W_{\max}}) \cdot n_{im}^{TE} \cdot t_{mk}^{TW} \cdot \sum_{n=1}^{n^{PA}} b_{nm}^P \cdot b_{nj}^{PN} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \\ \forall k \in \{1 \dots n^W\} \\ \forall l \in \{0 \dots n^S \mid \pi(l) = j\} \\ \forall m \in \{1 \dots n^T\} \end{array} \quad (5.61)$$

$$t_{ij}^{RW} \geq t_{ij}^{WB} + b_i^{BZ} \cdot t^{BZ} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{1 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.62)$$

$$n_{ij}^{LT} = b_{ij}^{LT} \cdot n_{ij}^{ges} + \sum_{k=1}^{n^E} g_{ik \pi(j)} \cdot n_{kj}^{LT} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.63)$$

$$\sum_{i=1}^{n^E} \sum_{j \in \{1 \dots n^S \mid n_{ij}^{ges} > 0\}} \omega(j) \cdot b_{ij}^{LT} \geq p^{\min} \cdot \sum_{i=1}^{n^E} \sum_{j \in \{1 \dots n^S \mid n_{ij}^{ges} > 0\}} 1 \quad (5.64)$$

$$\sum_{k \in \{s_1 \dots s_{t_{rw}}\}} n_{ik}^{LT} \leq x_i^{MB} + M \cdot (1-b_i^{LS}) \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \\ \forall \{s_1 \dots s_{t_{int(j)}}\} \subseteq \{1 \dots n^S \mid \sigma(s_1) = j\}: \\ (s_1 \in \nu(s_2)), \dots, (s_{t_i-1} \in \nu(s_{t_{int(j)}})) \end{array} \quad (5.65)$$

$$x_i^{MB} \geq 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E\} \quad (5.66)$$

$$n_{ij}^{LT} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^S\} \end{array} \quad (5.67)$$

$$t_{ij}^{PD} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.68)$$

$$t_{ij}^{RW} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.69)$$

$$t_{ij}^{WB} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.70)$$

$$t_{ij}^{WBL} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in \{1 \dots n^E\} \\ \forall j \in \{0 \dots n^P\} \end{array} \quad (5.71)$$

Die Zielfunktion dieses Partialmodells ist die in Gleichung 5.52 dargestellte Minimierung der durch die Einhaltung der Meldebestände entstehenden Kosten. Im erzeugnisspezifischen Lagerkostensatz c_i^L sind dabei sämtliche Lagerkosten und die durch die Kapitalbindung entstehenden Kosten enthalten. Dass der durch die Meldebestände hervorgerufene mittlere Lagerbestand nur die Hälfte des Meldebestands beträgt, kann vernachlässigt werden, da dies nur die Multiplikation der gesamten Gleichung mit einem konstanten Faktor bedeuten würde – das Optimum ändert sich nicht.

Die relevante Größe für die Errichtung von Lagerstufen im Erzeugnisbaum ist die maximale Entfernung des einzelnen Erzeugnisses zu einem Produkt. Für dieses Erzeugnis besteht ein Bedarf, wobei keine Lagerstufe zwischen dem Erzeugnis und dem Produkt vorliegt. Dieser Wert kann als maximale Produktdistanz bezeichnet werden, die als Variable t_{ij}^{PD} im Modell berücksichtigt und durch die Gleichungen 5.53 und 5.54 für jedes einzelne Erzeugnis bestimmt wird.

In Gleichung 5.53 wird auf der rechten Seite zunächst abhängig davon, ob ein Erzeugnis durch die Partialmodelle I und II als Kauf- oder Eigenfertigungsteil definiert wurde, entweder die Wiederbeschaffungszeit für die Fremdbeschaffung oder die Durchlaufzeit für den entsprechenden Fertigungsprozess als erster bzw. zweiter Summand gewählt. Hierzu wird die maximale Produktdistanz eines im Gozintographen als verbrauchend eingetragenen Erzeugnisses addiert. Schließlich wird eine hinreichend große Zahl M subtrahiert, falls für dieses Erzeugnis eine Lagerstufe eingeführt wird, was durch die Binärvariable b_i^{LS} dargestellt ist. Der so berechnete Wert muss für alle verbrauchenden Erzeugnisse größer oder gleich der Produktdistanz des betrachteten Erzeugnisses sein.

Die rechte Seite von Gleichung 5.54 entspricht Gleichung 5.53, jedoch wird hier kein im Gozintographen als verbrauchend eingetragenes Erzeugnis berücksichtigt. Aufgrund des letzten

Summanden wird diese Restriktion allerdings nur für alle Erzeugnisse, für die auch Bedarfe vorliegen, wirksam und initialisiert damit die Berechnung der maximalen Produktdistanz an den Produkten.

Die in Gleichung 5.55 dargestellte Restriktion begrenzt die maximale Produktdistanz aller Erzeugnisse auf die angestrebte maximale Lieferzeit $t^{L_{max}}$ und stellt damit sicher, dass die Summe der Wiederbeschaffungszeiten im Erzeugniszusammenhang für jedes Produkt ausreicht, um dieses innerhalb dieser Zeit zu liefern.

In Gleichung 5.56 und 5.57 werden Restriktionen aufgestellt, die sicherstellen, dass der Meldebestand x_i^{MB} für verbrauchsorientiert disponierte Erzeugnisse dann und nur dann eingestellt wird, wenn dieses Erzeugnis durch die Binärvariable b_i^{LS} als zu lagernd markiert ist. Dass der Lagerbestand größer als 1 sein muss, stellt kein Problem dar, da die Meldebestände anschließend an die Optimierung auf ganzzahlige Werte gerundet werden.

Zusätzlich zu den bisher aufgestellten Restriktionen, die die Position der Lagerstufen im Erzeugnisbaum einschränken, muss bestimmt werden, wie hoch die Meldebestände auf den einzelnen Lagerstufen sein müssen. Der entscheidende Einflussfaktor für die Größe des Meldebestands ist die Wiederbeschaffungszeit des zu lagernden Erzeugnisses. Der Meldebestand muss mindestens so groß sein, dass er die Primär- und Sekundärbedarfe des Erzeugnisses über die gesamte Wiederbeschaffungszeit befriedigen kann. Zusätzlich muss bei Erzeugnissen, für die ein Bestellzyklus definiert wird, dieser auch mit Hilfe des Meldebestands überbrückt werden.

Die Wiederbeschaffungszeit eines Erzeugnisses berechnet sich als die Summe der maximalen Wiederbeschaffungszeit eines eingehenden Erzeugnisses und der Bearbeitungszeit auf Ebene des Erzeugnisses. Dabei kann die Bearbeitungszeit bei selbst gefertigten Erzeugnissen als die Durchlaufzeit angenommen werden, da von der zu fertigenden Menge abstrahiert wird. Bei Einkaufsteilen wird die Bearbeitungszeit durch die als exogenen Parameter definierte Wiederbeschaffungszeit beim Zulieferbetrieb bestimmt. Abbildung 5.6 stellt den Zusammenhang zwischen Wiederbeschaffungszeit und maximaler Produktdistanz anhand eines beispielhaften Gozintograph graphisch dar.

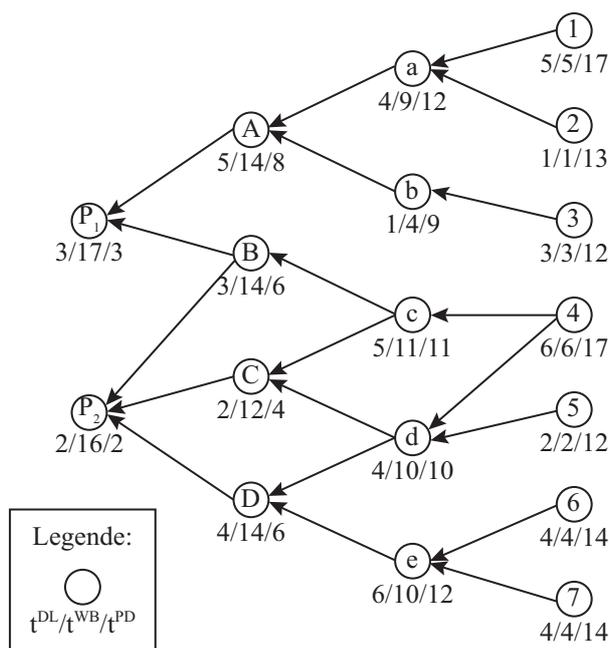


Abbildung 5.6: Beispiel für Wiederbeschaffungszeit und Produktdistanz

Gleichung 5.58 stellt die Wiederbeschaffungszeit t_{ij}^{WB} analog zu Gleichung 5.54 für Kaufteile auf die Wiederbeschaffungszeit und für Eigenfertigungsteile auf die Durchlaufzeit ein. Gleichung 5.59 entspricht dieser Gleichung, betrachtet aber zusätzlich im Erzeugniszusammenhang vorgelagerte Erzeugnisse. Deren Wiederbeschaffungszeit wird in dieser Gleichung als zusätzlicher Summand eingeführt, wobei dies nur dann geschieht, wenn für das vorgelagerte Erzeugnis keine Lagerstufe definiert ist, da dies bedeuten würde, dass es ohne Durchlaufzeit verfügbar wäre. Diese bedingte Wiederbeschaffungszeit wird durch die Variable t_{ij}^{WB} definiert, die in der folgenden Gleichung 5.60 entsprechend der Binärvariablen b_i^{LS} hergeleitet wird.

Gleichung 5.61 bestimmt die Binärvariable b_i^{BZ} , die dann 1 ist, wenn für Erzeugnis i ein Bestellzyklus definiert wird. Da der Bestellzyklus zu höheren Beständen führt, ist er grundsätzlich nachteilig. Allerdings kann er genutzt werden, um durch eine langfristige und in regelmäßigen Abständen ausgeführte Reihenfolgeplanung einen höheren Auslastungsgrad von Fertigungsmitteln zu erreichen. Daher werden in diesem Modell genau diejenigen Erzeugnisse als durch einen Bestellzyklus zu steuernd markiert, für deren Herstellung ein Werkzeug verwendet wird, dessen Auslastungsgrad die maximale ohne Bestellzyklus zu disponierende Auslastung $A^{W_{max}}$ übersteigt.

Ob ein Werkzeug zur Herstellung des Erzeugnisses verwendet wird, wird in Gleichung 5.61 durch Multiplikation der Variablen „Output des Erzeugnisses durch eine Technologie“ (n_{im}^{TE}), „Nutzung des Werkzeugs für die Technologie“ (t_{mk}^{TW}), „Verfügbarkeit der Technologie in der

Prozessalternative“ (b_{ij}^P) und „Nutzung der jeweiligen Prozessalternative in der betrachteten Periode“ (b_{ij}^{PN}) abgebildet. Wenn für eine Kombination aus Werkzeug und Erzeugnis keiner der Summanden 0 und gleichzeitig A_{kl}^W größer als $A^{W_{max}}$ ist, dann muss $b_i^{BZ} = 1$ gelten.

Gleichung 5.62 bestimmt die Reichweite, für die der Meldebestand nach seinem Unterschreiten reichen muss. Diese entspricht zunächst der Wiederbeschaffungszeit, allerdings wird für Erzeugnisse, für die ein Bestellzyklus festgelegt ist, zusätzlich die Dauer des Bestellzyklus, definiert durch den Parameter t^{BZ} , addiert.

Gleichung 5.63 bestimmt unter Beachtung der angestrebten minimalen Liefertreue und damit unter Auslassung einiger Bedarfe, für die die maximale Lieferzeit nicht eingehalten wird, die kumulierten Bedarfsmengen n_{ij}^{LT} je Szenario und Erzeugnis. Dabei gibt die Binärvariable b_{ij}^{LT} an, für welche Bedarfe die maximale Lieferzeit eingehalten wird. Gleichung 5.64 gewichtet diese Variablen mit der Eintrittswahrscheinlichkeit des zugehörigen Szenarios und summiert diese Werte auf. Der Wert muss mindestens der angestrebten minimalen Liefertreue p^{min} multipliziert mit der Anzahl der Bedarfe entsprechen. Szenarien, in denen keine Bedarfe vorliegen, können nicht berücksichtigt werden, da andernfalls in diesen die Bedarfsmengen von 0 grundsätzlich zur Verfügung stünden, und damit ein sehr viel größerer Teil der realen Bedarfe nicht eingehalten werden müsste.

Gleichung 5.65 stellt schließlich dar, dass die Sicherheitsbestände die kumulierten Bedarfe unter Beachtung der angestrebten minimalen Liefertreue der Erzeugnisse, für die Lagerstufen eingeführt wurden, über die benötigte Reichweite decken müssen. Dazu werden alle Wege $\{s_1 \dots s_{t_{rw}}\}$ der Länge t_i^{RW} durch den Szenariobaum betrachtet, die im jeweiligen Szenario im größeren Detaillierungsgrad enden. Über diese Wege werden die Gesamtbedarfe für jedes Erzeugnis i auf der linken Seite der Gleichung aufaddiert. Dieser Bedarf wird mit dem Meldebestand x_i^{MB} von Erzeugnis i verglichen. Ist für Erzeugnis i eine Lagerstufe definiert, so muss der Meldebestand größer oder gleich jeder Bedarfssumme auf jedem Weg sein. Ist keine Lagerstufe definiert, so kann der Sicherheitsbestand 0 sein, da eine hinreichend große Zahl M zur rechten Seite der Gleichung addiert wird. Die Modellierung der Wege einer bestimmten Länge, die wiederum abhängig von einer Modellvariablen ist, stellt eine Nichtlinearität des Modells dar. Dies wird an dieser Stelle bewusst in Kauf genommen, da diese Formulierung eine exakte Modellierung des Problems ermöglicht. Im Rahmen der Evaluation des Verfahrens an einem Beispiel im folgenden Kapitel wird eine Methode dargestellt, wie diese Nichtlinearität durch Nutzung einer Annahme zur Vereinfachung umgangen werden kann.

$$b_{ij}^{MB} \cdot M > x_i^{MB} - x_{ij}^L \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.75)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$(1 - b_{ij}^{MB}) \cdot M \geq x_{ij}^L - x_i^{MB} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.76)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$b_{ij}^{MBN} \geq b_{ij}^{MB} - b_{i\nu(j)}^{MB} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.77)$$

$$\forall j \in \{1 \dots n^S\}$$

$$b_{ij}^{MBN} \leq b_{ij}^{MB} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.78)$$

$$\forall j \in \{1 \dots n^S\}$$

$$b_{ij}^{MBN} \leq 1 - b_{i\nu(j)}^{MB} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.79)$$

$$\forall j \in \{1 \dots n^S\}$$

$$b_{i0}^{MBN} = b_{ij}^{MB} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.80)$$

$$x_{ik}^P \leq M \cdot b_{ij}^{MBN} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.81)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$\forall k \in \lambda(j; t_{i\pi(j)}^{RW})$$

$$x_{ik}^P - x_i^{LG} \leq M \cdot (1 - b_{ij}^{MBN}) \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.82)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$\forall k \in \lambda(j; t_{i\pi(j)}^{RW})$$

$$x_i^{LG} - x_{ik}^P \leq M \cdot (1 - b_{ij}^{MBN}) \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.83)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$\forall k \in \lambda(j; t_{i\pi(j)}^{RW})$$

$$x_{ij}^P = 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.84)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S \mid j < t_{i\pi(j)}^{RW}\}$$

$$n_{ij}^{LT} = b_{ij}^{LT} \cdot n_{ij}^{ges} + \sum_{k=1}^{n^E} g_{ikj} \cdot n_{kj}^{LT} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.85)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$\sum_{i=1}^{n^E} \sum_{j \in \{0 \dots n^S \mid n_{ij}^{ges} > 0\}} \omega(j) \cdot b_{ij}^{LT} \geq p^{\min} \cdot \sum_{i=1}^{n^E} \sum_{j \in \{0 \dots n^S \mid n_{ij}^{ges} > 0\}} 1 \quad (5.86)$$

$$x_{ij}^P \leq b_{ij}^{PE} \cdot M \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.87)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$x_{i0}^L = x_i^{L0} \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.88)$$

$$x_i^{LG} \geq 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.89)$$

$$n_{ij}^{LT} \geq 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.90)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

$$x_{ij}^P \geq 0 \quad \forall i \in \{1 \dots n^E \mid b_i^{LS} = 1\} \quad (5.91)$$

$$\forall j \in \{0 \dots n^S\}$$

Das in den Gleichungen 5.72 bis 5.91 dargestellte mathematische Modell stellt diese Zusammenhänge auf Basis des CLSP (vgl. Abschnitt 3.2.1) dar. In diesem Partialmodell kann jede Stufe des Produktionsnetzes isoliert betrachtet werden. Die Reihenfolgeplanung für nicht verbrauchsorientiert disponierte Erzeugnisse wird nicht durch das hier entworfene System gesteuert und muss daher nicht in die Planung mit aufgenommen werden. Daher werden die für das jeweilige Erzeugnis vorliegenden Primär- und Sekundärbedarfe je Periode kumuliert betrachtet, der Bestandsverlauf entsprechend berechnet und die Produktionszeitpunkte über die Meldebestände bestimmt. Die Modellierung kann auf Basis des einfacheren, einstufigen Modells geschehen. Dabei wird als Wiederbeschaffungszeit die im vorhergehenden Modell bestimmte Variable t_{ij}^{RW} genutzt, die Verzögerungen durch die Nutzung eines Bestellzyklus mit einbezieht.

Die in Gleichung 5.72 dargestellte Zielfunktion des Modells gewichtet die auftretenden Kosten je Szenario und Erzeugnis mit der Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios und zinst diesen Wert über die Periodenzugehörigkeit des Szenarios und den kalkulatorischen Zinsfuß ab. Dabei werden nur die Kosten derjenigen Erzeugnisse betrachtet, für die eine Lagerstufe definiert ist und die damit verbrauchsorientiert disponiert werden. Die Kosten setzen sich aus den Lagerkosten für den Endbestand der jeweiligen Periode sowie den fixen und variablen Produktionskosten zusammen.

Gleichung 5.73 stellt entsprechend dem CLSP den Bestand am Ende einer Periode dar, wobei sie, ebenso wie bei den weiteren Restriktionen dieses Partialmodells, nicht für alle Erzeugnisse definiert wird, sondern nur für diejenigen, für die im vorhergehenden Partialmodell eine Lagerstufe definiert wurde. Der Bestand eines Szenarios wird berechnet als die Summe des Bestands im vorhergehenden Szenario und der in dieser Periode fertiggestellten Produktionsmenge x_{ij}^P , von der die aus Primär- und Sekundärbedarf bestimmte Gesamtbedarfsmenge der Periode abgezogen wird.

In Gleichung 5.74 wird festgelegt, dass der Bestand eines Erzeugnisses nicht kleiner als 0 werden darf. Zwar ist es im Rahmen der angestrebten Liefertreue, die kleiner als 100% sein kann, eine Nichtbefriedigung einzelner Bedarfe möglich, allerdings ist dies bereits in der in Gleichung 5.73 berücksichtigten Gesamtbedarfsmenge enthalten (vgl. deren Herleitung in den Gleichungen 5.85 und 5.86).

Die in den Gleichungen 5.75 und 5.76 dargestellten Restriktionen stellen die Binärvariable b_{ij}^{MB} ein. Diese soll anzeigen, ob der Bestand für Erzeugnis i in Szenario j den Meldebestand unterschritten hat. Dafür wird durch Gleichung 5.75 zunächst sichergestellt, dass b_{ij}^{MB} dann 1 ist, wenn der Lagerbestand kleiner oder gleich dem Meldebestand ist. Gleichung 5.76 be-

grenzt b_{ij}^{MB} zusätzlich so, dass diese Variable dann 0 sein muss, wenn der Bestand größer als der Meldebestand des Erzeugnisses ist. Insgesamt wird damit sichergestellt, dass die Binärvariable dann (und nur dann) 1 ist, wenn der Bestand kleiner oder gleich dem Meldebestand ist.

Gleichungen 5.77, 5.78 und 5.79 stellen die Binärvariable b_{ij}^{MBN} so ein, dass diese genau dann 1 ist, wenn der Meldebestand für Erzeugnis i in Szenario j neu unterschritten wurde. Das heißt, es müssen $b_{ij}^{MB}=1$ und $b_{i v(j)}^{MB}=1$ gleichzeitig gelten. Gleichung 5.80 stellt die Binärvariable b_{ij}^{MBN} für das Ausgangsszenario auf den Wert von b_{i0}^{MB} ein, da für dieses Szenario kein Vorgänger existiert.

Gleichung 5.81, 5.82 und 5.83 bilden die aus einer Unterschreitung des Meldebestandes resultierende Bestandserhöhung nach Ablauf der Wiederbeschaffungszeit ab. Dazu wird die Funktion $\lambda(i, j)$ genutzt, die ein Szenario i auf die Menge seiner Nachfolgeszenarien, die j Perioden nach dieser liegen, abbildet. Für ein Szenario, in dem der Meldebestand unterschritten wurde, wird in allen Nachfolgeszenarien, deren Periodenzugehörigkeit um die Wiederbeschaffungszeit später ist, ein Zugang in Höhe der Losgröße der Periode des Ausgangsszenarios zugebucht. Die fixen und variablen Kosten werden dabei durch die Zielfunktion dem empfangenden Szenario zugerechnet, allerdings kann durch eine entsprechende Pflege der Kosten diese Ungenauigkeit bereits in den Kostenvektoren berücksichtigt werden, so dass die Kosten implizit periodengenau berücksichtigt werden. Gleichung 5.84 stellt die Bestandserhöhung für Szenarien, in denen aufgrund der Wiederbeschaffungszeit noch keine Bestandserhöhung vorkommen kann, auf 0 ein.

Gleichungen 5.85 und 5.86 entsprechen den Gleichungen 5.63 und 5.64 im vorhergehenden Partialmodell und bestimmen unter Ausnutzung der angestrebten minimalen Liefertreue die kumulierten Bedarfsmengen n_{ij}^{LT} je Szenario und Erzeugnis. Hier kann nicht das Ergebnis des vorhergehenden Partialmodells genutzt werden, da es in diesem Modell sinnvoll sein kann, andere Bedarfe nicht zu bedienen.

Die in Gleichung 5.87 dargestellte Restriktion stellt die Binärvariable b_{ij}^{PE} ein, die angibt, ob ein Erzeugnis in einem Szenario produziert und zur Verrechnung der fixen Produktionskosten in der Zielfunktion genutzt wird. In Gleichung 5.88 wird für jedes Erzeugnis die Lagervariable mit der aktuellen Lagermenge x_i^{L0} initialisiert. Gleichungen 5.89, 5.90 und 5.91 sind die Nichtnegativitätsbedingungen für die Losgröße, die Nachfragemenge unter Einhaltung der minimalen Liefertreue und die Produktionsmenge.

5.1.3.3 Ableitung von Kennzahlen

Auch auf der Ebene der Partialmodelle III und IV müssen Kennzahlen definiert werden, die in den später in Abschnitt 5.2 entwickelten Koordinationsprozessen zur Steuerung genutzt werden können. Zwei der relevanten Kennzahlen sind die durchschnittliche und die maximale Kapitalbindung in gelagerten Erzeugnissen. Diese können im Rahmen des Planungsmodells für die Konfiguration der Dispositionsstrategien bestimmt werden, da hier für jedes Erzeugnis, für das eine Lagerstufe definiert ist, der Bestandsverlauf über die einzelnen Szenarien berechnet wird.

$$KB^d = \frac{1}{n^P} \cdot \sum_{i=1}^{n^S} \omega(i) \cdot \sum_{j=1}^{n^E} b_j^{LS} \cdot x_{ji}^L \cdot c_j^L \quad (5.92)$$

$$KB^m = \max \left\{ \sum_{j=1}^{n^E} b_j^{LS} \cdot x_{ji}^L \cdot c_j^L \mid \forall i \in \{1 \dots n^S\} \right\} \quad (5.93)$$

Gleichung 5.92 zeigt die entsprechend einem Summanden der Zielfunktion des Modells zur Losgrößenbildung berechneten Kosten für die Kapitalbindung. Durch Gewichtung der einzelnen Szenarien mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und die Division durch die Anzahl der Perioden erhält man die mittleren Kapitalbindungskosten über den gesamten Planungshorizont KB^d . Gleichung 5.93 berechnet entsprechend die maximalen Werte der Kapitalbindungskosten KB^m über alle Szenarien.

$$K^o = \sum_{i=1}^{n^S} (1 + c^Z)^{-\pi(i)} \cdot \omega(i) \sum_{j=1}^{n^E} b_j^{LS} \cdot (x_{ji}^L \cdot c_j^L + x_{ji}^P \cdot c_{j\pi(i)}^{P_{var}} + b_{ji}^{PE} \cdot c_{j\pi(i)}^{P_{fix}}) \quad (5.94)$$

Gleichung 5.94 stellt die Berechnungsvorschrift für die Variable K^o , eine weitere Kennzahl der Partialmodelle III und IV dar. Sie entspricht genau der Zielfunktion des Modells zur Losgrößenbildung und stellt damit die Summe der auftretenden Kosten bei Nutzung des in diesem Modell bestimmten Produktionsprogramms (d. h. der dort berechneten Werte für x_{ji}^L und x_{ji}^P) dar.

5.2 Definition von Koordinationsprozessen

Um die zuvor entwickelten Partialmodelle zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen zu verwenden, müssen Koordinationsprozesse definiert werden, die sie miteinander verknüpfen. Durch Ergänzung von zusätzlichen Planungsprozessen, die bei den unteren Partialmodellen mit einem feineren Zeitmodell beginnen, kann das Fertigungssystem auch nur auf Basis dieser Modelle an sich ändernde Rahmenbedingungen angepasst werden. Bei Bedarf kann die Anpassung auf die Ebene der übergeordneten Partialmodelle I und II ausgeweitet werden. Die hier definierten Koordinationsprozesse

bestimmen, wann welches Optimierungsmodell eines der Partialsysteme neu plant und wie mit den Ergebnissen umgegangen wird.

Zur Steuerung der Koordinationsprozesse werden die in 5.1.2.5 und 5.1.3.3 definierten Kennzahlen genutzt, um zu entscheiden, ob eine Lösung alle Anforderungen der strategischen Ziele erfüllt. Es wäre auch denkbar, die Einhaltung der Grenzwerte für die Kennzahlen bereits in den Planungsmodellen in Form von Restriktionen sicherzustellen. Allerdings kann dies dazu führen, dass sich keine zulässigen Lösungen für die Modelle mehr finden lassen und die Planung dadurch zu keinem Ergebnis kommt. Daher werden die Kennzahlen nachgelagert durch die hier definierten Prozesse genutzt.

Grundsätzlich können Planungsläufe, die auf der übergeordneten Planungsebene (Partialmodelle I und II), und solche, die auf der untergeordneten Ebene (Partialmodelle III und IV) beginnen, unterschieden werden. Außerdem kann danach unterschieden werden, welches der Auslöser für den Planungsprozess ist. Dabei können drei verschiedene grundlegende Auslöser für eine Neuplanung identifiziert werden:

- Es wird eine Neuplanung durch einen Regeltermin angestoßen (zeitgesteuerte Planung).
- Auf der übergeordneten Planungsebene wurde eine Neuplanung durchgeführt, die zu neuen Rahmenbedingungen für die untergeordneten Partialmodelle führt.
- Es ist ein extern hervorgerufenes Ereignis aufgetreten und erkannt worden (z. B. eine relevante Abweichung von den prognostizierten Bedarfsmengen).

5.2.1 Planungsbeginn auf Ebene des übergeordneten Zeitmodells

Wird die Neuplanung auf der Ebene des übergeordneten Zeitmodells angestoßen, so wird der in Abbildung 5.8 dargestellte Prozess ausgeführt. Zunächst muss eine Überprüfung der strategischen Entscheidungen, der Zielparameter und der Prozessalternativen vorgenommen werden. Dieser Schritt wird manuell durchgeführt und kann auch durch Überprüfung und Bestätigung der Aktualität der in vorherigen Planungsläufen genutzten Werte ausgeführt werden. Die Integrität der exogenen Parameter muss dabei entsprechend der in Abschnitt 5.1.1.4 dargestellten Konsistenzbedingungen sichergestellt werden. Die dort formulierten Gleichungen können für die Automatisierung dieses Prozessschrittes genutzt werden.

Auf Basis dieser Daten werden anschließend die Partialmodelle I und II nacheinander ausgeführt – zunächst die Auswahl von Produktionsprozessen und Planung des Maschinenbestands, danach die Mitarbeiterplanung. Die aus diesen Modellen abgeleiteten Kennzahlen $K^{t,1}$ und

$K^{t,2}$ werden anschließend genutzt, um die gefundene Lösung zu bewerten. Diese Kennzahlen geben die Kosten an, die bei den in der Optimierung der beiden Partialmodelle gefundenen Variablenwerte vorliegen. Diese Kosten müssen mit einem Zielwert verglichen werden. Der Zielwert ist die maximale Kostensumme $K^{t,max}$, die eine strategische Entscheidung darstellt. Wenn zumindest eine der beiden Kennzahlen kleiner oder gleich dem Maximalwert ist, kann die Lösung akzeptiert werden. Anschließend wird die Planung mit der Lösung der Partialmodelle III und IV fortgesetzt.

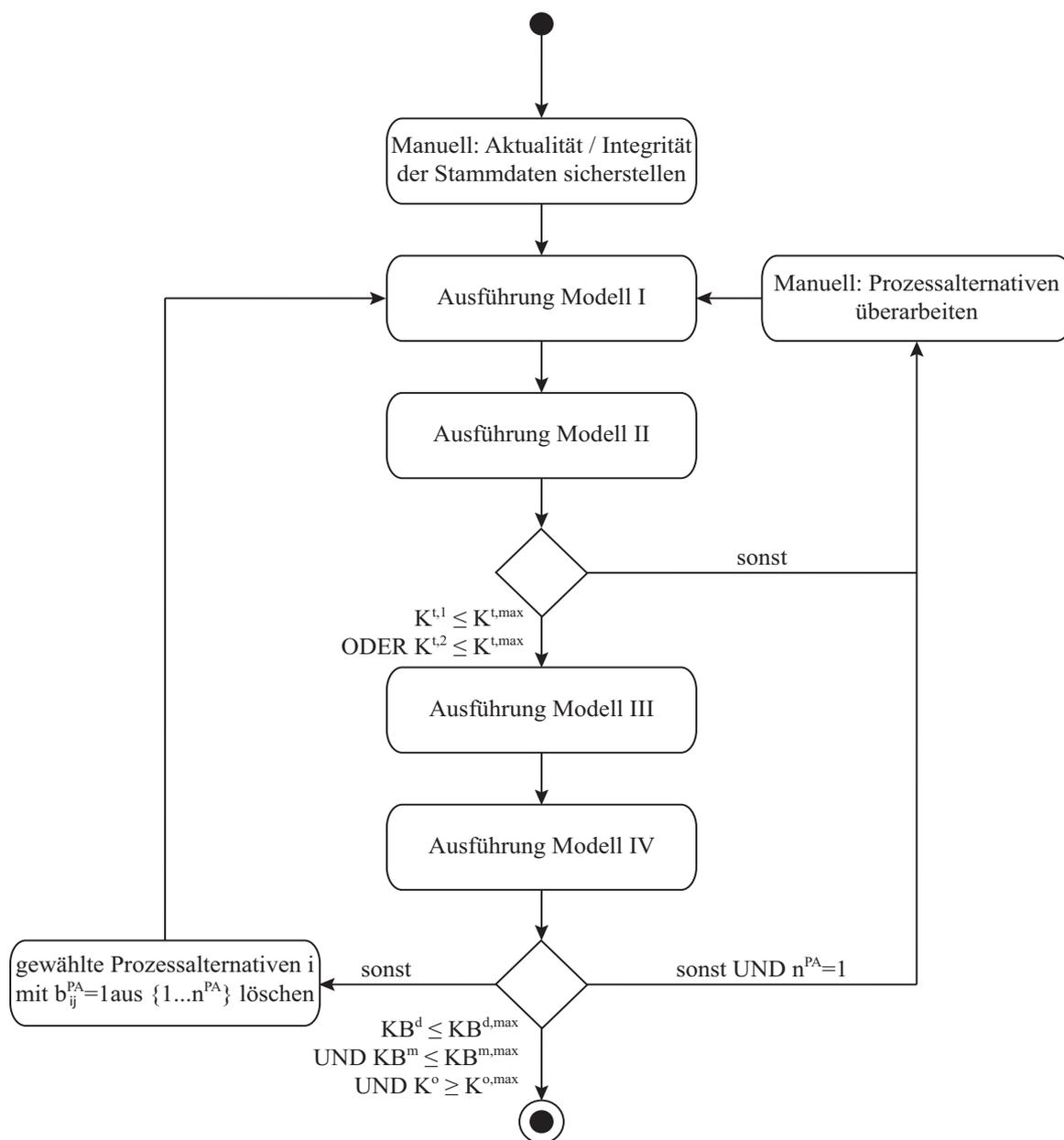


Abbildung 5.8: Koordinationsprozess bei Planungsbeginn mit Partialmodell I

Findet sich in den übergeordneten Partialmodellen hingegen keine Lösung, für die die Kosten den Maximalwert einhalten, so müssen die Planungsparameter entsprechend angepasst werden. In diesem Fall bedeutet dies, dass zusätzliche Prozessalternativen definiert oder die bestehenden entsprechend angepasst werden müssen. Aufbauend auf dem Ergebnis dieses manuellen Prozesses werden zunächst erneut die beiden übergeordneten Partialmodelle genutzt, um zu einer zulässigen Lösung zu kommen.

Ist eine zulässige Lösung der Partialmodelle I und II gefunden, wird anschließend ein Planungslauf mit den Partialmodellen III und IV durchgeführt. Dabei erfolgt zunächst die Definition von Lagerstufen und Bestimmung der Meldebestände, danach die Konfiguration der Dispositionsstrategien. Die Ergebnisse der Planung auf dieser Ebene werden anschließend ebenfalls über Kennzahlen bewertet. Die folgenden Bedingungen müssen gegeben sein, damit das Ergebnis angenommen wird:

- Die durchschnittlichen Kapitalbindungskosten KB^d dürfen nicht über dem Grenzwert $KB^{d,max}$ liegen.
- Die maximalen Kapitalbindungskosten je Periode KB^m dürfen nicht über dem Grenzwert $KB^{m,max}$ liegen.
- Die Summe der bis zum Planungshorizont auftretenden Kosten K^o darf nicht die maximal zulässigen Kosten $K^{o,max}$ überschreiten.

Sind alle diese Bedingungen erfüllt, so terminiert der Planungsprozess. Ist mindestens eine der Bedingungen nicht erfüllt, so muss eine Neuplanung auf der übergeordneten Ebene vorgenommen werden. Um bei der Neuplanung zu einem anderen Ergebnis zu gelangen als bei dem vorherigen Planungslauf, muss eine Änderung an den Stammdaten vorgenommen werden. Dazu wird die gewählte Prozessalternative aus der Menge der Prozessalternativen $\{1 \dots n^{PA}\}$ entfernt – sie hat sich damit als nicht geeignet erwiesen. Besteht die Menge der Prozessalternativen zu diesem Zeitpunkt nur noch aus einem Element, das heißt es gilt $n^{PA}=1$, so muss auch hier der manuelle Prozessschritt zur Generierung neuer Prozessalternativen genutzt werden.

5.2.1.1 Zeitgesteuerte Auslösung der Planung

Die Einflussfaktoren, die das Ergebnis des Planungsprozesses beeinflussen, lassen sich grundsätzlich danach unterscheiden, ob sie eine sofortige Neuplanung erforderlich machen (Ereignisse mit entscheidenden Auswirkungen) oder nicht. Diese Entscheidung muss immer bei Erkennen eines Ereignisses getroffen werden. Allerdings kann eine größere Anzahl von Ereig-

nissen, für die jeweils keine Neuplanung durchgeführt wurde, in Summe zu für die Planung relevanten Veränderungen führen. Daher muss ein zeitgesteuerter Planungsprozess definiert werden, der in regelmäßigen Intervallen eine Neuplanung, beginnend mit Partialmodell I, auslöst. Zusätzlich wird bei einer solchen Neuplanung jeweils der Planungshorizont entsprechend dem vergangenen Zeitintervall erweitert. Daher muss die Dauer des Intervalls für die regelmäßige Neuplanung $T^{NP,t}$ ein ganzzahliges Vielfaches der Dauer eines Zeitabschnittes in den Partialmodellen I und II $T^{B,t}$ betragen. Eine konkrete Ausprägung des Wertes wird hier nicht angegeben; $T^{NP,t}$ stellt einen Parameter dar, über den das hier entwickelte Planungsverfahren konfiguriert werden kann.

5.2.1.2 Auslösung durch Neuplanung auf übergeordneter Ebene

Werden Entscheidungen auf der strategischen Ebene getroffen, die entscheidende Auswirkungen auf die Planungsmodelle I und II haben, so muss eine Neuplanung entsprechend dem hier entworfenen Prozess ausgelöst werden. Daher muss in Geschäftsprozessen, die zu strategischen Entscheidungen führen können, immer auch ein anschließend durchgeführter Planungslauf beginnend mit den Partialmodellen I und II integriert werden. Zunächst müssen allerdings die Stammdaten der Planungsmodelle den sich aus den strategischen Entscheidungen ergebenden Zielsetzungen angepasst werden.

5.2.1.3 Erkennung eines planungsrelevanten Ereignisses

Es können im laufenden Fertigungsbetrieb Ereignisse auftreten, die eine Neuplanung zur Folge haben. Ereignisse, die die Planungsmodelle I und II beeinflussen, müssen erkannt werden, und es muss überprüft werden, ob das Ereignis einen signifikanten Einfluss auf das Planungsergebnis hat. Ist der Einfluss gering, so muss keine Neuplanung ausgelöst werden; die zeitgesteuerte Auslösung der Planung ist ausreichend, um den Plan anzupassen. Wird ein signifikanter Einfluss festgestellt, so muss der Geschäftsprozess im Anschluss eine Neuplanung entsprechend dem hier entworfenen Planungsprozess auslösen.

5.2.2 Planungsbeginn auf der Ebene des untergeordneten Zeitmodells

Bei einer Planung beginnend mit den Partialmodellen III und IV, die das feinere Zeitmodell nutzen, sollten im Normalfall die Ergebnisse der Planung durch die Partialmodelle I und II nicht tangiert werden, da diese einen längeren Zeithorizont berücksichtigen. Außerdem sind die Abschnitte des verwendeten Zeitmodells in diesen Partialmodellen größer, weshalb die Daten, auf denen sie aufbauen, noch gar keinen Änderungen unterworfen sein können, ob-

dungskosten je Periode KB^m und Summe der bis zum Planungshorizont auftretenden Kosten K^o).

Da die Ergebnisse des vorhergehenden Planungslaufs auf Ebene der Partialmodelle III und IV bezüglich dieser Kennzahlen zulässig gewesen sein müssen (sonst hätte der oben definierte Planungsprozess nicht terminiert) und die in den Partialmodellen I und II definierten Rahmenbedingungen für die neuen Planungsläufe nicht verändert wurden (sonst wäre durch den auf übergeordneter Ebene beginnenden Planungsprozess auch einer auf der untergeordneten Ebene ausgelöst worden), ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Ergebnisse dieses Planungslaufs bezüglich der Kennzahlen ebenfalls zulässig sind. In diesem Fall terminiert der Algorithmus (ohne Ausführung der Partialmodelle I und II).

Die weiteren Schritte in diesem Prozessmodell, die bei Eskalation des Prozesses auf die Ebene der Partialmodelle I und II ausgeführt werden, entsprechen dem bereits in Abbildung 5.8 dargestellten Planungsprozess, der in Abschnitt 5.2.1 erläutert wird. Deshalb wird an dieser Stelle auf die ausführliche Darstellung verzichtet. Damit ist der Koordinationsprozess bei Planungsbeginn mit Partialmodell III ein Beispiel für einen Geschäftsprozess, der beim Auftreten eines Ereignisses die in 5.2.1.3 dargestellte Schnittstelle nutzt, um den übergeordneten Planungsprozess auszulösen.

5.2.2.1 Zeitgesteuerte Auslösung der Planung

Die Einflussfaktoren, die das Ergebnis des Planungsprozesses beeinflussen, lassen sich grundsätzlich danach unterscheiden, ob sie eine sofortige Neuplanung erforderlich machen (Ereignisse mit entscheidenden Auswirkungen auf die Nutzbarkeit des Plans) oder nicht. Diese Entscheidung muss immer bei Erkennen eines Ereignisses getroffen werden. Allerdings kann eine größere Anzahl von Ereignissen, für die jeweils keine Neuplanung durchgeführt wurde, in Summe zu für die Planung relevanten Veränderungen führen. Deshalb muss ebenfalls auf der untergeordneten Ebene ein zeitgesteuerter Planungsprozess definiert werden, der in regelmäßigen Intervallen eine Neuplanung auslöst. Zusätzlich wird bei einer solchen Neuplanung jeweils der Planungshorizont entsprechend dem vergangenen Zeitintervall erweitert. Daher muss die Dauer des Intervalls für die regelmäßige Neuplanung $T^{NP,o}$ ein ganzzahliges Vielfaches der Dauer eines Zeitabschnittes in den in Partialmodellen III und IV genutzten Zeitmodellen $T^{B,t}$ betragen.

5.2.2.2 Erkennung eines planungsrelevanten Ereignisses

Planungsrelevante Ereignisse müssen durch eine Instanz erkannt und klassifiziert werden. Dabei müssen Ereignisse, die eine Neuplanung beginnend auf der übergeordneten Ebene hervorrufen, nicht beachtet werden, da dieser Planungsprozess ebenfalls eine Neuplanung durch die Partialmodelle III und IV auslöst.

6 Validierung

In diesem Kapitel wird das Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen an einem Szenario validiert. Dazu wird die praktische Fragestellung des Unternehmens aus der Schienenfahrzeugindustrie aufgegriffen und mit Hilfe des Verfahrens gelöst. Im folgenden Abschnitt 6.1 werden zunächst das Anwendungsszenario und die zu beantwortende Fragestellung vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 6.2 die Datenbasis des Szenarios in der für die entwickelten mathematischen Modelle benötigten Form dargestellt. Abschnitt 6.3 zeigt die Anwendung des Verfahrens, erläutert die Ergebnisse der mathematischen Modelle und die für die Lösung benötigten Rechenzeiten.

6.1 Anwendungsszenario

Das hier vorgestellte Anwendungsszenario orientiert sich direkt an der dieser Arbeit zugrunde liegenden Problemstellung eines Unternehmens aus der Schienenfahrzeugindustrie. Dabei ist ein Teil der Daten und Sachverhalte direkt aus dem Unternehmen übernommen, während andere Teile geschätzt oder approximiert werden müssen. Außerdem werden zum Teil Daten verfälscht, um der Notwendigkeit des Schutzes vertraulicher Daten Rechnung zu tragen, wobei allerdings darauf geachtet wird, dass die Ergebnisse trotzdem der originären Problemstellung entsprechen.

Im Anwendungsszenario werden in einem zweistufigen Fertigungsprozess pneumatische Ventilmodule (im Folgenden als Ventilgruppen bezeichnet) zur Steuerung der Bremsanlagen von Schienenfahrzeugen hergestellt. Diese Ventilgruppen existieren in diversen Varianten, die sich aus dem Einsatzzweck ergeben. Sie können sich insbesondere in ihrer Leistungsfähigkeit, dem grundsätzlichen Aufbau sowie der materialbedingten Beständigkeit für den Betrieb in besonderen Umgebungen (z. B. extreme klimatische Bedingungen oder hoch korrosive Umweltbedingungen, wie sie im Kalibergbau vorherrschen) unterscheiden. Aufbauend auf diesen Eigenschaften kann zwischen 40 unterschiedlichen Produkten (bzw. Produktvarianten) differenziert werden, für die Primärbedarfe von Endkunden, in der Regel Schienenfahrzeugherstellern, vorliegen können.

Der zweistufige Produktionsprozess gliedert sich derzeit in die (spanende) Fertigung und die Montage, wie in Abbildung 6.1 dargestellt. Beide Prozesse finden in dem selben Werk statt. Die Montage besteht aus vier parallelen Vormontagelinien und einer Endmontagelinie, die direkt miteinander verknüpft sind. Die Vormontagelinien montieren bedarfsorientiert die benötigten Baugruppen für die Endmontagelinie. Bestände zwischen diesen Linien existieren nur in geringen Mengen als Puffer. Dies wurde entsprechend der Idee des One-Piece-Flow (vgl. [Arze05]) durch die konsequente Abstimmung der Taktung der Linien und Nutzung kleiner Losgrößen an den Montagelinien erreicht. Damit können die einzelnen Montagelinien im Rahmen der Planung mit den hier definierten Verfahren integriert betrachtet werden.

Die Teilefertigung findet am selben Standort statt. Hierfür kommen drei Bearbeitungszentren zum Einsatz, die Erzeugnisse herstellen, die als Input in die Montage einfließen. Dabei handelt es sich um die Ventilgrundkörper, an die anschließend weitere Anbauteile montiert werden. Außerdem werden einige weitere Teile in Eigenfertigung hergestellt, wobei hierunter insbesondere diejenigen fallen, die eine hohe Fertigungskompetenz erfordern und damit einen Teil der Kernkompetenz des Unternehmens darstellen. Dabei findet die Belegung in der Teilefertigung derzeit bedarfsorientiert statt. Dies führt zu teilweise extrem langen Lieferzeiten und Problemen bei der Liefertreue für die Produkte des Unternehmens, da lange Durchlauf- und Rüstzeiten zu hohen Wiederbeschaffungszeiten für Eigenfertigungsteile führen.

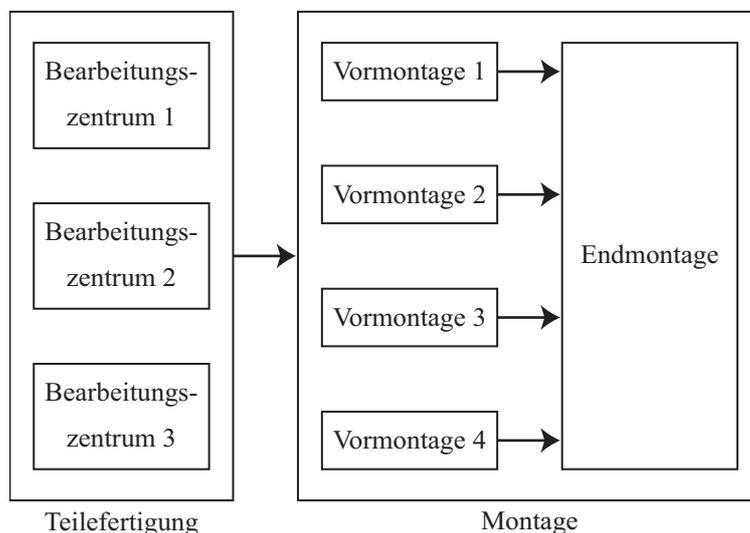


Abbildung 6.1: Struktur der Produktion (Ist-Zustand)

Auf strategischer Ebene wurde im betrachteten Unternehmen entschieden, dass alle Kundenaufträge innerhalb von fünf Tagen erfüllt werden sollen. Diese Lieferzeit soll unter Einhaltung einer Liefertreue von 95% erreicht werden. Diese Entscheidung wurde zum Anlass genommen, um die gesamte Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung des Unternehmens

zu untersuchen. Es soll sichergestellt werden, dass das Unternehmen so aufgestellt ist, dass es optimal die Bedürfnisse der Kunden in Hinsicht auf zukünftige Bedarfsmengen und deren zeitlicher Verteilung erfüllen kann. Dabei soll insbesondere untersucht werden, ob die aktuelle Struktur, die die Teilefertigung vor Ort unter Nutzung von Bearbeitungszentren vorsieht, dazu geeignet ist, die zukünftigen Anforderungen an Lieferzeit und Liefertreue bei minimalen Kosten zu erfüllen.

Alternativ können die Rohlinge unter Nutzung anderer Technologien hergestellt werden. Dies kann auch räumlich getrennt stattfinden, bei Nutzung einer entsprechenden Dispositionsstrategie, die für die ständige Verfügbarkeit sorgt. Deshalb wurde ein alternativer Aufbau der Erzeugnisse entwickelt, in dem die Grundkörper der Ventilgruppen nicht wie bisher durch Bearbeitungszentren gefertigt, sondern gegossen werden. Dieser Prozess kann aufgrund der benötigten Produktionseinrichtungen nicht durch das Unternehmen selbst durchgeführt werden, daher wurde ein Zulieferer identifiziert, der die Teile in der benötigten Qualität liefern kann.

Es ergeben sich also zwei zentrale Fragestellungen, die mit dem hier entwickelten Verfahren beantwortet werden sollen:

- Sollen die Ventilgrundkörper in Eigenfertigung auf den derzeitigen Bearbeitungszentren gefertigt oder mit Hilfe anderer Verfahren (Guss) durch andere Unternehmen hergestellt werden?
- Welche Dispositionsverfahren sind für die einzelnen Erzeugnisse zu verwenden und wie müssen die entsprechenden Parameter eingestellt werden, damit die angestrebten fünf Tage Lieferzeit bei einer Liefertreue von 95% eingehalten werden können?

6.2 Datenbasis

6.2.1 Zeitmodell und Szenariobaum

Im diskreten (groben) Zeitmodell der ersten beiden Modelle soll eine Gesamtzahl von 20 Perioden betrachtet werden, die jeweils einen Zeitraum von zwei Wochen darstellen. Hintergrund dieser Wahl ist, dass im hier betrachteten Szenario keine langfristigen Investitionsentscheidungen getroffen werden sollen – daher sind 40 Wochen ausreichend –, und dass die langfristige Unsicherheit der Marktentwicklung die Betrachtung längerer Zeiträume verhindert. Es ist schlicht nicht möglich, langfristiger zu planen, da ansonsten die Gefahr, dass die Entscheidung sich als unrentabel herausstellt, zu groß ist. Es gilt also $n^P = 20$. Innerhalb der Perioden werden als Basis für die Modellierung der Zeit Schichten genutzt.

Für die weitere Entwicklung der Bedarfsmengen stehen drei Quellen zur Verfügung. Zunächst sollen für die nächsten 20 Wochen existierende Abrufe der Kunden verwendet werden. Zwar können diese Zahlen teilweise noch durch die Kunden geändert werden, allerdings ist davon auszugehen, dass sie eine sehr gute Approximation für die Bedarfe dieses Zeitabschnitts darstellen. Anschließend an diesen Zeitabschnitt existieren zwei unterschiedliche Schätzungen: Eine wurde durch den Vertrieb des Unternehmens erstellt, die andere durch die Produktions- und Logistikplanung. Die durch den Vertrieb erstellte, nach seinem Verständnis konservative Bedarfsschätzung ist tendenziell niedriger, während die durch die Produktions- und Logistikplanung geschätzten Bedarfsmengen tendenziell höher als die realen Bedarfe sind. Dabei wurde die Schätzung der Produktions- und Logistikplanung aufbauend auf der Vertriebschätzung erstellt, wobei ein Erfahrungswert zeigt, wie weit die realen Bedarfe normalerweise über den durch den Vertrieb geschätzten liegen.

Der Szenariobaum für das Anwendungsszenario stellt sich dementsprechend wie in Abbildung 6.2 illustriert unter Zuordnung der Szenarien zu den Perioden dar. In den ersten 10 Perioden existiert nur jeweils ein Szenario, danach verzweigt sich der Baum und es gibt jeweils zwei Szenarien pro Periode i mit $\pi(j)=i$. Der obere Strang mit den Szenarien 11 bis 20 stellt die Schätzung des Vertriebs dar, der zweite Strang mit den Szenarien 21 bis 30 die der Produktions- und Logistikplanung. Außerdem sind hieraus die Vorgängerbeziehungen der einzelnen Szenarien zu erkennen. Für die Szenarien 2 bis 30 mit Ausnahme von Szenario 21 gilt $v(i)=i-1$, für Szenario 21 gilt $v(21)=10$.

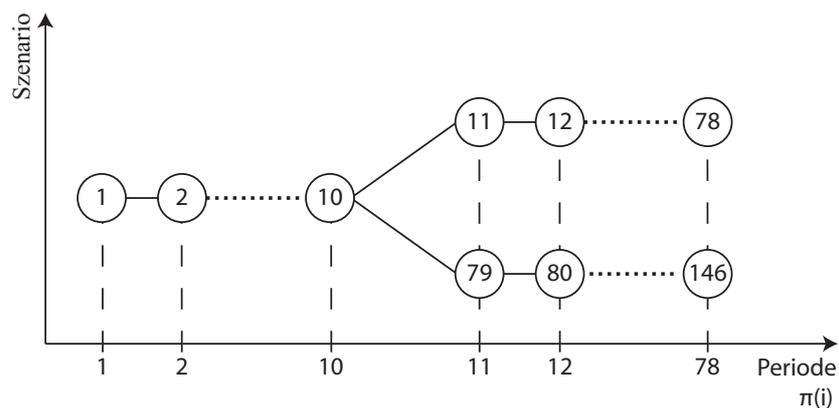


Abbildung 6.2: Zuordnung der Szenarien zu Perioden

Gleichung 6.1 stellt die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Szenarien dar. Für die Schätzungen des Vertriebs wurde dabei eine mit 30% kleinere Wahrscheinlichkeit angenommen als für die Schätzungen der Produktions- und Logistikplanung.

$$\omega(i) = \begin{cases} 1, & \text{für } 1 \leq i \leq 10 \\ 0,3, & \text{für } 11 \leq i \leq 20 \\ 0,7, & \text{für } 21 \leq i \leq 30 \end{cases} \quad (6.1)$$

Im Zeitmodell der Modelle III und IV werden 30 Schichten als Perioden genutzt. Diese entsprechen den ersten 3 Perioden der übergeordneten Partialmodelle. Die Zeitabschnitte innerhalb dieser Perioden werden ebenfalls in Schichten (bzw. Vielfachen von Schichten) angegeben. Es kann ein Großteil der Stammdaten aus den übergeordneten Modellen übernommen werden, da die Einheit, in der die Zeit angegeben wird, dieselbe ist. In diesen Modellen wird je Periode lediglich ein Szenario modelliert. Damit ist die Eintrittswahrscheinlichkeit jedes Szenarios 1 und die Perioden- und Vorgängerbeziehungen sind ebenfalls einfach zu modellieren.

6.2.2 Erzeugnisse

Den Ausgangspunkt für die Beschreibung der Datenbasis bilden die Erzeugnisse, die Output und Input des Fertigungssystems darstellen. Diese sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Zunächst existieren 30 unterschiedliche Ventilgruppen, die Produkte des Unternehmens. Da diese Ventilgruppen teilweise nur unterschiedliche Varianten sind, bauen sie auf lediglich 17 Ventilgrundkörpern auf. Alternativ können sie auch auf den oben beschriebenen, zugekauften Ventilgrundkörpern aufbauen, die in einem anderen Fertigungsprozess gefertigt werden, den die eigenen Produktionsanlagen nicht leisten können.

Durch die Montage unterschiedlicher Anbauteile wird die Variante festgelegt. Diese Anbauteile stellen einerseits 21 verschiedene eigengefertigte Teile sowie 19 Teile, die zugekauft werden, dar. Des Weiteren werden Kleinteile (Schrauben, Dichtungen etc.) verbaut, die allerdings für das Unternehmen C-Teile darstellen und hier nicht weiter betrachtet werden sollen. Diese Teile werden durch einen Zulieferer nach der Kanban-Methode (vgl. [Ohno89]) disponiert; es kann implizit davon ausgegangen werden, dass die Verfügbarkeit immer gewährleistet ist.

| <i>Index</i> $i \in \{1 \dots n^E\}$ | <i>Bezeichnung</i> |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1...30 | Ventilgruppe 1...30 |
| 31...47 | Ventilgrundkörper 1...17 |
| 48...64 | (zugekaufte) Ventilgrundkörper 1...17 |
| 65...85 | (eigengefertigte) Anbauteile 1...21 |
| 86...104 | (zugekaufte) Anbauteile 1...19 |

Tabelle 6.1: Erzeugnisse und Zuordnung der Indizes

Da durch das Programm keine Festlegung stattfinden soll, ob Teile fremdbeschafft oder eigengefertigt werden, wird für alle Teile einer der Parameter b_i^{ef} bzw. b_i^k auf 1 gesetzt. Die Einkaufskosten für Eigenfertigungsteile sind daher auch irrelevant; sie werden auf den Wert 0 initialisiert. Die Einkaufskosten der Kaufteile werden entsprechend den realen Preisen eingepflegt.

Die Lagerkostensätze der einzelnen Erzeugnisse werden entsprechend dem Raum- und Handlingbedarf bewertet. Die Kapitalbindung muss hier nicht einbezogen werden, da diese bereits über die Abzinsung der einzelnen Perioden zum heutigen Zeitpunkt unter Nutzung des internen Zinsfußes implizit berücksichtigt wird.

6.2.3 Werkzeuge

Wie oben erwähnt existieren mehrere Montagearbeitsplätze, die allerdings durch eine gezielte Abstimmung so miteinander vernetzt sind, dass sie im hier genutzten Modell als eine gemeinsame Linie und damit als ein Werkzeug angesehen werden können. Dieses Werkzeug erhält den Index 1. Die Fixkosten für dieses Werkzeug werden als 0 angenommen, da die Endmontagelinie nicht in Frage gestellt wird. Dadurch, dass hier ein Preis von 0 angenommen wird, fallen mehrere Summanden aus der Zielfunktion heraus, so dass die Lösung des Modells vereinfacht wird. Die variablen Kosten für die Montagearbeitsplätze betragen 500 Euro pro Schicht und resultieren zu einem Großteil aus den Lohnkosten der hier beschäftigten Mitarbeiter. Die Montagearbeitsplätze werden 5 Tage pro Woche im Einschichtbetrieb genutzt.

Des Weiteren existieren (derzeit) drei Bearbeitungszentren, die für die Fertigung der Ventilgrundkörper und der eigengefertigten Anbauteile genutzt werden. Sie erhalten die Indizes 2, 3 und 4. Die Nutzung dieser Bearbeitungszentren steht im Zentrum der Untersuchung durch das erste Partialmodell. Wenn die Ventilgrundkörper nicht eigengefertigt, sondern in der Gussvariante zugekauft werden, werden nicht mehr alle Bearbeitungszentren benötigt. Es können also die Fixkosten je Periode für diese Werkzeuge eingespart werden. Die Fixkosten für die einzelnen Werkzeuge, bestehend aus Kapitalbindungs-, Wartungs- und Betriebskosten, wurden mit 2.250 Euro pro Zeitabschnitt für die Maschine mit dem Index 2 und 1.250 Euro pro Zeitabschnitt für die beiden anderen Maschinen bestimmt. Die variablen Kosten betragen für alle Bearbeitungszentren jeweils 150 Euro pro Schicht. Die Rüstkosten pro Schicht betragen 250 Euro. Die Bearbeitungszentren werden ebenfalls 5 Tage pro Woche im Zweischichtbetrieb genutzt.

6.2.4 Technologien

Es existieren Technologien zur Montage der Ventilgruppen. Dabei wird zwischen den Technologien, die zur Montage unter Verbau der eigengefertigten Ventilgrundkörper genutzt werden, und den Technologien, die die fremdbeschafften Ventilgrundkörper nutzen, unterschieden. Dies ist notwendig, um vorzugeben, dass genau ein Verfahren verwendet werden soll. Mischformen zwischen Fremdbeschaffung und Eigenfertigung innerhalb einer Periode sind aus Gründen der Qualitätssicherung nicht gewünscht. Wie in Tabelle 6.2 dargestellt, werden diese Montageprozesse der Ventilgruppen durch die Technologien mit den Indizes 1 bis 60 dargestellt.

Sämtliche eigengefertigte Ventilgrundkörper können alternativ durch die verschiedenen Bearbeitungszentren gefertigt werden. Daher existieren 51 verschiedene Technologien, die diese Ventilgrundkörper als Output haben. Die Anbauteile können ebenfalls teilweise alternativ in den Bearbeitungszentren gefertigt werden, auch hier existieren 50 verschiedene Technologien für nur 21 Anbauteile. Auf die detaillierte Darstellung der In- und Outputs der einzelnen Technologien wird hier verzichtet; dies geht aus der in Anhang A dargestellten Datenbasis hervor.

| <i>Index</i> $i \in \{1 \dots n^T\}$ | <i>Output</i> | <i>Input</i> |
|--------------------------------------|--------------------------|---|
| 1...30 | Ventilgruppe 1...30 | Ventilgrundkörper (eigengefertigt), Anbauteile |
| 31...60 | Ventilgruppe 1...30 | Ventilgrundkörper (zugekauft), Anbauteile |
| 61...111 | Ventilgrundkörper 1...17 | - |
| 112...161 | Anbauteile 1...25 | - |

Tabelle 6.2: Technologien und Zuordnung der Indizes

Die Bearbeitungszeiten für die Technologien 1 bis 30 auf den Montagearbeitsplätzen sind identisch, es werden pro Schicht 16 Ventilgruppen montiert, also zwei Stück pro Stunde. Für die Technologien 31 bis 60 sind die Bearbeitungszeiten ebenfalls identisch, allerdings können hier nach Schätzungen der Arbeitsvorbereitung nur zwölf Ventilgruppen pro Schicht montiert werden, da auf Grund des anderen Fertigungsverfahrens der Ventilgrundkörper zusätzliche Funktionstests notwendig sein werden. Die Rüstzeit an den Montagearbeitsplätzen beträgt grundsätzlich 0, da ein Umrüsten nicht nötig ist.

Für die Technologien, in denen die Ventilgrundkörper und die Anbauteile durch die Bearbeitungszentren gefertigt werden, variieren die Bearbeitungs- und Rüstzeiten. Sie werden hier

nicht näher dargestellt, können aber der in Anhang A dargestellten Datenbasis entnommen werden.

6.2.5 Qualifikationen

Für die Fertigung und Montage der Ventilgruppen sind drei verschiedene Qualifikationen notwendig:

- Mitarbeiter für die Vor- und Endmontagelinien: Dabei soll nicht zwischen den einzelnen Montagearbeitsplätzen unterschieden werden, da die Arbeitsinhalte der einzelnen Stationen sich stark ähneln. Die Einarbeitungszeit für Mitarbeiter, die an diesen Arbeitsplätzen eingesetzt werden sollen, beträgt 2 Wochen, d. h. ein Zeitabschnitt im Zeitmodell der übergeordneten Optimierungsmodelle.
- Mitarbeiter für Hilfsarbeiten an den Bearbeitungszentren: Sie versorgen die Bearbeitungszentren mit den benötigten Teilen, spannen diese in Träger ein und nach der Bearbeitung wieder aus. Für diese Arbeiten wird eine Einarbeitungszeit von einer Woche kalkuliert, also ein halber Zeitabschnitt.
- Mitarbeiter für die Bedienung der Bearbeitungszentren: Da für diese Aufgabe eine entsprechende Ausbildung benötigt wird, wird nicht die Möglichkeit des nachträglichen Erwerbs dieser Qualifikation modelliert.

6.2.6 Mitarbeiter

Es gibt 12 Mitarbeiter, die für die Tätigkeiten an den Montagearbeitsplätzen und für die Hilfsarbeiten an den Bearbeitungszentren zur Verfügung stehen, wobei jeder Mitarbeiter bisher nur eine der beiden Qualifikationen aufweist. Außerdem gibt es die Möglichkeit, weitere Mitarbeiter für diese Tätigkeiten einzustellen, daher wurden 8 zusätzliche Mitarbeiter in die Modellierung aufgenommen, die allerdings bisher noch keine der Qualifikationen besitzen. Für die Bedienung der Bearbeitungszentren sind 5 Mitarbeiter mit entsprechender Ausbildung vorhanden. Außerdem wird ein Mitarbeiter dargestellt, der diese Qualifikation besitzt, bisher allerdings noch nicht im Unternehmen beschäftigt ist.

Für die Montagemitarbeiter gilt eine Regelarbeitszeit von 38 Stunden pro Woche. Nach Abzug von statistisch ermittelten durchschnittlichen Abwesenheitszeiten, die sich durch Krankheit und Urlaub ergeben, verbleiben 32 Stunden pro Woche. Da das Werk mit achtstündigen Schichten arbeitet, ergeben sich 8 Schichten pro Mitarbeiter in jeder Periode des Zeitmodells. Für die Mitarbeiter, die die Bearbeitungszentren bedienen, gilt aus tariflichen Gründen ein Ar-

beitszeit von 35 Stunden pro Woche, die sich durch Abwesenheit auf 30 Stunden reduzieren, also 7,5 Schichten.

6.2.7 Prozessalternativen

Es gibt, aufbauend auf der Fragestellung „Ventilgrundkörper selbst fertigen oder zukaufen“ zwei verschiedene Prozessalternativen. Beide erlauben die Fertigung der Anbauteile, also die Technologien 112 bis 161. Die erste Prozessalternative stellt die Eigenfertigung der Ventilgrundkörper dar; sie erlaubt die Nutzung der Technologien 1 bis 30, in denen die Ventilgruppen montiert werden, sowie der Technologien 61 bis 112, in denen die Ventilgrundkörper gefertigt werden. Die zweite Prozessalternative erlaubt die Nutzung der Technologien 31 bis 60, in denen die Montage der Ventilgrundkörper unter Verwendung der zugekauften Anbauteile erfolgt.

6.2.8 Weitere Daten

Der interne Zinsfuß des Unternehmens, mit dem Investitionen bewertet werden, beträgt 15% p. a. Damit ergibt sich pro Periode im Zeitmodell der Partialmodelle I und II (zwei Wochen) eine Abzinsung von 0,539%. Im Zeitmodell der Partialmodelle III und IV ergibt sich pro Periode (eine Schicht, wobei 260 Schichten pro Jahr angenommen wurden) eine Abzinsung von 0,054%.

Die Parameter, die in den Koordinationsprozessen zur Steuerung verwendet wurden konnten durch das betrachtete Unternehmen nicht definiert werden, bzw. wurden als unbegrenzt angesehen. Dies sind für die Steuerung der Prozesse beginnend mit der Durchführung von Partialmodell I und II die maximale Kostensumme $K^{t,max}$, für die Prozesse beginnend mit der Durchführung von Partialmodell III und IV die Grenzwerte für die durchschnittlichen und maximalen Kapitalbindungskosten $KB^{d,max}$ sowie $KB^{m,max}$ und die maximal zulässige Kostensumme $K^{o,max}$. Daher muss in der folgenden Evaluation des Verfahrens auf die Nutzung der Koordinationsprozesse verzichtet werden. Entsprechend werden die in Gleichungen 5.51, 5.92, 5.93 und 5.94 dargestellten Kennzahlen nicht berechnet.

6.3 Anwendung des Verfahrens und Ergebnisse

6.3.1 Genutzte Hard- und Softwaresysteme

Als Hardware für die Tests wird ein Notebook mit einem Doppelkernprozessor mit 2 GHz Taktfrequenz und 2 GB Hauptspeicher eingesetzt. Die Verwendung eines Prozessors mit

mehreren Kernen stellt dabei keinen Vorteil gegenüber Einkernprozessoren dar, da die verwendete Software (s. u.) nur jeweils einen Kern nutzen kann.

Zur Modellierung der mathematischen Modelle sowie der Daten wird die Modellierungssprache GNU MathProg genutzt, die eine Teilmenge der Sprache AMPL (vgl. [FGK93]) darstellt. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass einerseits Modell und Daten getrennt modelliert werden können und auch komplexe Funktionen abgebildet werden können, und andererseits, dass nicht auf kostenpflichtige Software zur Überführung in durch den Solver lesbare Formate zurückgegriffen werden muss. Um eine komfortable Modellierung zu ermöglichen, wird die Entwicklungsumgebung der Software MOPS Studio genutzt, die eine Syntaxhervorhebung sowie eine automatisierte Überprüfung der Modellsyntax enthält.

Anschließend werden die Modelle durch den GLPK Solver in das CPLEX LP Format konvertiert, das als Eingabeformat für die Optimierungssoftware ILOG CPLEX in der Version 10.1.1 genutzt wurde. Die Wahl fiel auf diese Optimierungssoftware, da sie unter den zur Verfügung stehenden Systemen die geringsten Laufzeiten zur Lösung der mathematischen Programme benötigt. Die genutzte Konfiguration von ILOG CPLEX entspricht den Standardeinstellungen, abgesehen vom Parameter „mipgap“, der auf den Wert 0.0005 eingestellt wird, um geringere Laufzeiten zu erreichen.

6.3.2 Umsetzung der Modelle

6.3.2.1 Partialmodell I

Das erste Partialmodell zur Planung von Prozessen, Standorten und Maschinenbeständen wird wie in den Abbildungen 6.3 bis 6.7 dargestellt in der Modellierungssprache GNU MathProg umgesetzt. Dabei werden in Abbildung 6.3, 6.4 und 6.5 zunächst die Mengen, Parameter und Variablen definiert, die anschließend in der in Abbildung 6.6 dargestellten Zielfunktion und den Restriktionen in Abbildung 6.7 verwendet werden. Zusätzlich zu den in Kapitel 5 definierten Restriktionen wird in dieser Umsetzung des Modells die Möglichkeit hinzugefügt, einzelne Erzeugnisse im Voraus als Kauf- oder Eigenfertigungsteile zu definieren und den Verzug (Lagerbestand kleiner 0) für sie auszuschließen.

Bei der Definition der Zielfunktion kann die Darstellung aus Gleichung 5.8 nicht direkt übernommen werden, da die Benutzung der „max“- und „min“-Funktion durch GNU MathProg nicht unterstützt wird. Daher muss die Abhängigkeit als stückweise lineare Funktion dargestellt werden. Es wird der Ansatz nach Padberg (vgl. [Padb00]) der Darstellung mit L01-Variablen genutzt. Dazu werden die Variablen Y1 (binäre Hilfsvariable) sowie Z1 und Z2 eingeführt. Die Variable Z1 gibt an, wie weit der Lagerbestand über einem absoluten Minimalwert,

der durch Big-M dargestellt wird, liegt. Z2 stellt für positive Lagerbestände (d. h. kein Lieferverzug) den positiven Bestand dar. Um die entsprechenden Abhängigkeiten zwischen den Variablen Z1, Z2 und X_l sicherzustellen, müssen drei zusätzliche Restriktionen eingeführt werden, die in der GNU MathProg-Darstellung als L01_a, L01_b und L01_c bezeichnet werden.

```
set E; # Erzeugnisse
set P; # Perioden
set PA; # Prozessalternativen
set S; # Szenarien
set T; # Technologien
set W; # Werkzeuge
```

Abbildung 6.3: Mengendefinitionen für Partialmodell I

```
param big_m; # Big-M
param omega {S} >= 0, <= 1; # Wahrscheinlichkeit der Szenarien
param ny {S}; # gibt das Vorgängerszenario des Szenarios an
param pi {S}; # gibt die Periode des Szenarios an
param b_ef {E} binary; # Erzeugnisse, die eigengefertigt werden müssen
param b_ka {E} binary; # Erzeugnisse, die eingekauft werden müssen
param b_p {PA, T} binary; # Prozessalternative
param b_pn0 {PA} binary; # Initialisierung Prozessalternativen
param b_v {E} binary; # Erzeugnisse, für die kein Verzug erlaubt ist
param b_w0 {W} binary; # gibt an, ob Werkzeug derzeit vorhanden ist
param c_f {W}; # Fixkosten für Werkzeug
param c_k {E}; # Fremdbeschaffungskosten
param c_l {E}; # Lagerkostensatz
param c_n {W}; # Kosten für Neubeschaffung von Werkzeug
param c_p {W}; # Produktionskostensatz
param c_pna; # Kosten für eine Änderung der Prozessalternative
param c_r {W}; # Rüstkostensatz
param c_v {E}; # Verzugkostensatz
param c_z >= 0, <= 1; # kalkulatorischer Zinsfuß
param n_b {E, S} >= 0; # Bedarfsmengen
param n_rtmax >= 0; # maximale Anzahl Rüstvorgänge je Periode
param n_tb {E, T} >= 0; # Input der Technologie an Erzeugnis
param n_te {E, T} >= 0; # Output der Technologie an Erzeugnis
param t_kw {W, P}; # verfügbare Werkzeugkapazität
param t_rt {T, W}; # Rüstdauer
param t_tw {T, W}; # Produktionsdauer
```

Abbildung 6.4: Parameterdefinitionen für Partialmodell I

```
var B_k {E, P} binary; # Kaufteil
var B_pn {PA, P} binary; # Prozessalternativennutzung
var B_pna {P} binary; # Änderung der Prozessalternativennutzung
var B_rt {T, W, S} binary; # Binäre Rüstvariable
var B_w {W, P} binary; # Verfügbarkeitsvariable für Werkzeuge
var B_wn {W, P} binary; # Neubeschaffungsvariable für Werkzeuge
var X_k {E, S} >= 0; # Kaufmenge
var X_l {E, S} >= -big_m, <= big_m; # Lagermenge
var X_t {T, S} >= 0; # zu produzierende Technologiemenge
var Y1 {E, S} binary; # binäre Hilfsvariable für L01-Modell
var Z1 {E, S} >= 0, <= big_m; # Hilfsvariable für L01-Modell
var Z2 {E, S} >= 0; # Hilfsvariable für L01-Modell
```

Abbildung 6.5: Variablendefinitionen für Partialmodell I

```

minimize cost:
  sum {i in S} omega[i] * ((1 + c_z) ^ (- pi[i])) *
  (B_pna[pi[i]] * c_pna +
  sum {j in W} ( sum {k in T} ( B_rt[k,j,i] * t_rt[k,j] * c_r[j] +
  X_t[k,i] * t_tw[k,j] * c_p[j] )) +
  sum {j in E: j >= 1}
    ( big_m * c_v[j] - c_v[j] * Z1[j,i] + c_l[j] * Z2[j,i]) +
  sum {j in E} X_k[j,i] * c_k[j] +
  sum {j in W} (B_w[j,pi[i]] * c_f[j] + B_wn[j,pi[i]] * c_n[j]));

```

Abbildung 6.6: Zielfunktion Partialmodell I

```

subject to AnzRuestvorgaenge {i in T, k in S}:
  n_rtmax - sum {j in W} B_rt[i,j,k] >= 0;
subject to Ruesten {i in T, j in W, k in S}:
  X_t[i,k] - big_m * B_rt[i,j,k] <= 0;
subject to Maschinenlaufzeit {j in W, k in S}:
  sum {i in T} (B_rt[i,j,k] * t_rt[i,j] + X_t[i,k] * t_tw[i,j]) -
  t_kw[j,pi[k]] * B_w[j,pi[k]] <= 0;
subject to Lagerbestand {i in E, k in S}:
  X_l[i,k] - X_l[i,ny[k]] - sum {j in T} X_t[j,k] * n_te[i,j] -
  X_k[i,k] + n_b[i,k] + sum {j in T} n_tb[i,j] * X_t[j,k] = 0;
subject to Werkzeugverfuegbarkeit {i in W, j in P : j>0}:
  B_w[i,j] - B_w[i,j-1] - B_wn[i,j] <= 0;
subject to Kaufteile {i in E, j in S}:
  X_k[i,j] - B_k[i,pi[j]] * big_m <= 0;
subject to Nichtkaufteile {i in E, k in S}:
  sum {j in T} X_t[j,k] * n_te[i,j] - (1-B_k[i,pi[k]]) * big_m <= 0;
subject to Prozessalternativen {i in T, j in S}:
  X_t[i,j] - big_m * sum {k in PA} b_p[k,i] * B_pn[k, pi[j]] <= 0;
subject to BegrProzessalternativen {j in P}:
  sum {i in PA} B_pn[i,j] = 1;
subject to LagerInitialisierung {i in E}:
  X_l[i,0] = 0;
subject to WerkzeugInitialisierung {i in W}:
  B_w[i,0] <= b_w0[i];
subject to EigenfertigungsteileFestlegen {i in E, j in P}:
  B_k[i,j] <= 1 - b_ef[i];
subject to KaufteileFestlegen {i in E, j in P}:
  B_k[i,j] >= b_ka[i];
subject to VerzugVermeiden {i in E, j in S}:
  X_l[i,j] >= big_m * (b_v[i] - 1);
subject to AenderungProzessalternativennutzung {i in PA, j in P: j>0}:
  B_pna[j] >= B_pn[i,j] - B_pn[i,j-1];
subject to Prozessalternativeninitialisierung {i in PA}:
  B_pn[i,0] = b_pn0[i];
subject to L01_a {i in E, j in S}:
  X_l[i,j] = - big_m + Z1[i,j] + Z2[i,j];
subject to L01_b {i in E, j in S}:
  Z1[i,j] >= big_m * Y1[i,j];
subject to L01_c {i in E, j in S}:
  Z2[i,j] <= big_m * Y1[i,j];

```

Abbildung 6.7: Restriktionen Partialmodell I

6.3.2.2 Partialmodell II

Die Umsetzung des zweiten Partialmodells, in dem die Qualifikation und der Bestand der Mitarbeiter geplant werden, in GNU MathProg ist in Abbildungen 6.8 bis 6.12 dargestellt. Dabei wird anstelle der „max“- und „min“-Funktionen, wie sie in Gleichung 5.24 verwendet werden, auch in diesem Modell der Ansatz nach Padberg (s. o.) genutzt.

```
set E; # Erzeugnisse
set M; # Mitarbeiter
set P; # Perioden
set Q; # Qualifikationen
set S; # Szenarien
set T; # Technologien
set W; # Werkzeuge
```

Abbildung 6.8: Mengendefinitionen für Partialmodell II

```
param big_m; # Big-M
param omega {S} >= 0, <= 1; # Wahrscheinlichkeit des Szenarios
param ny {S}; # gibt das Vorgängerszenario des Szenarios an
param pi {S}; # gibt die Periode des Szenarios an
param b_k {E, P} binary; # Kaufteil
param b_m0 {M} binary; # derzeit beschäftigte Mitarbeiter
param b_q0 {M,Q} binary; # initiale Qualifikationen der Mitarbeiter
param b_v {E} binary; # Erzeugnisse, für die kein Verzug erlaubt ist
param b_w {W, P} binary; # Verfügbarkeitsvariable für Werkzeuge
param c_k {E}; # Fremdbeschaffungskosten
param c_l {E}; # Lagerkostensatz
param c_m {M}; # Fixkosten für Mitarbeiter
param c_me ; # Kosten für die Einstellung eines Mitarbeiters
param c_mr ; # Kosten Entlassung/Freistellung eines Mitarbeiters
param c_p {W}; # Produktionskostensatz
param c_q {Q}; # Kosten für neue Qualifikation
param c_r {W}; # Rüstkostensatz
param c_u {M}; # Kostensatz für Überstunden
param c_v {E}; # Verzugkostensatz
param c_z >= 0, <= 1; # kalkulatorischer Zinsfuß
param n_b {E, S} >= 0; # Bedarfsmengen
param n_rtmax >= 0; # maximale Anzahl Rüstvorgänge je Periode
param n_tb {E, T} >= 0; # Input der Technologie an Erzeugnis
param n_te {E, T} >= 0; # Output der Technologie an Erzeugnis
param n_uMax >= 0; # maximale Überstunden je Periode
param t_kw {W, P}; # verfügbare Werkzeugkapazität
param t_l {Q}; # Zeit zum Erlernen der Qualifikation
param t_m {M, P}; # verfügbare Arbeitszeit Mitarbeiter
param t_rt {T, W}; # Rüstdauer
param t_tw {T, W}; # Produktionsdauer
param t_tq {T, Q}; # Qualifikationszeit je Technologieeinheit
```

Abbildung 6.9: Parameterdefinitionen für Partialmodell II

```

var B_m {M, P} binary; # Beschäftigung der Mitarbeiter
var B_me {M, P} binary; # Neubeschäftigung der Mitarbeiter
var B_mr {M, P} binary; # Entlassung/Freisetzung der Mitarbeiter
var B_mq {M, Q, P} binary; # Mitarbeiterqualifikation
var B_mqn {M, Q, P} binary; # neue Qualifikationen
var B_rt {T, W, S} binary; # binäre Rüstvariable
var X_k {E, S} >= 0; # Kaufmenge
var X_l {E, S} >= 0; # Lagermenge
var X_t {T, S} >= 0; # zu produzierende Technologiemenge
var X_qm {Q,M,S} >= 0; # Arbeit je Qualifikation und Mitarbeiter
var X_u {M,S} >= 0; # Anzahl Überstunden
var Y1 {E, S} binary; # binäre Hilfsvariable für L01-Modell
var Z1 {E, S} >= 0, <= big_m; # Hilfsvariable für L01-Modell
var Z2 {E, S} >= 0; # Hilfsvariable für L01-Modell

```

Abbildung 6.10: Variablendefinitionen für Partialmodell II

```

minimize cost :
  sum {i in S} omega[i] * ((1 + c_z) ^ (- pi[i])) * (
    sum {j in W} (sum {k in T} ( B_rt[k,j,i] * t_rt[k,j] * c_r[j] +
      X_t[k,i] * t_tw[k,j] * c_p[j])) +
    sum {j in E}
      ( big_m * c_v[j] - c_v[j] * Z1[j,i] + c_l[j] * Z2[j,i]) +
    sum {j in E} X_k[j,i] * c_k[j] +
    sum {j in M} (B_m[j,pi[i]] * c_m[j] + X_u[j,i] * c_u[j] +
      B_me[j,pi[i]] * c_me + B_mr[j,pi[i]] * c_mr +
      sum {k in Q} B_mqn[j,k,pi[i]] * c_q[k]));

```

Abbildung 6.11: Zielfunktion Partialmodell II

```

subject to AnzRuestvorgaenge {i in T, k in S} :
    sum {j in W} B_rt[i,j,k] - n_rtmax <= 0;
subject to Ruesten {i in T, j in W, k in S} :
    X_t[i,k] - big_m * B_rt[i,j,k] <= 0;
subject to Maschinenlaufzeit {j in W, k in S} :
    sum {i in T} (B_rt[i,j,k] * t_rt[i,j] + X_t[i,k] * t_tw[i,j])
        <= t_kw[j,pi[k]] * b_w[j,pi[k]] ;
subject to Lagerbestand {i in E, k in S: k >= 1}:
    X_l[i,ny[k]] + sum {j in T} X_t[j,k] * n_te[i,j] +
    X_k[i,k] - n_b[i,k] - sum {j in T} n_tb[i,j] * X_t[j,k]
    = X_l[i,k];
subject to Qualifikationszeit {i in S, j in Q} :
    sum {k in T}
        (X_t[k,i] * t_tq[k,j]) - sum {k in M} X_qm[j,k,i] <= 0 ;
subject to Arbeitszeitbegrenzung {j in M, k in S}:
    sum {i in Q} ( X_qm[i,j,k] + B_mqn[j,i,pi[k]] * t_l[i] ) -
    B_m[j,pi[k]] * t_m[j,pi[k]] - X_u[j,k] <= 0;
subject to QualifikationVorhanden {i in Q, j in M, k in S} :
    X_qm[i,j,k] <= big_m * B_mq[j,i,pi[k]] ;
subject to Qualifikationsfortschr
    {i in M, j in Q, k in P: k >= 1} :
    B_mq[i,j,k] <= B_mq[i,j,k-1] + B_mqn[i,j,k] ;
subject to LagerInitialisierung {i in E} :
    X_l[i,0] <= 0 ;
subject to QualifikationsInitialisierung {i in M, j in Q} :
    B_mq[i,j,0] <= b_q0[i,j] ;
subject to VerzugVermeiden {i in E, j in S} :
    X_l[i,j] >= big_m * (b_v[i] - 1) ;
subject to Ueberstunden {j in M, k in S} :
    X_u[j,k] <= n_uMax * B_m[j,pi[k]] ;
subject to KaufteileNichtFertigen {i in E, j in S, k in T} :
    n_te[i,k] * X_t[k,j] <= big_m * (1 - b_k[i,pi[j]]) ;
subject to NurKaufteileKaufen {i in E, j in S} :
    X_k[i,j] <= big_m * b_k[i,pi[j]] ;
subject to EinstellungMitarbeiter {i in M, j in P: j>0} :
    B_me[i,j] >= B_m[i,j] - B_m[i,j-1] ;
subject to ReduktionMitarbeiter {i in M, j in P: j>0} :
    B_mr[i,j] >= B_m[i,j-1] - B_m[i,j] ;
subject to MitarbeiterInitialisierung {i in M} :
    B_m[i,0] = b_m0[i] ;
subject to L01_a {i in E, j in S} :
    X_l[i,j] = - big_m + Z1[i,j] + Z2[i,j] ;
subject to L01_b {i in E, j in S} :
    Z1[i,j] >= big_m * Y1[i,j] ;
subject to L01_c {i in E, j in S} :
    Z2[i,j] <= big_m * Y1[i,j] ;

```

Abbildung 6.12: Restriktionen Partialmodell II

6.3.2.3 Partialmodell III

In Abbildung 6.13 bis 6.17 sind die Mengen-, Parameter- und Variablendefinitionen sowie die Zielfunktion und die Restriktionen des dritten Partialmodells dargestellt. Bei der Modellierung der Restriktion für die Sicherstellung der Reichweitendeckung der Sicherheitsbestände (Gleichung 5.65) weicht die Implementierung von der Darstellung in Kapitel 5 ab, da die For-

mulierung in Gleichung 5.65 nicht durch gängige Optimierungssoftware unterstützt wird. Daher wird angenommen, dass der Sicherheitsbestand für die Nachfragemenge nach den entsprechenden Erzeugnissen in einer beliebigen Periode zuzüglich der Reichweite des Bestellzyklus multipliziert mit der Bedarfsmenge in der entsprechenden Periode und einem fixen Faktor von 10% ausreichend sein muss. Diese Formulierung ist zwar nicht so exakt wie die in Gleichung 5.65, stellt aber eine Annäherung dar, die den Erfahrungen im konkreten Beispiel entspricht.

Die Datenbasis für Partialmodell III, die in Anhang A.3 dargestellt ist, zeigt die ersten drei Perioden des Zeitmodells in Partialmodell I und II. Dabei ist zu beachten, dass nur 41 Erzeugnisse (7 Ventilgruppen, 5 Ventilgrundkörper und 29 Anbauteile) modelliert werden. Dies liegt daran, dass im betrachteten Zeitraum nur Primär- und Sekundärbedarfe für diese Erzeugnisse auftreten. Allerdings werden sie als in ihrem Bedarfsverlauf repräsentativ für jeweils eine Gruppe von Erzeugnissen identifiziert, so dass mit den Ergebnissen der Optimierung des dritten und vierten Partialmodells Lagerstufen, Meldebestände und Losgrößen für alle Erzeugnisse festgelegt werden können.

```
set E; # Erzeugnisse
set P; # Perioden
set PA; # Prozessalternativen
set S; # Szenarien
set T; # Technologien
set W; # Werkzeuge
```

Abbildung 6.13: Mengendefinitionen für Partialmodell III

```
param ny {S}; # Vorgängerszenario des Szenarios
param omega {S}; # Wahrscheinlichkeit der Szenarien
param pi {S}; # Periode des Szenarios
param a_w_max; # Auslastung, ab der ein Bestellzyklus benötigt wird
param big_m; # Big-M
param c_z; # kalkulatorischer Zinsfuß
param p_min; # angestrebte minimale Liefertreue
param t_bz; # Zykluszeit für Bestellzyklen
param t_lmax; # maximale Lieferzeit
param a_w {W,S}; # Auslastung des Werkzeugs im Szenario
param b_b {E}; # Vorliegen von Bedarfen für ein Erzeugnis
param b_k {E,P}; # Kaufteilbinärvariable
param b_p {PA,T}; # Prozessalternative
param b_pn {PA,P}; # Prozessalternativenutzung
param c_l {E}; # Lagerkostensatz
param g {E,E}; # Gozintofaktor, wg. stabiler PA-Nutzung periodenunabh.
param n_b {E,S}; # (Primär-)Bedarfsmengen
param n_ges {E,S}; # Gesamtbedarfsmenge
param n_te {E,T}; # Output der Technologie an Erzeugnis
param t_dl {E,P}; # Durchlaufzeit bei Eigenfertigung
param t_k {E}; # Wiederbeschaffungszeit bei Fremdbeschaffung
param t_tw {T,W}; # Produktionsdauer
```

Abbildung 6.14: Parameterdefinitionen für Partialmodell III

```

var B_bz {E} binary; # Binärvariable für Bestellzyklus
var B_ls {E} binary; # Binärvariable für Lagerstufen
var B_lt {E,S} binary; # Binärvariable für Einhaltung Liefertreue
var N_lt {E,S} >= 0; # Nachfrage, unter Einhaltung der Liefertreue
var T_pd {E,P} >= 0, <= t_lmax; # Produktdistanz
var T_rw {E,P} >= 0; # Reichweite
var T_wb {E,P} >= 0; # Wiederbeschaffungszeit
var T_wbl {E,P} >= 0; # Wiederbeschaffungszeit ohne Lagerstufen
var X_mb {E} >= 0 integer; # Meldebestände

```

Abbildung 6.15: Variablendefinitionen für Partialmodell III

```

minimize Lagerkosten :
    sum {i in P} (1 + c_z) ^ (-i) * sum {j in E} X_mb[j] * c_l[j] ;

```

Abbildung 6.16: Zielfunktion Partialmodell III

```

subject to Produktdistanz_1 {i in E, j in P, k in E: g[i,k] > 0} :
    T_pd[i,j] - b_k[i,j] * t_k[i] - (1 - b_k[i,j]) * t_dl[i,j] -
    T_pd[k,j] + B_ls[i] * big_m >= 0 ;
subject to Produktdistanz_2 {i in E, j in P} :
    T_pd[i,j] - b_k[i,j] * t_k[i] - (1 - b_k[i,j]) * t_dl[i,j] +
    B_ls[i] * big_m + (1 - b_b[i]) * big_m >= 0 ;
subject to Meldebestand_wenn_Lagerstufe {i in E} :
    B_ls[i] * big_m - X_mb[i] >= 0 ;
subject to Lagerstufe_wenn_Meldebestand {i in E} :
    X_mb[i] - B_ls[i] >= 0 ;
subject to WBZ_KaufUndEigenf {i in E, j in P} :
    T_wb[i,j] - b_k[i,j] * t_k[i] -
    (1 - b_k[i,j]) * t_dl[i,j] >= 0 ;
subject to WBZ_Gozinto {i in E, j in P, k in E: g[i,k] > 0} :
    T_wb[i,j] - b_k[i,j] * t_k[i] -
    (1 - b_k[i,j]) * t_dl[i,j] - T_wbl[k,j] >= 0 ;
subject to WBZohneLagerstufen {i in E, j in P} :
    T_wbl[i,j] >= T_wb[i,j] - big_m * B_ls[i] ;
subject to BestZ
    {i in E, j in P, k in W, m in T, l in S: pi[l] = j} :
    B_bz[i] * big_m -
    (a_w[k,l] - a_w_max) * n_te[i,m] * t_tw[m,k] *
    (sum {n in PA} b_p[n,m] * b_pn[n,j]) >= 0 ;
subject to Reichweitenberechnung {i in E, j in P} :
    T_rw[i,j] - T_wb[i,j] - B_bz[i] * t_bz >= 0 ;
subject to Einhaltung_Liefertreue {i in E, j in S} :
    N_lt[i,j] - B_lt[i,j] * n_ges[i,j] -
    sum {k in E} (g[i,k] * N_lt[k,j]) = 0 ;
subject to AngestrebteLiefertreue :
    sum {i in E}
    sum {j in S: n_ges[i,j] > 0} omega[j] * B_lt[i,j] -
    p_min * sum {i in E} sum {j in S: n_ges[i,j] > 0} 1
    >= 0 ;
subject to Bedarfsdeckung {i in E, j in S} :
    N_lt[i,j] + 0.1 * n_ges[i,j] * T_rw[i,pi[j]] -
    X_mb[i] + big_m * (1 - B_ls[i]) <= 0 ;

```

Abbildung 6.17: Restriktionen Partialmodell III

6.3.2.4 Partialmodell IV

Die Umsetzung des vierten Partialmodells (Bestimmung optimaler Losgrößen) ist in den Abbildungen 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 und 6.22 dargestellt. Hervorzuheben ist dabei, dass die Einschränkung des Wertebereichs für die Zählvariable i auf die Werte, für die eine Lagerstufe definiert ist ($b_i^{LS}=1$), in den Restriktionen des Modells weggelassen werden kann. Dies ist darin begründet, dass nur diejenigen Erzeugnisse im Modell gepflegt wurden, für die auch eine Lagerstufe definiert ist, womit $b_i^{LS}=1$ für alle Erzeugnisse wahr ist. Aus demselben Grund kann die Multiplikation mit b_i^{LS} aus der Zielfunktion entfernt werden.

In den Gleichungen für die Einstellung der Variablen b_{ij}^{MB} (Gleichung 5.75 und 5.76) wurde „+ 1“ hinzugefügt. Dies liegt daran, dass die echte größer-Beziehung nicht durch die verwendete Modellierungssprache unterstützt wurde. Da die Bestände ganzzahlig sind, kann 1 addiert werden, bei nicht ganzzahligen Variablen müsste der Kehrwert von M addiert werden.

```
set E; # Erzeugnisse
set P; # Perioden
set S; # Szenarien
set RW; # Wertebereich für Bestandsreichweiten
```

Abbildung 6.18: Mengendefinitionen für Partialmodell IV

```
param lambda {S,S,RW}; # gibt an, ob ein Szenario (ZWEITER Index) x
    Zeiteinheiten nach einem zweiten Szenario(ERSTER Index) liegt
param ny {S}; # gibt das Vorgängerszenario des Szenarios an
param omega {S}; # Wahrscheinlichkeit der Szenarien
param pi {S}; # gibt die Periode des Szenarios an
param big_m; # Big-M
param c_p_var {E,P}; # variable Produktionskosten
param c_p_fix {E,P}; # fixe Produktionskosten
param c_z; # kalkulatorischer Zinsfuß
param p_min; # angestrebte minimale Liefertreue
param c_l {E}; # Lagerkostensatz
param g {E,E}; # Gozintofaktor, wg. stabiler PA-Nutzung periodenunabh.
param n_ges {E,S}; # Gesamtbedarfsmenge
param t_rw {E,P}; # Reichweite Bestellzyklus
param x_l0 {E}; # initialer Lagerbestand
param x_mb {E}; # Meldebestand
```

Abbildung 6.19: Parameterdefinitionen für Partialmodell IV

```
var B_lt {E,S} binary; # Binärvariable für Einhaltung Liefertreue
var B_mb {E,S} binary; # gibt an, ob Meldebestand unterschritten wurde
var B_mbn {E,S} binary; # gibt an, ob Meldebestand NEU untersch. ist
var B_pe {E,S} binary; # gibt an, ob ein Erzeugnis produziert wird
var N_lt {E,S} >= 0; # Nachfrage u. Einh. der angestr. Liefertreue
var X_l {E,S} >= 0; # Lagermenge
var X_lg {E} >= 0; # Losgröße
var X_p {E,S} >= 0; # Produktionsmenge (Abgang aus Produktion)
```

Abbildung 6.20: Variablendefinitionen für Partialmodell IV

```

minimize cost :
  sum {i in S} ((1+c_z)^(- pi[i]) * omega[i] *
  sum {j in E} ((X_l[j,i] * c_l[j] +
    X_p[j,i] * c_p_var[j,pi[i]] +
    B_pe[j,i] * c_p_fix[j,pi[i]]))) ;

```

Abbildung 6.21: Zielfunktion Partialmodell IV

```

subject to Bestandsfortfuehrung {i in E, j in S} :
  X_l[i,j] - X_l[i,ny[j]] -
  X_p[i,j] + N_lt[i,j] = 0 ;
subject to MeldebestandErreicht {i in E, j in S} :
  B_mb[i,j] * big_m >= x_mb[i] - X_l[i,j] + 1 ;
subject to MeldebestandNichtErreicht {i in E, j in S} :
  (1 - B_mb[i,j]) * big_m >=
  X_l[i,j] - x_mb[i] + 1 ;
subject to MeldebestandNeuErreicht1 {i in E, j in S: j>0} :
  B_mbn[i,j] >= B_mb[i,j] - B_mb[i,ny[j]] ;
subject to MeldebestandNeuErreicht2 {i in E, j in S: j>0} :
  B_mbn[i,j] <= B_mb[i,j] ;
subject to MeldebestandNeuErreicht3 {i in E, j in S: j>0} :
  B_mbn[i,j] <= 1 - B_mb[i,ny[j]] ;
subject to MeldebestandNeuErreichtPerNull {i in E} :
  B_mbn[i,0] = B_mb[i,0] ;
subject to BestandserhoehungErstNachVorl
  {i in E, j in S: j<t_rw[i,pi[j]]} :
  X_p[i,j] = 0;
subject to Bestandserhoehung_1
  {i in E, j in S, k in S: lambda[j,k,t_rw[i,pi[j]]]=1} :
  X_p[i,k] <= big_m * B_mbn[i,j] ;
subject to Bestandserhoehung_2
  {i in E, j in S, k in S: lambda[j,k,t_rw[i,pi[j]]]=1} :
  X_p[i,k] - X_lg[i] <= big_m * (1 - B_mbn[i,j]) ;
subject to Bestandserhoehung_3
  {i in E, j in S, k in S: lambda[j,k,t_rw[i,pi[j]]]=1} :
  X_lg[i] - X_p[i,k] <=
  big_m * (1 - B_mbn[i,j]) ;
subject to Einhaltung_Liefertreue {i in E, j in S} :
  N_lt[i,j] - B_lt[i,j] * n_ges[i,j] -
  sum {k in E} (g[i,k] * N_lt[k,j]) = 0;
subject to AngestrebteLiefertreue :
  sum {i in E}
  sum {j in S: n_ges[i,j] > 0} omega[j] * B_lt[i,j] -
  p_min * sum {i in E} sum {j in S: n_ges[i,j] > 0} 1 >= 0;
subject to ErzeugnisProduktion {i in E, j in S} :
  X_p[i,j] <= B_pe[i,j] * big_m ;
subject to LagerInitialisierung {i in E}:
  X_l[i,0] = x_l0[i] ;

```

Abbildung 6.22: Restriktionen Partialmodell IV

6.3.3 Ergebnisse

6.3.3.1 Partialmodell I

Die Ausgaben der Optimierung des ersten Partialmodells finden sich in Anhang B.1. Die für die Optimierung benötigte Prozessorzeit beträgt 85,95 Sekunden. Die Ergebnisse der Optimierung sind in Anhang C.1 dargestellt. Die Werte der einzelnen Variablen können für die Umsetzung der Planung wie folgt interpretiert werden:

- b_{ij}^{PN} , die Binärvariable, die angibt, ob Prozessalternative i in Periode j genutzt wird, ist für $i=1$ für sämtliche Perioden 1. Dies bedeutet, dass die Produktion am bestehenden Standort unter Nutzung der bisherigen Technologie fortgesetzt werden soll. Die Fertigung der Ventilgrundkörper wird weiterhin mit den Bearbeitungszentren am Montagestandort durchgeführt.
- b_{ij}^W , die Binärvariable, die angibt, ob Werkzeug i in Periode j verfügbar ist. Sie ist für Werkzeug 1 über das gesamte Planungsintervall 1. Die Endmontagelinie wird ständig gebraucht, da die Prozessalternative 1 genutzt wird. Für Werkzeug 3 ist sie über das gesamte Planungsintervall 0. Dies bedeutet, dass bei der gewählten Kombination von Eigenfertigung und Fremdbeschaffung eines der drei Fertigungszentren nicht mehr benötigt wird. Für Werkzeug 2 und 4 ist b_{ij}^W zunächst 1, am Ende des Planungsintervalls wird der Wert der Variable allerdings 0. Dies ist nicht als Vorgabe zu sehen, dass diese Bearbeitungszentren in diesen Perioden nicht mehr vorhanden sein sollten. Vielmehr ist der Grund dafür, dass sie nicht mehr benötigt werden, dass die entsprechenden Mengen an Teilen für die Montagearbeitsplätze in den ersten Perioden des Planungsintervalls gefertigt werden. Die entstehenden Lagerbestände werden dann in den verbleibenden Perioden verbraucht. Daher sollten die Bearbeitungszentren über den gesamten betrachteten Zeitraum vorhanden sein.
- b_{ij}^K , die Binärvariable, die angibt, ob Erzeugnis i in Periode j ein Kaufteil ist. In Abhängigkeit von dieser Variablen werden die Entscheidungen in den folgenden Modellen getroffen; sie stellt einen Parameter für diese Modelle dar.

Das Ergebnis der Optimierung des ersten Partialmodells ist das in Abbildung 6.23 dargestellte Layout. Fertigung und Montage finden weiterhin am bestehenden Standort statt. Auf ein Bearbeitungszentrum kann verzichtet werden, wodurch freier Platz in der Fertigung entsteht. Dieser kann u. a. für Lagereinrichtungen zur Versorgung der Produktion genutzt werden, falls

sich durch die Entscheidungen der Partialmodelle III und IV ein Bedarf an zusätzlichen Lagerflächen ergibt.

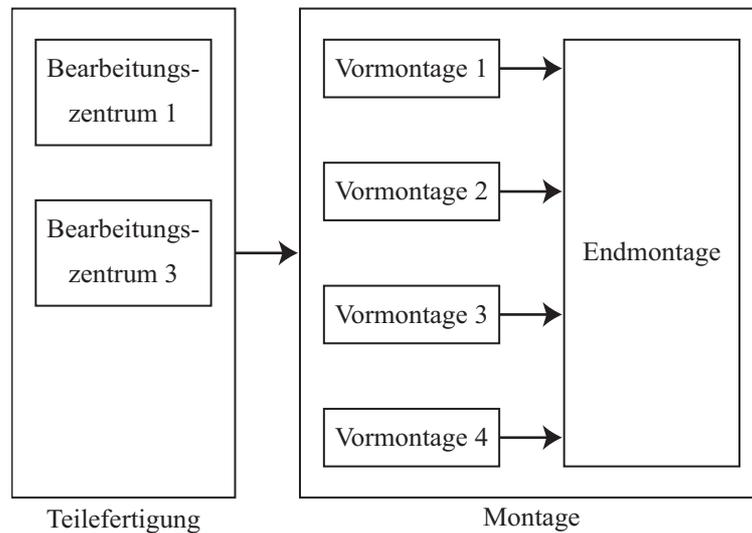


Abbildung 6.23: Struktur der Produktion (Soll-Zustand)

6.3.3.2 Partialmodell II

Die Ausgaben des Solvers für die Optimierung des Partialmodells zur Mitarbeiterbestands- und -qualifikationsplanung finden sich in Anhang B.2. Die für die Lösung des Problems benötigte Prozessorzeit beträgt 72,08 Sekunden.

Die für die Umsetzung der Ergebnisse des Modells zur Mitarbeiterentwicklung relevanten Entscheidungen sind die in Anhang C.2 dargestellten Variablen:

- b_{ijk}^{MQ} und b_{ijk}^{MQN} , die Binärvariablen, die festlegen, welche Mitarbeiter durch Qualifikationsmaßnahmen dazu befähigt werden, weitere Aufgaben im Fertigungsbetrieb zu übernehmen. Die einzige Änderung, die für die Qualifikationsmatrix vorgenommen wird, ist, dass einer der Mitarbeiter, die die notwendigen Qualifikationen für die Arbeit in der Montage besitzen, zusätzlich für die Hilfsarbeiten an den Bearbeitungszentren qualifiziert wird⁴¹. Damit erhält man einen flexibel einsetzbaren Mitarbeiter, mit dem Schwankungen im Arbeitsangebot ausgeglichen werden können. Diese Entscheidung spielt zusammen mit der Entwicklung des Mitarbeiterbestands, der einen Abbau bei den bisherigen Hilfsarbeitern für die Bearbeitungszentren vorsieht.

41 Dabei ist die Variable b_{ijk}^{MQN} in mehreren Perioden für den gewählten Mitarbeiter 1 ($b_{9,2,1}^{MQN}$, $b_{9,2,5}^{MQN}$ und $b_{9,2,9}^{MQN}$), dies liegt allerdings daran, dass die gewählte Optimalitätsgrenze für den Solver („mipgap“) keine weitere Optimierung verlangt. Wenn der Branch and Bound-Algorithmus nach besseren Ergebnissen suchen würde, würde nur eine dieser Variablen den Wert 1 aufweisen.

- b_{ij}^M , b_{ij}^{MR} und b_{ij}^{ME} , die Binärvariablen, die den weiteren Verlauf des Bestands an Mitarbeitern festlegen. Ergebnis der Optimierung ist, dass drei Mitarbeiter aus der Montage, einer der bisherigen Hilfsarbeiter an den Bearbeitungszentren sowie drei der Mitarbeiter an den Bearbeitungszentren (zwei statt bisher drei Bearbeitungszentren) nicht mehr in ihrem bisherigen Aufgabenbereich benötigt werden. Diese Reduktion im Bestand an Mitarbeitern ist bedeutend. Dies liegt darin begründet, dass im Rahmen des Projekts zur Struktur-, Dimensions- und Bedarfsplanung im Unternehmen sämtliche Vorgabezeiten neu bestimmt wurden. Dies wurde durch Zeitnahmen im laufenden Betrieb erreicht. Außerdem wurden die Fertigungs- und Montagemitarbeiter von weiteren Aufgaben (insbesondere Versorgung der Arbeitsplätze mit Material) entlastet, so dass sie die Arbeiten durchführen, für die sie qualifiziert sind. Da durch diese Maßnahme weitere Arbeitsplätze in der zentralisierten Materialdisposition entstehen, führt der Abbau von Arbeitsplätzen in der Fertigung und Montage nicht unbedingt zu Entlassungen.

Die aus den Ergebnissen der Optimierung des zweiten Partialmodells abgeleiteten Entscheidungen für die Mitarbeiterbestands- und -qualifikationsplanung sind in Tabelle 6.3 zusammenfassend dargestellt.

| <i>Mitarbeiter</i> | <i>Qualifikationen Ist-Zustand</i> | <i>Beschäftigung Soll-Zustand</i> | <i>zusätzliche Qualifikationen Soll-Zustand</i> |
|--------------------|--|---------------------------------------|---|
| 1,3,6,7,8,9 | Bremsventilmontage | Ja | - |
| 2 | Bremsventilmontage | Ja | Hilfsarbeiten Bearbeitungszentren |
| 4,5,10 | Bremsventilmontage | Nein | - |
| 11 | Hilfsarbeiten Bearbeitungszentren | Ja | - |
| 12 | Hilfsarbeiten Bearbeitungszentren | Nein | - |
| 14,17 | Bedienung Bearbeitungszentren | Ja | - |
| 13,15,16 | Bedienung Bearbeitungszentren | Nein | - |

Tabelle 6.3: Übersicht über die Mitarbeiterbestands- und -qualifikationsplanung

6.3.3.3 Ableitung der weiteren Parameter aus Partialmodell I und II

Zur Ableitung der weiteren Parameter aus den Ergebnissen der Partialmodelle I und II werden die in Abschnitt 5.1.2.3 beschriebenen Formeln genutzt, wobei grundsätzlich auf die Ergebnisse aus Modell I zurückgegriffen wurde. Zunächst wurden die Werte der Parameter und Va-

riablen durch ein Java-Programm gelesen. Anschließend nahm dieses Programm die Berechnung der Parameter vor und schrieb diese wiederum in eine Datei. Diese Ausgaben konnten anschließend als Eingangsdaten für die untergeordneten Modelle des Verfahrens genutzt werden.

6.3.3.4 Partialmodell III

Die Ausgaben des Solvers für die Optimierung des Partialmodells zur Definition von Lagerstufen und Bestimmung der Meldebestände finden sich in Anhang B.3. Die dabei benötigte Prozessorzeit beträgt lediglich 0,19 Sekunden. Die Ergebnisse der Optimierung sind in Anhang C.3 dargestellt. Die für die Umsetzung der Ergebnisse relevanten Variablen sind:

- b_i^{BZ} , die Binärvariable zur Festlegung von Erzeugnissen, die mit einem Bestellzyklus disponiert werden. Es wird für sämtliche eigengefertigten Erzeugnisse ein Bestellzyklus definiert. Dies liegt an der hohen Auslastung der Bearbeitungszentren und Montagearbeitsplätze im betrachteten Zeitraum. Durch die Nutzung eines Bestellzyklus kann in regelmäßigen Zeiträumen (im Beispiel werden hierfür fünf Zeiteinheiten definiert) eine optimierte Reihenfolgeplanung für die Arbeitsplätze durchgeführt werden.
- b_i^{LS} , die Binärvariable, die definiert, für welche Produkte ein Lagerbestand angelegt werden soll. Aus der Nutzung eines Bestellzyklus von 5 Tagen bei einem Zielwert von ebenfalls 5 Tagen für die Lieferzeit folgt, dass für sämtliche Erzeugnisse eine Lagerstufe definiert werden muss.
- x_i^{MB} , der Meldebestand für die Erzeugnisse, für die eine Lagerstufe definiert wurde. Er wird so eingestellt, dass die Bedarfe für die Erzeugnisse mit der geforderten Liefertreue gedeckt werden können. Die resultierenden Meldebestände liegen zwischen 7 (für in geringen Mengen bestellte Ventilgruppen) und 211 (für Anbauteile, die in diverse Ventilgruppen einfließen).

6.3.3.5 Partialmodell IV

In Anhang B.4 finden sich die Ausgaben von CPLEX für die Optimierung des vierten Partialmodells bei Nutzung der in Anhang A.4 dargestellten Eingabedaten. Die benötigte Prozessorzeit beträgt 7,39 Sekunden. Zur Steuerung des Produktionssystems ist lediglich eine Variable vorgesehen, deren Optimalwerte in Anhang C.4 dargestellt sind:

- Die Losgrößen x_i^{LG} werden im Optimierungsmodell eingestellt. Die Beschränkung auf verbrauchsorientiert disponierte Erzeugnisse spielt dabei wie oben erwähnt keine Rol-

le, da im dritten Partialmodell für sämtliche betrachteten Erzeugnisse eine Lagerstufe definiert wurde. Die Losgröße werden so gewählt, dass unter den durch Partialmodell III definierten Parametern (Meldebestand und die benötigte Bestandsreichweite) der Zielwert für die Liefertreue eingehalten wird. Die definierten Losgrößen variieren zwischen zehn und 342 Stück.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Ergebnis der Arbeit

In dieser Arbeit wurde ein hierarchisches Verfahren entwickelt, das zur Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung in Fertigungsbetrieben genutzt werden kann. Dieses Verfahren besteht aus vier mathematisch formulierten Partialmodellen, die jeweils eine Menge von Fertigungsplanungs-Teilaufgaben lösen. Die Partialmodelle folgen einer Hierarchie, wobei die untergeordneten Partialmodelle jeweils die Ergebnisse der übergeordneten Partialmodelle als Input nutzen, während die übergeordneten Partialmodelle die Auswirkungen auf die untergeordneten Partialmodelle implizit in ihrer Planung berücksichtigen. Da diese Berücksichtigung der Auswirkungen auf die untergeordneten Partialmodelle immer unvollständig geschehen kann, wurden die Partialmodelle schließlich in Koordinationsprozessen, die auch Feedback-Schleifen entgegen der Hierarchie vorsehen, miteinander verknüpft. Die Ergebnisse der Arbeit konnten anhand der Anwendung des Verfahrens für ein Praxisbeispiel aus der Schienenfahrzeugindustrie validiert werden.

Die praktische Fragestellung des Unternehmens aus der Schienenfahrzeugindustrie stellt den Ausgangspunkt für die Problemstellung dar. Diese wird in Kapitel 2.1 formalisiert und analysiert. Das Ergebnis bilden die Fertigungsplanungs-Aufgaben der Struktur-, Dimensions- und mittelfristigen Materialbedarfsplanung, die in Abschnitt 2.2 in Fertigungsplanungs-Teilaufgaben gegliedert werden. Diese werden anschließend in Partialmodellen aggregiert. Die resultierenden Partialmodelle sind die Planung von Prozessen, Standorten und Maschinenbeständen (Partialmodell I), die Mitarbeiterplanung (Partialmodell II), die Definition von Lagerstufen und Bestimmung der Meldebestände (Partialmodell III) sowie die Konfiguration der Dispositionsverfahren (Partialmodell IV).

Kapitel 3 fasst den Stand der Technik im Bereich der hierarchischen Planung von Fertigungssystemen und der mathematischen Losgrößenprobleme zusammen. Aus der Definition der Problemstellung und dem Stand der Technik werden in Kapitel 4 die zu leistenden Arbeiten abgeleitet. Kapitel 5 ist zweigeteilt. In Abschnitt 5.1 wird für jedes Partialmodell eine mathematische Formulierung entwickelt. Dabei bilden mathematische Losgrößenprobleme die Basis

der Modelle, wodurch die Zeit sowie Zugangs- und Abgangsvorgänge der Erzeugnisse modelliert sind. Diese mathematischen Modelle werden so erweitert, dass sie die Lösung der in den Partialmodellen zusammengefassten Fertigungsplanungs-Teilaufgaben ermöglichen. Außerdem ist die zukünftige Bedarfsentwicklung in Form von Szenarien beschrieben, so dass die Unsicherheit bezüglich dieser Eingangsgrößen in den Modellen berücksichtigt werden kann. In Abschnitt 5.2 werden die Modelle durch Koordinationsprozesse so miteinander verbunden, dass eine Lösung der übergeordneten Problemstellung möglich ist.

Kapitel 6 zeigt schließlich anhand der Implementierung in der mathematischen Programmiersprache GNU MathProg, dass die mathematischen Modelle eine durch Solver nutzbare Form haben. Außerdem wird das der Arbeit zugrunde liegende Anwendungsfall modelliert und anschließend in praxistauglichen Rechenzeiten gelöst. Die Ergebnisse der Optimierungen zeigen, dass das entwickelte Verfahren in der Praxis für die Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung genutzt werden kann.

7.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit können die Basis für weitere Entwicklungen bilden. Einerseits kann die in Kapitel 6 beschriebene Implementierung der Modelle weiter entwickelt und in eine Software integriert werden. Die Pflege der Eingabedaten der Modelle in GNU MathProg stellt eine Hürde für die Nutzung des Verfahrens in der Praxis dar. Durch übersichtliche Eingabemasken mit anschließender automatisierter Datenmodellierung in formaler Form kann dieser Schritt benutzerfreundlicher gestaltet werden. Die Bildung der Eingangsdaten für untergeordnete Partialmodelle aus den Ergebnissen der übergeordneten Partialmodelle wurde bereits teilweise durch Java-Programme automatisiert. Diese Entwicklung kann fortgeführt werden, so dass das gesamte Verfahren zur Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen in einem konsistenten Programm abgebildet wird, in das auch der Aufruf der Optimierungssoftware eingebunden wird.

Es ist außerdem möglich, im Rahmen der Entwicklung eines integrierenden Softwaresystems Schnittstellen zu verbreiteten ERP-Systemen zu implementieren. Damit können insbesondere die Ergebnisse der Partialmodelle III und IV als Parameter in diese ERP-Systeme übertragen werden. Ein halb automatisierter Einsatz der Software zur Steuerung von Produktionssystemen wird dadurch möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist die Erweiterung des Verfahrens um die Lösung weiterer Aufgaben. Unter anderem ist die Konfiguration von bedarfsorientierten Planungsalgorithmen ein möglicher Anknüpfungspunkt. Die Planungsheuristiken, die in diesem Bereich zum Einsatz

kommen, müssen zur Ausgestaltung der Fertigungssysteme sowie zum Nachfrage- bzw. Bestellverhalten der Kunden passen. Damit ist denkbar, eine Verzweigung nach Partialmodell III in die Koordinationsprozesse zu integrieren. Für die verbrauchsorientiert zu disponierenden Erzeugnisse wird weiterhin Partialmodell IV zur Bestimmung der Losgrößen verwendet. Für diejenigen Erzeugnisse, die bedarfsorientiert zu disponieren sind, werden Auswahl und Konfiguration der Planungsheuristiken durch ein weiteres Modell vorgenommen.

Literaturverzeichnis

- [Anth65] Anthony, Robert N.: Planning and Control Systems : A Framework for Analysis. 1. Aufl. Boston : Harvard University, 1965
- [Arze05] Arzet, Harry: Grundlagen des One Piece Flow : Leitfaden zur Planung und Realisierung von mitarbeitergebundenen Produktionssystemen. 1. Aufl. Berlin : Rhombos, 2005
- [AWRE68] AWF ; REFA: Handbuch der Arbeitsvorbereitung. 1. Aufl. Berlin : Beuth Vertrieb, 1968
- [BaLa06] Balla, Jochen ; Layer, Frank: Produktionsplanung mit SAP APO-PP/DS. 1. Aufl. Bonn : Galileo Press, 2006
- [BBSS97] Blohm, Hans ; Beer, Thomas ; Seidenberg, Ulrich ; Silber, Herwig: Produktionswirtschaft. 3. Aufl. Herne/Berlin : Neue Wirtschaftsbriefe, 1997
- [BDPR03] Busch, Axel ; Dangelmaier, Wilhelm ; Pape, Ulrich ; Rüter, Michael: Marktspiegel Supply Chain Management Systeme - Potenziale - Konzepte - Anbieter im Vergleich. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2003
- [Betg06] Betge, David: Koordination in Advanced Planning and Scheduling-Systemen. 1. Aufl. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag/GWV, 2006
- [Beue96] Beuermann, Günter: Produktionsfaktoren. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. S.1494-1505. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996

- [BFS06] Boysen, Nils ; Fliedner, Malte ; Scholl, Armin: Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Elemente einer Hierarchischen Planung. In: ZfB Zeitschrift für Betriebswirtschaft 77 (2006), Nr. 7/8, S. 759-793
- [Boss99] Bossert, Beate: Einlastungsplanung flexibler Fertigungssysteme : Entscheidungsunterstützung unter Mehrzielaspekten. 2. Aufl. Wiesbaden : Gabler und Deutscher Universitäts-Verlag, 1999
- [BSMM99] Bronstein, Ilja N. ; Semendjaev, Konstantin A. ; Musiol, Gerhard ; Mühlig, Heiner: Taschenbuch der Mathematik. 4. Aufl. Frankfurt am Main : Harri Deutsch, 1999
- [Cors04] Corsten, Hans: Produktionswirtschaft : Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 10. Aufl. München : Oldenburg, 2004
- [Dang01] Dangelmaier, Wilhelm: Fertigungsplanung : Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung. 2. Aufl. Berlin : Springer, 2001
- [Dang03] Dangelmaier, Wilhelm: Produktion und Information : System und Modell. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2003
- [DaWa97] Dangelmaier, Wilhelm ; Warnecke, Hans-Jürgen: Fertigungslenkung : Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung. 1. Aufl. Berlin : Springer, 1997
- [DEWZ93] Dillenberger, Christof ; Escudero, Laureano ; Wollensak, Artur ; Zhang, Wu: On Solving a Large-Scale Resource Allocation Problem in Production Planning. In: Fandel, Günter ; Gullledge, Thomas ; Jones, Albert: Operations Research in Production Planning and Control. S.105-119. 1. Aufl. Berlin : Springer, 1993
- [Dick06] Dickersbach, Thomas: Supply Chain Management with APO. 2. Aufl. Berlin : Springer, 2006

-
- [DiRo04] Dinkelbach, Werner ; Rosenberg, Otto: Erfolgs- und umweltorientierte Produktionstheorie. 5. Aufl. Berlin : Springer, 2004
- [DoDr05] Domschke, Wolfgang ; Drexl, Andreas: Einführung in Operations Research. 6. Aufl. Berlin : Springer, 2005
- [DSV93] Domschke, Wolfgang ; Scholl, Armin ; Voß, Stefan: Produktionsplanung : Ablauforganisatorische Aspekte. 2. Aufl. Heidelberg : Springer, 1993
- [FGK93] Fourer, Robert ; Gay, David ; Kernighan, Brian: AMPL : A Modelling Language for Mathematical Programming. 1. Aufl. Danvers, Massachusetts : boyd & fraser, 1993
- [FrTh96] Frese, Erich ; Theuvsen, Ludwig: Fertigungsorganisation. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. S.461-473. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996
- [GeKu07] Gebhard, Marina ; Kuhn, Heinrich: Robuste hierarchische Produktionsplanung mit Bedarfsszenarien. In: Otto, Andreas ; Obermaier, Robert: Logistikmanagement : Analyse, Bewertung und Gestaltung logistischer Systeme. S.161-183. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2007
- [GüTe05] Günther, Hans-Otto ; Tempelmeier, Horst: Produktion und Logistik. 6. Aufl. Berlin : Springer, 2005
- [Gute51] Gutenberg, Ernst: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre : Bd. 1: Die Produktion. 1. Aufl. Berlin : Gabler, 1951
- [HaWh84] Hayes, Robert H. ; Wheelwright, Steven C.: Restoring Our Competitive Edge : Competing Through Manufacturing. 1. Aufl. New York : Wiley, 1984
- [Hoit93] Hoitsch, Hans-Jörg: Produktionswirtschaft : Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre. 2. Aufl. München : Vahlen, 1993

- [Hopp07] Hoppe, Marc: Absatz- und Bestandsplanung mit SAP APO. 1. Aufl. Bonn : Galileo Press, 2007
- [KiSt01] Kistner, Klaus-Peter ; Steven, Marion: Produktionsplanung. 3. Aufl. Heidelberg : Physica, 2001
- [KlBu87] Klaus, Georg ; Buhr, Manfred: Philosophisches Wörterbuch. 14. Aufl. Westberlin : Verlag Das Europ. Buch, 1987
- [Krel69] Krelle, Wilhelm: Produktionstheorie (Teil I der Preistheorie). 2. Aufl. Tübingen : Mohr, 1969
- [Kühn04] Kühn, Hans: Ganzheitliche Lieferantenintegration in Produktions- und Logistiknetzwerken. In: Supply Chain Management 4 (2004), Nr. 4, S. 33-38
- [MaWa91] Maes, Johan ; Van Wassenhove, Luk: Capacitated Dynamic Lotsizing Heuristics for Serial Systems. In: International Journal of Production Research 29 (1991), Nr. 6, S. 1235-1249
- [MRS+08] Meyr, Herbert ; Rosic, Heidrun ; Seipl, Christian ; Wagner, Michael ; Wetterauer, Ulrich: Architecture of Selected APS. In: Stadtler, Hartmut ; Kilger, Christoph: Supply Chain Management and Advanced Planning. S.349-366. 4. Aufl. Berlin : Springer, 2008
- [Müll73] Müller-Merbach, Heiner: Operations Research. 3. Aufl. München : Vahlen, 1973
- [Ohno89] Ohno, Taiichi: Toyota production system : beyond large-scale production. 2. Aufl. Cambridge, Mass. : Productivity Press, 1989
- [Padb00] Padberg, Manfred: Approximating separable nonlinear functions via mixed zero-one programs. In: Operations Research Letters 27 (2000), Nr. 1, S. 1-5

-
- [Pati06] Patig, Susanne: SAP APO 3.1 im Überblick. Magdeburg : Schulungsunterlagen SAP APO, 2006
- [PrHa90] Prahalad, Coimbatore K. ; Hamel, Gary: The Core Competence of the Corporation. In: Harvard Business Review 68 (1990), Nr. 3, S. 79-91
- [Reus06] Reusch, Pascal: Abstimmungsmechanismen zwischen Programmplanung und Mengenplanung in der mehrstufigen Produktionsplanung. Duisburg : , 2006
- [Riep79] Rieper, Bernd: Hierarchische betriebliche Systeme, Beiträge zur industriellen Unternehmensforschung, Bd. 8. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 1979
- [Rohd08] Reuter, Boris ; Rohde, Jens: Coordination and Integration. In: Stadtler, Hartmut ; Kilger, Christoph: Supply Chain Management and Advanced Planning. S.247-261. 4. Aufl. Berlin : Springer, 2008
- [Sabi96] Sabisch, Helmut: Produkte und Produktgestaltung. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. S.1439-1451. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996
- [Salo91] Salomon, Marc: Deterministic lotsizing models for production planning. 1. Aufl. Berlin : Springer, 1991
- [Schn02] Schneeweiß, Christoph: Einführung in die Produktionswirtschaft. 8. Aufl. Berlin : Springer, 2002
- [Schn94] Schneeweiß, Christoph: Elemente einer Theorie hierarchischer Planung. In: OR Spektrum 16 (1994), Nr. 2, S. 161-168
- [Scho01] Scholl, Armin: Robuste Planung und Optimierung : Grundlagen - Konzepte und Methoden - Experimentelle Untersuchungen. 1. Aufl. Heidelberg : Physica, 2001
- [Stac73] Stachowiak, Herbert: Allgemeine Modelltheorie. 1. Aufl. Berlin : Springer, 1973

- [Stad05] Stadler, Hartmut: Supply Chain Management — An Overview. In: Stadler, Hartmut ; Kilger, Christoph: Supply Chain Management and Advanced Planning. S.9-35. 3. Aufl. Berlin : Springer, 2005
- [Stad96] Stadler, Hartmut: Hierarchische Produktionsplanung. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. S.631-641. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996
- [SuMe06] Suhl, Leena ; Mellouli, Taïeb: Optimierungssysteme : Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2006
- [Swit89] Switalski, Marion: Hierarchische Produktionsplanung. 1. Aufl. Heidelberg : Physica, 1989
- [Temp06] Tempelmeier, Horst: Material-Logistik. 6. Aufl Berlin : Springer, 2006
- [Troß96] Troßmann, Ernst: Ablaufplanung bei Einzel- und Serienproduktion. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. S.11-26. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996
- [Warn93A] Warnecke, Hans-Jürgen: Der Produktionsbetrieb : 1. Organisation, Produkt, Planung. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1993
- [Warn93B] Warnecke, Hans-Jürgen: Der Produktionsbetrieb : 2. Produktion, Produktionssicherung. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1993
- [WeKa06] Weber, Wolfgang ; Kabst, Rüdiger: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. 6. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2006
- [Witt96] Witte, Thomas: Materialbedarfsplanung. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. S.1168-1183. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996

[Woll92] Woll, Artur: Wirtschaftslexikon. 6. Aufl. Wien : Oldenburg, 1992

[Zäpf96] Zäpfel, Günther: PPS (Produktionsplanung und -steuerung). In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. S.1391-1405. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996

Anhang A: Datenbasis der Validierung im GNU MathProg Format

A.1 Partialmodell I

```
set E :=
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
  26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47
  48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69
  70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
  92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 ;

set P := 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 ;

set PA := 1, 2 ;

set S := 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
  24 25 26 27 28 29 30 ;

set T := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
  25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46
  47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68
  69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
  91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109
  110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125
  126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141
  142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157
  158 159 160 161 ;

set W := 1 2 3 4 ;

param big_m := 1000 ;

param n_rtmax := 1000 ;

param:      pi      ny      omega :=
           0        0        0      1
           1        1        0      1
           2        2        1      1
           3        3        2      1
           4        4        3      1
           5        5        4      1
           6        6        5      1
           7        7        6      1
           8        8        7      1
           9        9        8      1
```



```
param b_pn0 := 1 1 2 0 ;

param b_w0 := 1 1 2 1 3 1 4 1 ;

param b_v default 1 :=
  1 0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9 0 10 0 11 0 12 0 13 0 14 0 15 0
  16 0 17 0 18 0 19 0 20 0 21 0 22 0 23 0 24 0 25 0 26 0 27 0 28 0
  29 0 30 0 ;

param c_f := 1 0 2 2250 3 1250 4 1250 ;

param c_k default 0 :=
  48 150 49 140 50 160 51 135 52 138 53 125 54 128 55 150 56 152
  57 155 58 120 59 125 60 129 61 144 62 160 63 162 64 128 86 88
  87 16 88 77 89 55 90 35 91 190 92 166 93 44 94 28 95 50 96 122
  97 48 98 47 99 29 100 49 101 488 102 58 103 54 104 22 ;

param c_l default 1 :=
  1 3 2 3 3 3 4 3 5 3 6 3 7 3 8 3 9 3 10 3 11 3 12 3 13 3 14 3 15 3
  16 3 17 3 18 3 19 3 20 3 21 3 22 3 23 3 24 3 25 3 26 3 27 3 28 3
  29 3 30 3 65 0.5 66 0.5 67 0.5 68 0.5 69 0.5 70 0.5 71 0.5 72 0.5
  73 0.5 74 0.5 75 0.5 76 0.5 77 0.5 78 0.5 79 0.5 80 0.5 81 0.5
  82 0.5 83 0.5 84 0.5 85 0.5 86 0.5 87 0.5 88 0.5 89 0.5 90 0.5
  91 0.5 92 0.5 93 0.5 94 0.5 95 0.5 96 0.5 97 0.5 98 0.5 99 0.5
  100 0.5 101 0.5 102 0.5 103 0.5 104 0.5;

param c_n := 1 100000 2 1000000 3 400000 4 400000 ;

param c_p := 1 500 2 150 3 150 4 150 ;

param c_pna := 50000 ;

param c_r := 1 1000 2 250 3 250 4 250 ;

param c_v default 0 :=
  1 50 2 50 3 50 4 50 5 50 6 50 7 50 8 50 9 50 10 50 11 50 12 50
  13 50 14 50 15 50 16 50 17 50 18 50 19 50 20 50 21 50 22 50 23 50
  24 50 25 50 26 50 27 50 28 50 29 50 30 50 ;

param c_z := 0.00539 ;

param n_b default 0 := [3,1] 100 [10,1] 30 [1,1] 15 [11,2] 80 [2,2] 20
  [21,3] 150 [6,3] 10 [4,4] 22 [5,5] 30 [12,6] 400 [13,7] 40
  [22,7] 15 [28,8] 22 [29,8] 22 [21,10] 250 [9,11] 17 [8,11] 17
  [10,14] 700 [18,14] 70 [11,16] 500 [10,18] 300 [10,20] 120
  [23,21] 22 [24,21] 22 [10,24] 850 [18,24] 50 [11,26] 550
  [10,28] 380 [10,30] 200 ;

param n_tb default 0 :=
  # Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
  [31,1] 1 [31,2] 1 [31,3] 1 [31,4] 1 [32,5] 1 [32,6] 1 [32,7] 1
  [33,8] 1 [33,9] 1 [33,10] 1 [34,11] 1 [34,12] 1 [35,13] 1
  [35,14] 1 [36,15] 1 [36,16] 1 [37,17] 1 [37,18] 1 [38,19] 1
  [38,20] 1 [39,21] 1 [39,22] 1 [40,23] 1 [41,24] 1 [42,25] 1
  [43,26] 1 [44,27] 1 [45,28] 1 [46,29] 1 [47,30] 1
  # Montage der Ventilgruppen aus den zugekauften Ventilgrundkörpern
  [48,31] 1 [48,32] 1 [48,33] 1 [48,34] 1 [49,35] 1 [49,36] 1
  [49,37] 1 [50,38] 1 [50,39] 1 [50,40] 1 [51,41] 1 [51,42] 1
```

[52,43] 1 [52,44] 1 [53,45] 1 [53,46] 1 [54,47] 1 [54,48] 1
[55,49] 1 [55,50] 1 [56,51] 1 [56,52] 1 [57,53] 1 [58,54] 1
[59,55] 1 [60,56] 1 [61,57] 1 [62,58] 1 [63,59] 1 [64,60] 1
Anbauteile Eigenfertigung
[65,1] 1 [66,1] 1 [73,1] 1 [76,1] 1 [81,1] 1 [83,1] 1 [84,1] 1
[85,1] 1 [65,2] 1 [66,2] 1 [73,2] 1 [77,2] 1 [81,2] 1 [66,3] 1
[73,3] 1 [78,3] 1 [82,3] 1 [65,4] 1 [66,4] 1 [74,4] 1 [76,4] 1
[81,4] 1 [83,4] 1 [84,4] 1 [85,4] 1 [65,5] 1 [66,5] 1 [74,5] 1
[77,5] 1 [81,5] 1 [66,6] 1 [74,6] 1 [78,6] 1 [82,6] 1 [65,7] 1
[67,7] 1 [73,7] 1 [77,7] 1 [81,7] 1 [65,8] 1 [67,8] 1 [73,8] 1
[78,8] 1 [82,8] 1 [65,9] 1 [67,9] 1 [74,9] 1 [77,9] 1 [81,9] 1
[65,10] 1 [67,10] 1 [74,10] 1 [78,10] 1 [82,10] 1 [65,11] 1
[67,11] 1 [74,11] 1 [77,11] 1 [81,11] 1 [65,12] 1 [67,12] 1
[74,12] 1 [78,12] 1 [82,12] 1 [65,13] 1 [68,13] 1 [75,13] 1
[77,13] 1 [81,13] 1 [65,14] 1 [68,14] 1 [75,14] 1 [78,14] 1
[82,14] 1 [65,15] 1 [68,15] 1 [73,15] 1 [77,15] 1 [81,15] 1
[65,16] 1 [68,16] 1 [73,16] 1 [78,16] 1 [82,16] 1 [65,17] 1
[69,17] 1 [73,17] 1 [77,17] 1 [81,17] 1 [65,18] 1 [69,18] 1
[73,18] 1 [78,18] 1 [82,18] 1 [65,19] 1 [70,19] 1 [74,19] 1
[77,19] 1 [81,19] 1 [65,20] 1 [70,20] 1 [74,20] 1 [78,20] 1
[82,20] 1 [65,21] 1 [70,21] 1 [75,21] 1 [77,21] 1 [81,21] 1
[65,22] 1 [70,22] 1 [75,22] 1 [78,22] 1 [82,22] 1 [65,23] 1
[70,23] 1 [75,23] 1 [77,23] 1 [81,23] 1 [65,24] 1 [70,24] 1
[75,24] 1 [78,24] 1 [82,24] 1 [71,25] 1 [75,25] 1 [78,25] 1
[82,25] 1 [83,25] 1 [84,25] 1 [71,26] 1 [74,26] 1 [78,26] 1
[82,26] 1 [83,26] 1 [84,26] 1 [71,27] 1 [74,27] 1 [78,27] 1
[82,27] 1 [83,27] 1 [84,27] 1 [71,28] 1 [74,28] 1 [78,28] 1
[82,28] 1 [83,28] 1 [84,28] 1 [65,29] 1 [71,29] 1 [74,29] 1
[78,29] 1 [82,29] 1 [83,29] 1 [84,29] 1 [72,30] 1 [74,30] 1
[78,30] 1 [82,30] 1 [83,30] 1 [84,30] 1 [65,31] 1 [66,31] 1
[73,31] 1 [76,31] 1 [81,31] 1 [83,31] 1 [84,31] 1 [85,31] 1
[65,32] 1 [66,32] 1 [73,32] 1 [77,32] 1 [81,32] 1 [66,33] 1
[73,33] 1 [78,33] 1 [82,33] 1 [65,34] 1 [66,34] 1 [74,34] 1
[76,34] 1 [81,34] 1 [83,34] 1 [84,34] 1 [85,34] 1 [65,35] 1
[66,35] 1 [74,35] 1 [77,35] 1 [81,35] 1 [66,36] 1 [74,36] 1
[78,36] 1 [82,36] 1 [33,37] 1 [67,37] 1 [73,37] 1 [77,37] 1
[81,37] 1 [65,38] 1 [67,38] 1 [73,38] 1 [78,38] 1 [82,38] 1
[65,39] 1 [67,39] 1 [74,39] 1 [77,39] 1 [81,39] 1 [65,40] 1
[67,40] 1 [74,40] 1 [78,40] 1 [82,40] 1 [65,41] 1 [67,41] 1
[74,41] 1 [77,41] 1 [81,41] 1 [65,42] 1 [67,42] 1 [74,42] 1
[78,42] 1 [82,42] 1 [65,43] 1 [68,43] 1 [75,43] 1 [77,43] 1
[81,43] 1 [65,44] 1 [68,44] 1 [75,44] 1 [78,44] 1 [82,44] 1
[65,45] 1 [68,45] 1 [73,45] 1 [77,45] 1 [81,45] 1 [65,46] 1
[68,46] 1 [73,46] 1 [78,46] 1 [82,46] 1 [65,47] 1 [69,47] 1
[73,47] 1 [77,47] 1 [81,47] 1 [65,48] 1 [69,48] 1 [73,48] 1
[78,48] 1 [82,48] 1 [65,49] 1 [70,49] 1 [74,49] 1 [77,49] 1
[81,49] 1 [65,50] 1 [70,50] 1 [74,50] 1 [78,50] 1 [82,50] 1
[65,51] 1 [70,51] 1 [75,51] 1 [77,51] 1 [81,51] 1 [65,52] 1
[70,52] 1 [75,52] 1 [78,52] 1 [82,52] 1 [65,53] 1 [70,53] 1
[75,53] 1 [77,53] 1 [81,53] 1 [65,54] 1 [70,54] 1 [75,54] 1
[78,54] 1 [82,54] 1 [71,55] 1 [75,55] 1 [78,55] 1 [82,55] 1
[83,55] 1 [84,55] 1 [71,56] 1 [74,56] 1 [78,56] 1 [82,56] 1
[83,56] 1 [84,56] 1 [71,57] 1 [74,57] 1 [78,57] 1 [82,57] 1
[83,57] 1 [84,57] 1 [71,58] 1 [74,58] 1 [78,58] 1 [82,58] 1
[83,58] 1 [84,58] 1 [65,59] 1 [71,59] 1 [74,59] 1 [78,59] 1
[82,59] 1 [83,59] 1 [84,59] 1 [72,60] 1 [74,60] 1 [78,60] 1
[82,60] 1 [83,60] 1 [84,60] 1
Anbauteile Fremdfertigung

```

[86,1] 1 [87,1] 1 [91,1] 1 [96,1] 1 [103,1] 1 [104,1] 1 [88,2] 1
[91,2] 1 [96,2] 1 [89,3] 1 [91,3] 1 [96,3] 1 [86,4] 1 [87,4] 1
[92,4] 1 [97,4] 1 [103,4] 1 [104,4] 1 [88,5] 1 [92,5] 1 [97,5] 1
[89,6] 1 [92,6] 1 [97,6] 1 [88,7] 1 [91,7] 1 [96,7] 1 [89,8] 1
[91,8] 1 [96,8] 1 [88,9] 1 [93,9] 1 [98,9] 1 [89,10] 1 [93,10] 1
[98,10] 1 [88,11] 1 [94,11] 1 [99,11] 1 [89,12] 1 [94,12] 1
[99,12] 1 [88,13] 1 [91,13] 1 [96,13] 1 [89,14] 1 [91,14] 1
[96,14] 1 [88,15] 1 [91,15] 1 [96,15] 1 [89,16] 1 [91,16] 1
[96,16] 1 [88,17] 1 [91,17] 1 [96,17] 1 [89,18] 1 [91,18] 1
[96,18] 1 [88,19] 1 [93,19] 1 [98,19] 1 [89,20] 1 [93,20] 1
[98,20] 1 [88,21] 1 [94,21] 1 [99,21] 1 [89,22] 1 [94,22] 1
[99,22] 1 [88,23] 1 [92,23] 1 [97,23] 1 [89,24] 1 [92,24] 1
[97,24] 1 [89,25] 1 [90,25] 1 [95,25] 1 [100,25] 1 [101,25] 1
[102,25] 1 [89,26] 1 [90,26] 1 [95,26] 1 [100,26] 1 [102,26] 1
[89,27] 1 [90,27] 1 [95,27] 1 [100,27] 1 [102,27] 1 [89,28] 1
[90,28] 1 [95,28] 1 [100,28] 1 [102,28] 1 [89,29] 1 [90,29] 1
[95,29] 1 [100,29] 1 [102,29] 1 [89,30] 1 [90,30] 1 [95,30] 1
[100,30] 1 [101,30] 1 [102,30] 1 ;

```

```
param n_te default 0 :=
```

```

# Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
[1,1] 1 [2,2] 1 [3,3] 1 [4,4] 1 [5,5] 1 [6,6] 1 [7,7] 1 [8,8] 1
[9,9] 1 [10,10] 1 [11,11] 1 [12,12] 1 [13,13] 1 [14,14] 1
[15,15] 1 [16,16] 1 [17,17] 1 [18,18] 1 [19,19] 1 [20,20] 1
[21,21] 1 [22,22] 1 [23,23] 1 [24,24] 1 [25,25] 1 [26,26] 1
[27,27] 1 [28,28] 1 [29,29] 1 [30,30] 1
# Montage der Ventilgruppen aus den zugekauften Ventilgrundkörpern
[1,31] 1 [2,32] 1 [3,33] 1 [4,34] 1 [5,35] 1 [6,36] 1 [7,37] 1
[8,38] 1 [9,39] 1 [10,40] 1 [11,41] 1 [12,42] 1 [13,43] 1
[14,44] 1 [15,45] 1 [16,46] 1 [17,47] 1 [18,48] 1 [19,49] 1
[20,50] 1 [21,51] 1 [22,52] 1 [23,53] 1 [24,54] 1 [25,55] 1
[26,56] 1 [27,57] 1 [28,58] 1 [29,59] 1 [30,60] 1
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[31,61] 1 [32,62] 1 [33,63] 1 [34,64] 1 [35,65] 1 [36,66] 1
[37,67] 1 [38,68] 1 [39,69] 1 [40,70] 1 [41,71] 1 [42,72] 1
[43,73] 1 [44,74] 1 [45,75] 1 [46,76] 1 [47,77] 1
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem zweiten Bearbeitungszentrum
[31,78] 1 [32,79] 1 [33,80] 1 [34,81] 1 [35,82] 1 [36,83] 1
[37,84] 1 [38,85] 1 [39,86] 1 [40,87] 1 [41,88] 1 [42,89] 1
[43,90] 1 [44,91] 1 [45,92] 1 [46,93] 1 [47,94] 1
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[31,95] 1 [32,96] 1 [33,97] 1 [34,98] 1 [35,99] 1 [36,100] 1
[37,101] 1 [38,102] 1 [39,103] 1 [40,104] 1 [41,105] 1 [42,106] 1
[43,107] 1 [44,108] 1 [45,109] 1 [46,110] 1 [47,111] 1
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[65,112] 1 [66,113] 1 [67,114] 1 [68,115] 1 [69,116] 1 [70,117] 1
[71,118] 1 [72,119] 1 [73,120] 1 [74,121] 1 [75,122] 1 [76,123] 1
[77,124] 1 [78,125] 1 [79,126] 1 [80,127] 1 [81,128] 1 [82,129] 1
[83,130] 1 [84,131] 1 [85,132] 1
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem zweiten Bearbeitungszentrum
[65,133] 1 [66,134] 1 [67,135] 1 [68,136] 1 [69,137] 1 [70,138] 1
[71,139] 1 [72,140] 1 [73,141] 1 [74,142] 1 [75,143] 1 [76,144] 1
[77,145] 1 [78,146] 1 [79,147] 1
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[65,148] 1 [66,149] 1 [67,150] 1 [68,151] 1 [69,152] 1 [70,153] 1
[71,154] 1 [72,155] 1 [73,156] 1 [74,157] 1 [75,158] 1 [76,159] 1
[77,160] 1 [78,161] 1 ;

```

```
param t_kw default 10 : 0 := 1 0 2 0 3 0 4 0;

param t_rt default 0 :=
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[61,2] 0.125 [62,2] 0.125 [63,2] 0.125 [64,2] 0.125 [65,2] 0.125
[66,2] 0.125 [67,2] 0.125 [68,2] 0.125 [69,2] 0.125 [70,2] 0.125
[71,2] 0.125 [72,2] 0.125 [73,2] 0.125 [74,2] 0.125 [75,2] 0.125
[76,2] 0.125 [77,2] 0.125
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem zweiten Bearbeitungszentrum
[78,3] 0.1 [79,3] 0.1 [80,3] 0.1 [81,3] 0.1 [82,3] 0.1 [83,3] 0.1
[84,3] 0.1 [85,3] 0.1 [86,3] 0.1 [87,3] 0.1 [88,3] 0.1 [89,3] 0.1
[90,3] 0.1 [91,3] 0.1 [92,3] 0.1 [93,3] 0.1 [94,3] 0.1
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[95,4] 0.1 [96,4] 0.1 [97,4] 0.1 [98,4] 0.1 [99,4] 0.1 [100,4] 0.1
[101,4] 0.1 [102,4] 0.1 [103,4] 0.1 [104,4] 0.1 [105,4] 0.1
[106,4] 0.1 [107,4] 0.1 [108,4] 0.1 [109,4] 0.1 [110,4] 0.1
[111,4] 0.1
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[112,2] 0.125 [113,2] 0.125 [114,2] 0.125 [115,2] 0.125
[116,2] 0.125 [117,2] 0.125 [118,2] 0.125 [119,2] 0.125
[120,2] 0.125 [121,2] 0.125 [122,2] 0.125 [123,2] 0.125
[124,2] 0.125 [125,2] 0.125 [126,2] 0.125 [127,2] 0.125
[128,2] 0.125 [129,2] 0.125 [130,2] 0.125 [131,2] 0.125
[132,2] 0.125
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem zweiten Bearbeitungszentrum
[133,3] 0.1 [134,3] 0.1 [135,3] 0.1 [136,3] 0.1 [137,3] 0.1
[138,3] 0.1 [139,3] 0.1 [140,3] 0.1 [141,3] 0.1 [142,3] 0.1
[143,3] 0.1 [144,3] 0.1 [145,3] 0.1 [146,3] 0.1 [147,3] 0.1
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[148,4] 0.1 [149,4] 0.1 [150,4] 0.1 [151,4] 0.1 [152,4] 0.1
[153,4] 0.1 [154,4] 0.1 [155,4] 0.1 [156,4] 0.1 [157,4] 0.1
[158,4] 0.1 [159,4] 0.1 [160,4] 0.1 [161,4] 0.1 ;

param t_tw default 0 :=
# Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
[1,1] 0.0625 [2,1] 0.0625 [3,1] 0.0625 [4,1] 0.0625 [5,1] 0.0625
[6,1] 0.0625 [7,1] 0.0625 [8,1] 0.0625 [9,1] 0.0625 [10,1] 0.0625
[11,1] 0.0625 [12,1] 0.0625 [13,1] 0.0625 [14,1] 0.0625
[15,1] 0.0625 [16,1] 0.0625 [17,1] 0.0625 [18,1] 0.0625
[19,1] 0.0625 [20,1] 0.0625 [21,1] 0.0625 [22,1] 0.0625
[23,1] 0.0625 [24,1] 0.0625 [25,1] 0.0625 [26,1] 0.0625
[27,1] 0.0625 [28,1] 0.0625 [29,1] 0.0625 [30,1] 0.0625
# Montage der Ventilgruppen aus den zugekauften Ventilgrundkörpern
[31,1] 0.083334 [32,1] 0.083334 [33,1] 0.083334 [34,1] 0.083334
[35,1] 0.083334 [36,1] 0.083334 [37,1] 0.083334 [38,1] 0.083334
[39,1] 0.083334 [40,1] 0.083334 [41,1] 0.083334 [42,1] 0.083334
[43,1] 0.083334 [44,1] 0.083334 [45,1] 0.083334 [46,1] 0.083334
[47,1] 0.083334 [48,1] 0.083334 [49,1] 0.083334 [50,1] 0.083334
[51,1] 0.083334 [52,1] 0.083334 [53,1] 0.083334 [54,1] 0.083334
[55,1] 0.083334 [56,1] 0.083334 [57,1] 0.083334 [58,1] 0.083334
[59,1] 0.083334 [60,1] 0.083334
# Fertigung Ventilgrundkörper auf ersten Bearbeitungszentrum
[61,2] 0.04 [62,2] 0.04 [63,2] 0.04 [64,2] 0.04 [65,2] 0.04
[66,2] 0.04 [67,2] 0.04 [68,2] 0.04 [69,2] 0.04 [70,2] 0.04
[71,2] 0.04 [72,2] 0.04 [73,2] 0.04 [74,2] 0.04 [75,2] 0.04
[76,2] 0.04 [77,2] 0.04
# Fertigung Ventilgrundkörper auf zweitem Bearbeitungszentrum
[78,3] 0.05 [79,3] 0.05 [80,3] 0.05 [81,3] 0.05 [82,3] 0.05
```

```

[83,3] 0.05 [84,3] 0.05 [85,3] 0.05 [86,3] 0.05 [87,3] 0.05
[88,3] 0.05 [89,3] 0.05 [90,3] 0.05 [91,3] 0.05 [92,3] 0.05
[93,3] 0.05 [94,3] 0.05
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dritten Bearbeitungszentrum
[95,4] 0.05 [96,4] 0.05 [97,4] 0.05 [98,4] 0.05 [99,4] 0.05
[100,4] 0.05 [101,4] 0.05 [102,4] 0.05 [103,4] 0.05 [104,4] 0.05
[105,4] 0.05 [106,4] 0.05 [107,4] 0.05 [108,4] 0.05 [109,4] 0.05
[110,4] 0.05 [111,4] 0.05
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[112,2] 0.008 [113,2] 0.008 [114,2] 0.008 [115,2] 0.008
[116,2] 0.008 [117,2] 0.008 [118,2] 0.005 [119,2] 0.005
[120,2] 0.005 [121,2] 0.005 [122,2] 0.005 [123,2] 0.006
[124,2] 0.006 [125,2] 0.006 [126,2] 0.006 [127,2] 0.006
[128,2] 0.015 [129,2] 0.015 [130,2] 0.015 [131,2] 0.015
[132,2] 0.015
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem zweiten Bearbeitungszentrum
[133,3] 0.01 [134,3] 0.01 [135,3] 0.01 [136,3] 0.01 [137,3] 0.01
[138,3] 0.01 [139,3] 0.01 [140,3] 0.004 [141,3] 0.004
[142,3] 0.004 [143,3] 0.005 [144,3] 0.009 [145,3] 0.006
[146,3] 0.006 [147,3] 0.006
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[148,4] 0.01 [149,4] 0.01 [150,4] 0.01 [151,4] 0.01 [152,4] 0.01
[153,4] 0.01 [154,4] 0.01 [155,4] 0.01 [156,4] 0.004 [157,4] 0.004
[158,4] 0.004 [159,4] 0.005 [160,4] 0.009 [161,4] 0.006 ;

```

A.2 Partialmodell II

```

set Q := 1 2 3 ;

set M :=
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
  25 ;

set E :=
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
  26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47
  48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69
  70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
  92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 ;

set P := 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 ;

set S :=
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
  25 26 27 28 29 30 ;

set T :=
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
  26 27 28 29 30 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77
  78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99
  100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115
  116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131
  132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147
  148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 ;

set W := 1 2 4 ;

param big_m := 10000 ;

```

```
param n_rtmax := 1000;
```

```
param:      pi      ny      omega :=
  0         0         0         1
  1         1         0         1
  2         2         1         1
  3         3         2         1
  4         4         3         1
  5         5         4         1
  6         6         5         1
  7         7         6         1
  8         8         7         1
  9         9         8         1
 10        10        9         1
 11        11        10        0.3
 12        12        11        0.3
 13        13        12        0.3
 14        14        13        0.3
 15        15        14        0.3
 16        16        15        0.3
 17        17        16        0.3
 18        18        17        0.3
 19        19        18        0.3
 20        20        19        0.3
 21        11        10        0.7
 22        12        21        0.7
 23        13        22        0.7
 24        14        23        0.7
 25        15        24        0.7
 26        16        25        0.7
 27        17        26        0.7
 28        18        27        0.7
 29        19        28        0.7
 30        20        29        0.7 ;
```

```
param b_k default 0 :=
```

```
[48,0] 1 [48,1] 1 [48,2] 1 [48,3] 1 [48,4] 1 [48,5] 1 [48,6] 1
[48,7] 1 [48,8] 1 [48,9] 1 [48,10] 1 [48,11] 1 [48,12] 1 [48,13] 1
[48,14] 1 [48,15] 1 [48,16] 1 [48,17] 1 [48,18] 1 [48,19] 1
[48,20] 1 [49,0] 1 [49,1] 1 [49,2] 1 [49,3] 1 [49,4] 1 [49,5] 1
[49,6] 1 [49,7] 1 [49,8] 1 [49,9] 1 [49,10] 1 [49,11] 1 [49,12] 1
[49,13] 1 [49,14] 1 [49,15] 1 [49,16] 1 [49,17] 1 [49,18] 1
[49,19] 1 [49,20] 1 [50,0] 1 [50,1] 1 [50,2] 1 [50,3] 1 [50,4] 1
[50,5] 1 [50,6] 1 [50,7] 1 [50,8] 1 [50,9] 1 [50,10] 1 [50,11] 1
[50,12] 1 [50,13] 1 [50,14] 1 [50,15] 1 [50,16] 1 [50,17] 1
[50,18] 1 [50,19] 1 [50,20] 1 [51,0] 1 [51,1] 1 [51,2] 1 [51,3] 1
[51,4] 1 [51,5] 1 [51,6] 1 [51,7] 1 [51,8] 1 [51,9] 1 [51,10] 1
[51,11] 1 [51,12] 1 [51,13] 1 [51,14] 1 [51,15] 1 [51,16] 1
[51,17] 1 [51,18] 1 [51,19] 1 [51,20] 1 [52,0] 1 [52,1] 1 [52,2] 1
[52,3] 1 [52,4] 1 [52,5] 1 [52,6] 1 [52,7] 1 [52,8] 1 [52,9] 1
[52,10] 1 [52,11] 1 [52,12] 1 [52,13] 1 [52,14] 1 [52,15] 1
[52,16] 1 [52,17] 1 [52,18] 1 [52,19] 1 [52,20] 1 [53,0] 1 [53,1]
1 [53,2] 1 [53,3] 1 [53,4] 1 [53,5] 1 [53,6] 1 [53,7] 1 [53,8] 1
[53,9] 1 [53,10] 1 [53,11] 1 [53,12] 1 [53,13] 1 [53,14] 1
[53,15] 1 [53,16] 1 [53,17] 1 [53,18] 1 [53,19] 1 [53,20] 1
[54,0] 1 [54,1] 1 [54,2] 1 [54,3] 1 [54,4] 1 [54,5] 1 [54,6] 1
[54,7] 1 [54,8] 1 [54,9] 1 [54,10] 1 [54,11] 1 [54,12] 1 [54,13] 1
```



```
[93,17] 1 [93,18] 1 [93,19] 1 [93,20] 1 [94,0] 1 [94,1] 1 [94,2] 1
[94,3] 1 [94,4] 1 [94,5] 1 [94,6] 1 [94,7] 1 [94,8] 1 [94,9] 1
[94,10] 1 [94,11] 1 [94,12] 1 [94,13] 1 [94,14] 1 [94,15] 1
[94,16] 1 [94,17] 1 [94,18] 1 [94,19] 1 [94,20] 1 [95,0] 1
[95,1] 1 [95,2] 1 [95,3] 1 [95,4] 1 [95,5] 1 [95,6] 1 [95,7] 1
[95,8] 1 [95,9] 1 [95,10] 1 [95,11] 1 [95,12] 1 [95,13] 1
[95,14] 1 [95,15] 1 [95,16] 1 [95,17] 1 [95,18] 1 [95,19] 1
[95,20] 1 [96,0] 1 [96,1] 1 [96,2] 1 [96,3] 1 [96,4] 1 [96,5] 1
[96,6] 1 [96,7] 1 [96,8] 1 [96,9] 1 [96,10] 1 [96,11] 1 [96,12] 1
[96,13] 1 [96,14] 1 [96,15] 1 [96,16] 1 [96,17] 1 [96,18] 1
[96,19] 1 [96,20] 1 [97,0] 1 [97,1] 1 [97,2] 1 [97,3] 1 [97,4] 1
[97,5] 1 [97,6] 1 [97,7] 1 [97,8] 1 [97,9] 1 [97,10] 1 [97,11] 1
[97,12] 1 [97,13] 1 [97,14] 1 [97,15] 1 [97,16] 1 [97,17] 1
[97,18] 1 [97,19] 1 [97,20] 1 [98,0] 1 [98,1] 1 [98,2] 1 [98,3] 1
[98,4] 1 [98,5] 1 [98,6] 1 [98,7] 1 [98,8] 1 [98,9] 1 [98,10] 1
[98,11] 1 [98,12] 1 [98,13] 1 [98,14] 1 [98,15] 1 [98,16] 1
[98,17] 1 [98,18] 1 [98,19] 1 [98,20] 1 [99,0] 1 [99,1] 1 [99,2] 1
[99,3] 1 [99,4] 1 [99,5] 1 [99,6] 1 [99,7] 1 [99,8] 1 [99,9] 1
[99,10] 1 [99,11] 1 [99,12] 1 [99,13] 1 [99,14] 1 [99,15] 1
[99,16] 1 [99,17] 1 [99,18] 1 [99,19] 1 [99,20] 1 [100,0] 1
[100,1] 1 [100,2] 1 [100,3] 1 [100,4] 1 [100,5] 1 [100,6] 1
[100,7] 1 [100,8] 1 [100,9] 1 [100,10] 1 [100,11] 1 [100,12] 1
[100,13] 1 [100,14] 1 [100,15] 1 [100,16] 1 [100,17] 1 [100,18] 1
[100,19] 1 [100,20] 1 [101,0] 1 [101,1] 1 [101,2] 1 [101,3] 1
[101,4] 1 [101,5] 1 [101,6] 1 [101,7] 1 [101,8] 1 [101,9] 1
[101,10] 1 [101,11] 1 [101,12] 1 [101,13] 1 [101,14] 1 [101,15] 1
[101,16] 1 [101,17] 1 [101,18] 1 [101,19] 1 [101,20] 1 [102,0] 1
[102,1] 1 [102,2] 1 [102,3] 1 [102,4] 1 [102,5] 1 [102,6] 1
[102,7] 1 [102,8] 1 [102,9] 1 [102,10] 1 [102,11] 1 [102,12] 1
[102,13] 1 [102,14] 1 [102,15] 1 [102,16] 1 [102,17] 1 [102,18] 1
[102,19] 1 [102,20] 1 [103,0] 1 [103,1] 1 [103,2] 1 [103,3] 1
[103,4] 1 [103,5] 1 [103,6] 1 [103,7] 1 [103,8] 1 [103,9] 1
[103,10] 1 [103,11] 1 [103,12] 1 [103,13] 1 [103,14] 1 [103,15] 1
[103,16] 1 [103,17] 1 [103,18] 1 [103,19] 1 [103,20] 1 [104,0] 1
[104,1] 1 [104,2] 1 [104,3] 1 [104,4] 1 [104,5] 1 [104,6] 1
[104,7] 1 [104,8] 1 [104,9] 1 [104,10] 1 [104,11] 1 [104,12] 1
[104,13] 1 [104,14] 1 [104,15] 1 [104,16] 1 [104,17] 1 [104,18] 1
[104,19] 1 [104,20] 1 ;

param b_m0 default 1 := 18 0 19 0 20 0 21 0 22 0 23 0 24 0 25 0 ;

param b_q0 default 0 :=
[1,1] 1 [2,1] 1 [3,1] 1 [4,1] 1 [5,1] 1 [6,1] 1 [7,1] 1 [8,1] 1
[9,1] 1 [10,1] 1 [11,2] 1 [12,2] 1 [13,3] 1 [14,3] 1 [15,3] 1
[16,3] 1 [17,3] 1 [25,3] 1 ;

param b_v default 1 :=
1 0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9 0 10 0 11 0 12 0 13 0 14 0 15 0
16 0 17 0 18 0 19 0 20 0 21 0 22 0 23 0 24 0 25 0 26 0 27 0 28 0
29 0 30 0 ;

param b_w default 1 ;

param c_me := 4000 ;

param c_mr := 5000 ;

param c_k default 0 :=
```

```

48 150 49 140 50 160 51 135 52 138 53 125 54 128 55 150 56 152
57 155 58 120 59 125 60 129 61 144 62 160 63 162 64 128 86 88
87 16 88 77 89 55 90 35 91 190 92 166 93 44 94 28 95 50 96 122
97 48 98 47 99 29 100 49 101 488 102 58 103 54 104 22 ;

param c_l default 1 :=
1 3 2 3 3 3 4 3 5 3 6 3 7 3 8 3 9 3 10 3 11 3 12 3 13 3 14 3 15 3
16 3 17 3 18 3 19 3 20 3 21 3 22 3 23 3 24 3 25 3 26 3 27 3 28 3
29 3 30 3 65 0.5 66 0.5 67 0.5 68 0.5 69 0.5 70 0.5 71 0.5 72 0.5
73 0.5 74 0.5 75 0.5 76 0.5 77 0.5 78 0.5 79 0.5 80 0.5 81 0.5
82 0.5 83 0.5 84 0.5 85 0.5 86 0.5 87 0.5 88 0.5 89 0.5 90 0.5
91 0.5 92 0.5 93 0.5 94 0.5 95 0.5 96 0.5 97 0.5 98 0.5 99 0.5
100 0.5 101 0.5 102 0.5 103 0.5 104 0.5 ;

param c_m default 2000 :=
13 3000 14 3000 15 3000 16 3000 17 3000 25 3000 ;

param c_p := 1 500 2 150 4 150 ;

param c_r := 1 1000 2 250 4 250 ;

param c_u default 500 := 13 800 14 800 15 800 16 800 17 800 25 800 ;

param c_v default 0 :=
1 50 2 50 3 50 4 50 5 50 6 50 7 50 8 50 9 50 10 50 11 50 12 50 13
50 14 50 15 50 16 50 17 50 18 50 19 50 20 50 21 50 22 50 23 50 24
50 25 50 26 50 27 50 28 50 29 50 30 50 ;

param c_z := 0.00539 ;

param n_b default 0 :=
[3,1] 100 [10,1] 30 [1,1] 15 [11,2] 80 [2,2] 20 [21,3] 150
[6,3] 10 [4,4] 22 [5,5] 30 [12,6] 400 [13,7] 40 [22,7] 15
[28,8] 22 [29,8] 22 [21,10] 250 [9,11] 17 [8,11] 17 [10,14] 700
[18,14] 70 [11,16] 500 [10,18] 300 [10,20] 120 [23,21] 22
[24,21] 22 [10,24] 850 [18,24] 50 [11,26] 550 [10,28] 380
[10,30] 200 ;

param n_tb default 0 :=
# Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
[31,1] 1 [31,2] 1 [31,3] 1 [31,4] 1 [32,5] 1 [32,6] 1 [32,7] 1
[33,8] 1 [33,9] 1 [33,10] 1 [34,11] 1 [34,12] 1 [35,13] 1
[35,14] 1 [36,15] 1 [36,16] 1 [37,17] 1 [37,18] 1 [38,19] 1
[38,20] 1 [39,21] 1 [39,22] 1 [40,23] 1 [41,24] 1 [42,25] 1
[43,26] 1 [44,27] 1 [45,28] 1 [46,29] 1 [47,30] 1
# Anbauteile Eigenfertigung
[65,1] 1 [66,1] 1 [73,1] 1 [76,1] 1 [81,1] 1 [83,1] 1 [84,1] 1
[85,1] 1 [65,2] 1 [66,2] 1 [73,2] 1 [77,2] 1 [81,2] 1 [66,3] 1
[73,3] 1 [78,3] 1 [82,3] 1 [65,4] 1 [66,4] 1 [74,4] 1 [76,4] 1
[81,4] 1 [83,4] 1 [84,4] 1 [85,4] 1 [65,5] 1 [66,5] 1 [74,5] 1
[77,5] 1 [81,5] 1 [66,6] 1 [74,6] 1 [78,6] 1 [82,6] 1 [65,7] 1
[67,7] 1 [73,7] 1 [77,7] 1 [81,7] 1 [65,8] 1 [67,8] 1 [73,8] 1
[78,8] 1 [82,8] 1 [65,9] 1 [67,9] 1 [74,9] 1 [77,9] 1 [81,9] 1
[65,10] 1 [67,10] 1 [74,10] 1 [78,10] 1 [82,10] 1 [65,11] 1
[67,11] 1 [74,11] 1 [77,11] 1 [81,11] 1 [65,12] 1 [67,12] 1
[74,12] 1 [78,12] 1 [82,12] 1 [65,13] 1 [68,13] 1 [75,13] 1
[77,13] 1 [81,13] 1 [65,14] 1 [68,14] 1 [75,14] 1 [78,14] 1
[82,14] 1 [65,15] 1 [68,15] 1 [73,15] 1 [77,15] 1 [81,15] 1

```

```
[65,16] 1 [68,16] 1 [73,16] 1 [78,16] 1 [82,16] 1 [65,17] 1
[69,17] 1 [73,17] 1 [77,17] 1 [81,17] 1 [65,18] 1 [69,18] 1
[73,18] 1 [78,18] 1 [82,18] 1 [65,19] 1 [70,19] 1 [74,19] 1
[77,19] 1 [81,19] 1 [65,20] 1 [70,20] 1 [74,20] 1 [78,20] 1
[82,20] 1 [65,21] 1 [70,21] 1 [75,21] 1 [77,21] 1 [81,21] 1
[65,22] 1 [70,22] 1 [75,22] 1 [78,22] 1 [82,22] 1 [65,23] 1
[70,23] 1 [75,23] 1 [77,23] 1 [81,23] 1 [65,24] 1 [70,24] 1
[75,24] 1 [78,24] 1 [82,24] 1 [71,25] 1 [75,25] 1 [78,25] 1
[82,25] 1 [83,25] 1 [84,25] 1 [71,26] 1 [74,26] 1 [78,26] 1
[82,26] 1 [83,26] 1 [84,26] 1 [71,27] 1 [74,27] 1 [78,27] 1
[82,27] 1 [83,27] 1 [84,27] 1 [71,28] 1 [74,28] 1 [78,28] 1
[82,28] 1 [83,28] 1 [84,28] 1 [65,29] 1 [71,29] 1 [74,29] 1
[78,29] 1 [82,29] 1 [83,29] 1 [84,29] 1 [72,30] 1 [74,30] 1
[78,30] 1 [82,30] 1 [83,30] 1 [84,30] 1
```

```
# Anbauteile Fremdfertigung
```

```
[86,1] 1 [87,1] 1 [91,1] 1 [96,1] 1 [103,1] 1 [104,1] 1 [88,2] 1
[91,2] 1 [96,2] 1 [89,3] 1 [91,3] 1 [96,3] 1 [86,4] 1 [87,4] 1
[92,4] 1 [97,4] 1 [103,4] 1 [104,4] 1 [88,5] 1 [92,5] 1 [97,5] 1
[89,6] 1 [92,6] 1 [97,6] 1 [88,7] 1 [91,7] 1 [96,7] 1 [89,8] 1
[91,8] 1 [96,8] 1 [88,9] 1 [93,9] 1 [98,9] 1 [89,10] 1 [93,10] 1
[98,10] 1 [88,11] 1 [94,11] 1 [99,11] 1 [89,12] 1 [94,12] 1
[99,12] 1 [88,13] 1 [91,13] 1 [96,13] 1 [89,14] 1 [91,14] 1
[96,14] 1 [88,15] 1 [91,15] 1 [96,15] 1 [89,16] 1 [91,16] 1
[96,16] 1 [88,17] 1 [91,17] 1 [96,17] 1 [89,18] 1 [91,18] 1
[96,18] 1 [88,19] 1 [93,19] 1 [98,19] 1 [89,20] 1 [93,20] 1
[98,20] 1 [88,21] 1 [94,21] 1 [99,21] 1 [89,22] 1 [94,22] 1
[99,22] 1 [88,23] 1 [92,23] 1 [97,23] 1 [89,24] 1 [92,24] 1
[97,24] 1 [89,25] 1 [90,25] 1 [95,25] 1 [100,25] 1 [101,25] 1
[102,25] 1 [89,26] 1 [90,26] 1 [95,26] 1 [100,26] 1 [102,26] 1
[89,27] 1 [90,27] 1 [95,27] 1 [100,27] 1 [102,27] 1 [89,28] 1
[90,28] 1 [95,28] 1 [100,28] 1 [102,28] 1 [89,29] 1 [90,29] 1
[95,29] 1 [100,29] 1 [102,29] 1 [89,30] 1 [90,30] 1 [95,30] 1
[100,30] 1 [101,30] 1 [102,30] 1 ;
```

```
param n_te default 0 :=
```

```
# Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
[1,1] 1 [2,2] 1 [3,3] 1 [4,4] 1 [5,5] 1 [6,6] 1 [7,7] 1 [8,8] 1
[9,9] 1 [10,10] 1 [11,11] 1 [12,12] 1 [13,13] 1 [14,14] 1
[15,15] 1 [16,16] 1 [17,17] 1 [18,18] 1 [19,19] 1 [20,20] 1
[21,21] 1 [22,22] 1 [23,23] 1 [24,24] 1 [25,25] 1 [26,26] 1
[27,27] 1 [28,28] 1 [29,29] 1 [30,30] 1
```

```
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[31,61] 1 [32,62] 1 [33,63] 1 [34,64] 1 [35,65] 1 [36,66] 1
[37,67] 1 [38,68] 1 [39,69] 1 [40,70] 1 [41,71] 1 [42,72] 1
[43,73] 1 [44,74] 1 [45,75] 1 [46,76] 1 [47,77] 1
```

```
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[31,95] 1 [32,96] 1 [33,97] 1 [34,98] 1 [35,99] 1 [36,100] 1
[37,101] 1 [38,102] 1 [39,103] 1 [40,104] 1 [41,105] 1 [42,106] 1
[43,107] 1 [44,108] 1 [45,109] 1 [46,110] 1 [47,111] 1
```

```
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[65,112] 1 [66,113] 1 [67,114] 1 [68,115] 1 [69,116] 1 [70,117] 1
[71,118] 1 [72,119] 1 [73,120] 1 [74,121] 1 [75,122] 1 [76,123] 1
[77,124] 1 [78,125] 1 [79,126] 1 [80,127] 1 [81,128] 1 [82,129] 1
[83,130] 1 [84,131] 1 [85,132] 1
```

```
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[65,148] 1 [66,149] 1 [67,150] 1 [68,151] 1 [69,152] 1 [70,153] 1
[71,154] 1 [72,155] 1 [73,156] 1 [74,157] 1 [75,158] 1 [76,159] 1
[77,160] 1 [78,161] 1 ;
```

```
param t_kw default 42 : 0 := 1 0 2 0 4 0 ;

param t_rt default 0 :=
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[61,2] 0.125 [62,2] 0.125 [63,2] 0.125 [64,2] 0.125 [65,2] 0.125
[66,2] 0.125 [67,2] 0.125 [68,2] 0.125 [69,2] 0.125 [70,2] 0.125
[71,2] 0.125 [72,2] 0.125 [73,2] 0.125 [74,2] 0.125 [75,2] 0.125
[76,2] 0.125 [77,2] 0.125
# Fertigung Ventilgrundkörper auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[95,4] 0.1 [96,4] 0.1 [97,4] 0.1 [98,4] 0.1 [99,4] 0.1 [100,4] 0.1
[101,4] 0.1 [102,4] 0.1 [103,4] 0.1 [104,4] 0.1 [105,4] 0.1
[106,4] 0.1 [107,4] 0.1 [108,4] 0.1 [109,4] 0.1 [110,4] 0.1
[111,4] 0.1
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[112,2] 0.125 [113,2] 0.125 [114,2] 0.125 [115,2] 0.125
[116,2] 0.125 [117,2] 0.125 [118,2] 0.125 [119,2] 0.125
[120,2] 0.125 [121,2] 0.125 [122,2] 0.125 [123,2] 0.125
[124,2] 0.125 [125,2] 0.125 [126,2] 0.125 [127,2] 0.125
[128,2] 0.125 [129,2] 0.125 [130,2] 0.125 [131,2] 0.125
[132,2] 0.125
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[148,4] 0.1 [149,4] 0.1 [150,4] 0.1 [151,4] 0.1 [152,4] 0.1
[153,4] 0.1 [154,4] 0.1 [155,4] 0.1 [156,4] 0.1 [157,4] 0.1
[158,4] 0.1 [159,4] 0.1 [160,4] 0.1 [161,4] 0.1 ;

param t_tw default 0 :=
# Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
[1,1] 0.0625 [2,1] 0.0625 [3,1] 0.0625 [4,1] 0.0625 [5,1] 0.0625
[6,1] 0.0625 [7,1] 0.0625 [8,1] 0.0625 [9,1] 0.0625 [10,1] 0.0625
[11,1] 0.0625 [12,1] 0.0625 [13,1] 0.0625 [14,1] 0.0625
[15,1] 0.0625 [16,1] 0.0625 [17,1] 0.0625 [18,1] 0.0625
[19,1] 0.0625 [20,1] 0.0625 [21,1] 0.0625 [22,1] 0.0625
[23,1] 0.0625 [24,1] 0.0625 [25,1] 0.0625 [26,1] 0.0625
[27,1] 0.0625 [28,1] 0.0625 [29,1] 0.0625 [30,1] 0.0625
# Fertigung Ventilgrundkörper auf erstem Bearbeitungszentrum
[61,2] 0.04 [62,2] 0.04 [63,2] 0.04 [64,2] 0.04 [65,2] 0.04
[66,2] 0.04 [67,2] 0.04 [68,2] 0.04 [69,2] 0.04 [70,2] 0.04
[71,2] 0.04 [72,2] 0.04 [73,2] 0.04 [74,2] 0.04 [75,2] 0.04
[76,2] 0.04 [77,2] 0.04
# Fertigung Ventilgrundkörper auf drittem Bearbeitungszentrum
[95,4] 0.05 [96,4] 0.05 [97,4] 0.05 [98,4] 0.05 [99,4] 0.05
[100,4] 0.05 [101,4] 0.05 [102,4] 0.05 [103,4] 0.05 [104,4] 0.05
[105,4] 0.05 [106,4] 0.05 [107,4] 0.05 [108,4] 0.05 [109,4] 0.05
[110,4] 0.05 [111,4] 0.05
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[112,2] 0.008 [113,2] 0.008 [114,2] 0.008 [115,2] 0.008
[116,2] 0.008 [117,2] 0.008 [118,2] 0.005 [119,2] 0.005
[120,2] 0.005 [121,2] 0.005 [122,2] 0.005 [123,2] 0.006
[124,2] 0.006 [125,2] 0.006 [126,2] 0.006 [127,2] 0.006
[128,2] 0.015 [129,2] 0.015 [130,2] 0.015 [131,2] 0.015
[132,2] 0.015
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[148,4] 0.01 [149,4] 0.01 [150,4] 0.01 [151,4] 0.01 [152,4] 0.01
[153,4] 0.01 [154,4] 0.01 [155,4] 0.01 [156,4] 0.004 [157,4] 0.004
[158,4] 0.004 [159,4] 0.005 [160,4] 0.009 [161,4] 0.006 ;

param t_tq default 0 :=
```

```
# Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
[1,1] 0.3125 [2,1] 0.3125 [3,1] 0.3125 [4,1] 0.3125 [5,1] 0.3125
[6,1] 0.3125 [7,1] 0.3125 [8,1] 0.3125 [9,1] 0.3125 [10,1] 0.3125
[11,1] 0.3125 [12,1] 0.3125 [13,1] 0.3125 [14,1] 0.3125
[15,1] 0.3125 [16,1] 0.3125 [17,1] 0.3125 [18,1] 0.3125
[19,1] 0.3125 [20,1] 0.3125 [21,1] 0.3125 [22,1] 0.3125
[23,1] 0.3125 [24,1] 0.3125 [25,1] 0.3125 [26,1] 0.3125
[27,1] 0.3125 [28,1] 0.3125 [29,1] 0.3125 [30,1] 0.3125
# Fertigung Ventilgrundkörper auf erstem Bearbeitungszentrum
[61,2] 0.03 [62,2] 0.03 [63,2] 0.03 [64,2] 0.03 [65,2] 0.03
[66,2] 0.03 [67,2] 0.03 [68,2] 0.03 [69,2] 0.03 [70,2] 0.03
[71,2] 0.03 [72,2] 0.03 [73,2] 0.03 [74,2] 0.03 [75,2] 0.03
[76,2] 0.03 [77,2] 0.03
# Fertigung Ventilgrundkörper auf drittem Bearbeitungszentrum
[95,2] 0.0325 [96,2] 0.0325 [97,2] 0.0325 [98,2] 0.0325
[99,2] 0.0325 [100,2] 0.0325 [101,2] 0.0325 [102,2] 0.0325
[103,2] 0.0325 [104,2] 0.0325 [105,2] 0.0325 [106,2] 0.0325
[107,2] 0.0325 [108,2] 0.0325 [109,2] 0.0325 [110,2] 0.0325
[111,2] 0.0325
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[112,2] 0.006 [113,2] 0.006 [114,2] 0.006 [115,2] 0.006
[116,2] 0.006 [117,2] 0.006 [118,2] 0.00325 [119,2] 0.00325
[120,2] 0.00325 [121,2] 0.00325 [122,2] 0.00325 [123,2] 0.0045
[124,2] 0.0045 [125,2] 0.0045 [126,2] 0.0045 [127,2] 0.0045
[128,2] 0.01125 [129,2] 0.01125 [130,2] 0.01125 [131,2] 0.01125
[132,2] 0.01125
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[148,2] 0.0075 [149,2] 0.0075 [150,2] 0.0075 [151,2] 0.0075
[152,2] 0.0075 [153,2] 0.0075 [154,2] 0.0075 [155,2] 0.0075
[156,2] 0.003 [157,2] 0.003 [158,2] 0.003 [159,2] 0.00325
[160,2] 0.00675 [161,2] 0.0045
# Fertigung Ventilgrundkörper auf erstem Bearbeitungszentrum
[61,3] 0.04 [62,3] 0.04 [63,3] 0.04 [64,3] 0.04 [65,3] 0.04
[66,3] 0.04 [67,3] 0.04 [68,3] 0.04 [69,3] 0.04 [70,3] 0.04
[71,3] 0.04 [72,3] 0.04 [73,3] 0.04 [74,3] 0.04 [75,3] 0.04
[76,3] 0.04 [77,3] 0.04
# Fertigung Ventilgrundkörper auf drittem Bearbeitungszentrum
[95,3] 0.05 [96,3] 0.05 [97,3] 0.05 [98,3] 0.05 [99,3] 0.05
[100,3] 0.05 [101,3] 0.05 [102,3] 0.05 [103,3] 0.05 [104,3] 0.05
[105,3] 0.05 [106,3] 0.05 [107,3] 0.05 [108,3] 0.05 [109,3] 0.05
[110,3] 0.05 [111,3] 0.05
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[112,3] 0.008 [113,3] 0.008 [114,3] 0.008 [115,3] 0.008
[116,3] 0.008 [117,3] 0.008 [118,3] 0.005 [119,3] 0.005
[120,3] 0.005 [121,3] 0.005 [122,3] 0.005 [123,3] 0.006
[124,3] 0.006 [125,3] 0.006 [126,3] 0.006 [127,3] 0.006
[128,3] 0.015 [129,3] 0.015 [130,3] 0.015 [131,3] 0.015
[132,3] 0.015
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[148,3] 0.01 [149,3] 0.01 [150,3] 0.01 [151,3] 0.01 [152,3] 0.01
[153,3] 0.01 [154,3] 0.01 [155,3] 0.01 [156,3] 0.004 [157,3] 0.004
[158,3] 0.004 [159,3] 0.005 [160,3] 0.009 [161,3] 0.006 ;

param n_uMax := 1.25;

param t_l := 1 10 2 5 3 1000 ;

param t_m default 8 ;
```

```
param c_q := 1 2000 2 1000 3 10000 ;
```

A.3 Partialmodell III

```
set E :=
  # Ventilgruppen
  1 2 3 6 10 11 21
  # Ventilgrundkörper
  31 32 33 34 39
  # Anbauteile
  65 66 67 70 73 74 75 76 77 78 81 82 83 84 85 86 87 88 89 91 92 93
  94 96 97 98 99 103 104 ;
```

```
set P :=
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
  25 26 27 28 29 30 ;
```

```
set PA := 0 ;
```

```
set S :=
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
  25 26 27 28 29 30 ;
```

```
set T :=
  1 2 3 6 10 11 21 61 62 63 64 69 95 96 97 98 103 112 113 114 117
  120 121 122 123 124 125 128 129 130 131 132 148 149 150 153 156
  157 158 159 160 161 ;
```

```
set W := 1 2 4 ;
```

```
param:      pi      ny      :=
           0         0         0
           1         1         0
           2         2         1
           3         3         2
           4         4         3
           5         5         4
           6         6         5
           7         7         6
           8         8         7
           9         9         8
          10        10         9
          11        11        10
          12        12        11
          13        13        12
          14        14        13
          15        15        14
          16        16        15
          17        17        16
          18        18        17
          19        19        18
          20        20        19
          21        21        20
          22        22        21
          23        23        22
          24        24        23
          25        25        24
```

```
26 26 25
27 27 26
28 28 27
29 29 28
30 30 29 ;
```

```
param omega default 1 ;
```

```
param a_w_max := 0.9;
```

```
param big_m := 1000 ;
```

```
param c_z := 0.00054;
```

```
param p_min := 0.95;
```

```
param t_bz := 5 ;
```

```
param t_lmax := 5 ;
```

```
param a_w default 0 :=
```

```
[1,1] 0.90625 [1,2] 0.90625 [1,3] 0.90625 [1,4] 0.90625
[1,5] 0.90625 [1,6] 0.90625 [1,7] 0.90625 [1,8] 0.90625
[1,9] 0.90625 [1,10] 0.90625 [1,11] 0.625 [1,12] 0.625
[1,13] 0.625 [1,14] 0.625 [1,15] 0.625 [1,16] 0.625 [1,17] 0.625
[1,18] 0.625 [1,19] 0.625 [1,20] 0.625 [1,21] 1 [1,22] 1 [1,23] 1
[1,24] 1 [1,25] 1 [1,26] 1 [1,27] 1 [1,28] 1 [1,29] 1 [1,30] 1
[2,1] 0.99999 [2,2] 0.99999 [2,3] 0.99999 [2,4] 0.99999
[2,5] 0.99999 [2,6] 0.99999 [2,7] 0.99999 [2,8] 0.99999
[2,9] 0.99999 [2,10] 0.99999 [2,11] 0.9455 [2,12] 0.9455
[2,13] 0.9455 [2,14] 0.9455 [2,15] 0.9455 [2,16] 0.9455
[2,17] 0.9455 [2,18] 0.9455 [2,19] 0.9455 [2,20] 0.9455 [2,21] 1
[2,22] 1 [2,23] 1 [2,24] 1 [2,25] 1 [2,26] 1 [2,27] 1 [2,28] 1
[2,29] 1 [2,30] 1 [4,1] 0.70387 [4,2] 0.70387 [4,3] 0.70387
[4,4] 0.70387 [4,5] 0.70387 [4,6] 0.70387 [4,7] 0.70387
[4,8] 0.70387 [4,9] 0.70387 [4,10] 0.70387 [4,11] 0.19 [4,12] 0.19
[4,13] 0.19 [4,14] 0.19 [4,15] 0.19 [4,16] 0.19 [4,17] 0.19
[4,18] 0.19 [4,19] 0.19 [4,20] 0.19 [4,21] 0.39 [4,22] 0.39
[4,23] 0.39 [4,24] 0.39 [4,25] 0.39 [4,26] 0.39 [4,27] 0.39
[4,28] 0.39 [4,29] 0.39 [4,30] 0.39 ;
```

```
param b_b default 0 :=
```

```
1 1 2 1 3 1 6 1 10 1 11 1 21 1 ;
```

```
param b_k default 0 :=
```

```
[86,0] 1 [86,1] 1 [86,2] 1 [86,3] 1 [86,4] 1 [86,5] 1 [86,6] 1
[86,7] 1 [86,8] 1 [86,9] 1 [86,10] 1 [86,11] 1 [86,12] 1 [86,13] 1
[86,14] 1 [86,15] 1 [86,16] 1 [86,17] 1 [86,18] 1 [86,19] 1
[86,20] 1 [86,21] 1 [86,22] 1 [86,23] 1 [86,24] 1 [86,25] 1
[86,26] 1 [86,27] 1 [86,28] 1 [86,29] 1 [86,30] 1 [87,0] 1
[87,1] 1 [87,2] 1 [87,3] 1 [87,4] 1 [87,5] 1 [87,6] 1 [87,7] 1
[87,8] 1 [87,9] 1 [87,10] 1 [87,11] 1 [87,12] 1 [87,13] 1
[87,14] 1 [87,15] 1 [87,16] 1 [87,17] 1 [87,18] 1 [87,19] 1
[87,20] 1 [87,21] 1 [87,22] 1 [87,23] 1 [87,24] 1 [87,25] 1
[87,26] 1 [87,27] 1 [87,28] 1 [87,29] 1 [87,30] 1 [88,0] 1
[88,1] 1 [88,2] 1 [88,3] 1 [88,4] 1 [88,5] 1 [88,6] 1 [88,7] 1
[88,8] 1 [88,9] 1 [88,10] 1 [88,11] 1 [88,12] 1 [88,13] 1
[88,14] 1 [88,15] 1 [88,16] 1 [88,17] 1 [88,18] 1 [88,19] 1
```

[88,20] 1 [88,21] 1 [88,22] 1 [88,23] 1 [88,24] 1 [88,25] 1
[88,26] 1 [88,27] 1 [88,28] 1 [88,29] 1 [88,30] 1 [89,0] 1
[89,1] 1 [89,2] 1 [89,3] 1 [89,4] 1 [89,5] 1 [89,6] 1 [89,7] 1
[89,8] 1 [89,9] 1 [89,10] 1 [89,11] 1 [89,12] 1 [89,13] 1
[89,14] 1 [89,15] 1 [89,16] 1 [89,17] 1 [89,18] 1 [89,19] 1
[89,20] 1 [89,21] 1 [89,22] 1 [89,23] 1 [89,24] 1 [89,25] 1
[89,26] 1 [89,27] 1 [89,28] 1 [89,29] 1 [89,30] 1 [91,0] 1
[91,1] 1 [91,2] 1 [91,3] 1 [91,4] 1 [91,5] 1 [91,6] 1 [91,7] 1
[91,8] 1 [91,9] 1 [91,10] 1 [91,11] 1 [91,12] 1 [91,13] 1
[91,14] 1 [91,15] 1 [91,16] 1 [91,17] 1 [91,18] 1 [91,19] 1
[91,20] 1 [91,21] 1 [91,22] 1 [91,23] 1 [91,24] 1 [91,25] 1
[91,26] 1 [91,27] 1 [91,28] 1 [91,29] 1 [91,30] 1 [92,0] 1
[92,1] 1 [92,2] 1 [92,3] 1 [92,4] 1 [92,5] 1 [92,6] 1 [92,7] 1
[92,8] 1 [92,9] 1 [92,10] 1 [92,11] 1 [92,12] 1 [92,13] 1
[92,14] 1 [92,15] 1 [92,16] 1 [92,17] 1 [92,18] 1 [92,19] 1
[92,20] 1 [92,21] 1 [92,22] 1 [92,23] 1 [92,24] 1 [92,25] 1
[92,26] 1 [92,27] 1 [92,28] 1 [92,29] 1 [92,30] 1 [93,0] 1
[93,1] 1 [93,2] 1 [93,3] 1 [93,4] 1 [93,5] 1 [93,6] 1 [93,7] 1
[93,8] 1 [93,9] 1 [93,10] 1 [93,11] 1 [93,12] 1 [93,13] 1
[93,14] 1 [93,15] 1 [93,16] 1 [93,17] 1 [93,18] 1 [93,19] 1
[93,20] 1 [93,21] 1 [93,22] 1 [93,23] 1 [93,24] 1 [93,25] 1
[93,26] 1 [93,27] 1 [93,28] 1 [93,29] 1 [93,30] 1 [94,0] 1
[94,1] 1 [94,2] 1 [94,3] 1 [94,4] 1 [94,5] 1 [94,6] 1 [94,7] 1
[94,8] 1 [94,9] 1 [94,10] 1 [94,11] 1 [94,12] 1 [94,13] 1
[94,14] 1 [94,15] 1 [94,16] 1 [94,17] 1 [94,18] 1 [94,19] 1
[94,20] 1 [94,21] 1 [94,22] 1 [94,23] 1 [94,24] 1 [94,25] 1
[94,26] 1 [94,27] 1 [94,28] 1 [94,29] 1 [94,30] 1 [96,0] 1
[96,1] 1 [96,2] 1 [96,3] 1 [96,4] 1 [96,5] 1 [96,6] 1 [96,7] 1
[96,8] 1 [96,9] 1 [96,10] 1 [96,11] 1 [96,12] 1 [96,13] 1
[96,14] 1 [96,15] 1 [96,16] 1 [96,17] 1 [96,18] 1 [96,19] 1
[96,20] 1 [96,21] 1 [96,22] 1 [96,23] 1 [96,24] 1 [96,25] 1
[96,26] 1 [96,27] 1 [96,28] 1 [96,29] 1 [96,30] 1 [97,0] 1
[97,1] 1 [97,2] 1 [97,3] 1 [97,4] 1 [97,5] 1 [97,6] 1 [97,7] 1
[97,8] 1 [97,9] 1 [97,10] 1 [97,11] 1 [97,12] 1 [97,13] 1
[97,14] 1 [97,15] 1 [97,16] 1 [97,17] 1 [97,18] 1 [97,19] 1
[97,20] 1 [97,21] 1 [97,22] 1 [97,23] 1 [97,24] 1 [97,25] 1
[97,26] 1 [97,27] 1 [97,28] 1 [97,29] 1 [97,30] 1 [98,0] 1
[98,1] 1 [98,2] 1 [98,3] 1 [98,4] 1 [98,5] 1 [98,6] 1 [98,7] 1
[98,8] 1 [98,9] 1 [98,10] 1 [98,11] 1 [98,12] 1 [98,13] 1
[98,14] 1 [98,15] 1 [98,16] 1 [98,17] 1 [98,18] 1 [98,19] 1
[98,20] 1 [98,21] 1 [98,22] 1 [98,23] 1 [98,24] 1 [98,25] 1
[98,26] 1 [98,27] 1 [98,28] 1 [98,29] 1 [98,30] 1 [99,0] 1
[99,1] 1 [99,2] 1 [99,3] 1 [99,4] 1 [99,5] 1 [99,6] 1 [99,7] 1
[99,8] 1 [99,9] 1 [99,10] 1 [99,11] 1 [99,12] 1 [99,13] 1
[99,14] 1 [99,15] 1 [99,16] 1 [99,17] 1 [99,18] 1 [99,19] 1
[99,20] 1 [99,21] 1 [99,22] 1 [99,23] 1 [99,24] 1 [99,25] 1
[99,26] 1 [99,27] 1 [99,28] 1 [99,29] 1 [99,30] 1 [103,0] 1
[103,1] 1 [103,2] 1 [103,3] 1 [103,4] 1 [103,5] 1 [103,6] 1
[103,7] 1 [103,8] 1 [103,9] 1 [103,10] 1 [103,11] 1 [103,12] 1
[103,13] 1 [103,14] 1 [103,15] 1 [103,16] 1 [103,17] 1 [103,18] 1
[103,19] 1 [103,20] 1 [103,21] 1 [103,22] 1 [103,23] 1 [103,24] 1
[103,25] 1 [103,26] 1 [103,27] 1 [103,28] 1 [103,29] 1 [103,30] 1
[104,0] 1 [104,1] 1 [104,2] 1 [104,3] 1 [104,4] 1 [104,5] 1
[104,6] 1 [104,7] 1 [104,8] 1 [104,9] 1 [104,10] 1 [104,11] 1
[104,12] 1 [104,13] 1 [104,14] 1 [104,15] 1 [104,16] 1 [104,17] 1
[104,18] 1 [104,19] 1 [104,20] 1 [104,21] 1 [104,22] 1 [104,23] 1
[104,24] 1 [104,25] 1 [104,26] 1 [104,27] 1 [104,28] 1 [104,29] 1
[104,30] 1 ;

```
param b_p default 1 ;

param b_pn default 1 ;

param c_l default 1 :=
  1 0.15 2 0.15 3 0.15 6 0.15 10 0.15 11 0.15 21 0.15 65 0.025
  66 0.025 67 0.025 70 0.025 73 0.025 74 0.025 75 0.025 76 0.025
  77 0.025 78 0.025 81 0.025 82 0.025 83 0.025 84 0.025 85 0.025
  86 0.025 87 0.025 88 0.025 89 0.025 91 0.025 92 0.5 93 0.025
  94 0.025 96 0.025 97 0.025 98 0.025 99 0.025 103 0.025 104 0.5;

param g default 0 :=
  [31,1] 1 [31,2] 1 [31,3] 1 [32,6] 1 [33,10] 1 [34,11] 1 [39,21] 1
  [65,1] 1 [65,2] 1 [65,10] 1 [65,11] 1 [65,21] 1 [66,1] 1 [66,2] 1
  [66,3] 1 [66,6] 1 [67,10] 1 [67,11] 1 [70,21] 1 [73,1] 1 [73,2] 1
  [73,3] 1 [74,6] 1 [74,10] 1 [74,11] 1 [75,21] 1 [76,1] 1 [77,2] 1
  [77,11] 1 [77,21] 1 [78,3] 1 [78,6] 1 [78,10] 1 [81,1] 1 [81,2] 1
  [81,11] 1 [81,21] 1 [82,3] 1 [82,6] 1 [82,10] 1 [83,1] 1 [84,1] 1
  [85,1] 1 [86,1] 1 [87,1] 1 [88,2] 1 [88,11] 1 [88,21] 1 [89,3] 1
  [89,6] 1 [89,10] 1 [91,1] 1 [91,2] 1 [91,3] 1 [92,6] 1 [93,10] 1
  [94,11] 1 [94,21] 1 [96,1] 1 [96,2] 1 [96,3] 1 [97,6] 1 [98,10] 1
  [99,11] 1 [99,21] 1 [103,1] 1 [104,1] 1 ;

param n_b default 0 :=
  [3,5] 40 [3,10] 60 [10,8] 30 [1,6] 15 [11,13] 30 [11,20] 50
  [2,17] 20 [21,23] 50 [21,27] 50 [21,30] 50 [6,28] 10 ;

param n_ges default 0 :=
  [1,6] 15 [2,17] 20 [3,5] 40 [3,10] 60 [6,28] 10 [10,8] 30
  [11,13] 30 [11,20] 50 [21,23] 50 [21,27] 50 [21,30] 50 [31,5] 40
  [31,6] 15 [31,10] 60 [31,17] 20 [32,28] 10 [33,8] 30 [34,13] 30
  [34,20] 50 [39,23] 50 [39,27] 50 [39,30] 50 [65,6] 30 [65,8] 60
  [65,13] 60 [65,17] 40 [65,20] 100 [65,23] 100 [65,27] 100
  [65,30] 100 [66,5] 80 [66,6] 30 [66,10] 120 [66,17] 40 [66,28] 20
  [67,8] 60 [67,13] 60 [67,20] 100 [70,23] 100 [70,27] 100
  [70,30] 100 [73,5] 80 [73,6] 30 [73,10] 120 [73,17] 40 [74,8] 60
  [74,13] 60 [74,20] 100 [74,28] 20 [75,23] 100 [75,27] 100
  [75,30] 100 [76,6] 30 [77,13] 60 [77,17] 40 [77,20] 100
  [77,23] 100 [77,27] 100 [77,30] 100 [78,5] 80 [78,8] 60
  [78,10] 120 [78,28] 20 [81,6] 30 [81,13] 60 [81,17] 40 [81,20] 100
  [81,23] 100 [81,27] 100 [81,30] 100 [82,5] 80 [82,8] 60
  [82,10] 120 [82,28] 20 [83,6] 30 [84,6] 30 [85,6] 30 [86,6] 15
  [87,6] 15 [88,13] 30 [88,17] 20 [88,20] 50 [88,23] 50 [88,27] 50
  [88,30] 50 [89,5] 40 [89,8] 30 [89,10] 60 [89,28] 10 [91,5] 40
  [91,6] 15 [91,10] 60 [91,17] 20 [92,28] 10 [93,8] 30 [94,13] 30
  [94,20] 50 [94,23] 50 [94,27] 50 [94,30] 50 [96,5] 40 [96,6] 15
  [96,10] 60 [96,17] 20 [97,28] 10 [98,8] 30 [99,13] 30 [99,20] 50
  [99,23] 50 [99,27] 50 [99,30] 50 [103,6] 15 [104,6] 15 ;

param n_te default 0 :=
  # Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
  [1,1] 1 [2,2] 1 [3,3] 1 [6,6] 1 [10,10] 1 [11,11] 1 [21,21] 1
  # Fertigung Ventilgrundkörper auf erstem Bearbeitungszentrum
  [31,61] 1 [32,62] 1 [33,63] 1 [34,64] 1 [39,69] 1
  # Fertigung Ventilgrundkörper auf drittem Bearbeitungszentrum
  [31,95] 1 [32,96] 1 [33,97] 1 [34,98] 1 [39,103] 1
  # Fertigung Anbauteile auf erstem Bearbeitungszentrum
```

```
[65,112] 1 [66,113] 1 [67,114] 1 [70,117] 1 [73,120] 1 [74,121] 1
[75,122] 1 [76,123] 1 [77,124] 1 [78,125] 1 [81,128] 1 [82,129] 1
[83,130] 1 [84,131] 1 [85,132] 1
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[65,148] 1 [66,149] 1 [67,150] 1 [70,153] 1 [73,156] 1 [74,157] 1
[75,158] 1 [76,159] 1 [77,160] 1 [78,161] 1 ;

param t_dl default 0 :=
[1,0] 1.0625 [1,1] 1.0625 [1,2] 1.0625 [1,3] 1.0625 [1,4] 1.0625
[1,5] 1.0625 [1,6] 1.0625 [1,7] 1.0625 [1,8] 1.0625 [1,9] 1.0625
[1,10] 1.0625 [1,11] 1.0625 [1,12] 1.0625 [1,13] 1.0625
[1,14] 1.0625 [1,15] 1.0625 [1,16] 1.0625 [1,17] 1.0625
[1,18] 1.0625 [1,19] 1.0625 [1,20] 1.0625 [1,21] 1.0625
[1,22] 1.0625 [1,23] 1.0625 [1,24] 1.0625 [1,25] 1.0625
[1,26] 1.0625 [1,27] 1.0625 [1,28] 1.0625 [1,29] 1.0625
[1,30] 1.0625 [2,0] 1.0625 [2,1] 1.0625 [2,2] 1.0625 [2,3] 1.0625
[2,4] 1.0625 [2,5] 1.0625 [2,6] 1.0625 [2,7] 1.0625 [2,8] 1.0625
[2,9] 1.0625 [2,10] 1.0625 [2,11] 1.0625 [2,12] 1.0625
[2,13] 1.0625 [2,14] 1.0625 [2,15] 1.0625 [2,16] 1.0625
[2,17] 1.0625 [2,18] 1.0625 [2,19] 1.0625 [2,20] 1.0625
[2,21] 1.0625 [2,22] 1.0625 [2,23] 1.0625 [2,24] 1.0625
[2,25] 1.0625 [2,26] 1.0625 [2,27] 1.0625 [2,28] 1.0625
[2,29] 1.0625 [2,30] 1.0625 [3,0] 1.0625 [3,1] 1.0625 [3,2] 1.0625
[3,3] 1.0625 [3,4] 1.0625 [3,5] 1.0625 [3,6] 1.0625 [3,7] 1.0625
[3,8] 1.0625 [3,9] 1.0625 [3,10] 1.0625 [3,11] 1.0625
[3,12] 1.0625 [3,13] 1.0625 [3,14] 1.0625 [3,15] 1.0625
[3,16] 1.0625 [3,17] 1.0625 [3,18] 1.0625 [3,19] 1.0625
[3,20] 1.0625 [3,21] 1.0625 [3,22] 1.0625 [3,23] 1.0625
[3,24] 1.0625 [3,25] 1.0625 [3,26] 1.0625 [3,27] 1.0625
[3,28] 1.0625 [3,29] 1.0625 [3,30] 1.0625 [6,0] 1.0625
[6,1] 1.0625 [6,2] 1.0625 [6,3] 1.0625 [6,4] 1.0625 [6,5] 1.0625
[6,6] 1.0625 [6,7] 1.0625 [6,8] 1.0625 [6,9] 1.0625 [6,10] 1.0625
[6,11] 1.0625 [6,12] 1.0625 [6,13] 1.0625 [6,14] 1.0625
[6,15] 1.0625 [6,16] 1.0625 [6,17] 1.0625 [6,18] 1.0625
[6,19] 1.0625 [6,20] 1.0625 [6,21] 1.0625 [6,22] 1.0625
[6,23] 1.0625 [6,24] 1.0625 [6,25] 1.0625 [6,26] 1.0625
[6,27] 1.0625 [6,28] 1.0625 [6,29] 1.0625 [6,30] 1.0625
[10,0] 1.0625 [10,1] 1.0625 [10,2] 1.0625 [10,3] 1.0625
[10,4] 1.0625 [10,5] 1.0625 [10,6] 1.0625 [10,7] 1.0625
[10,8] 1.0625 [10,9] 1.0625 [10,10] 1.0625 [10,11] 1.0625
[10,12] 1.0625 [10,13] 1.0625 [10,14] 1.0625 [10,15] 1.0625
[10,16] 1.0625 [10,17] 1.0625 [10,18] 1.0625 [10,19] 1.0625
[10,20] 1.0625 [10,21] 1.0625 [10,22] 1.0625 [10,23] 1.0625
[10,24] 1.0625 [10,25] 1.0625 [10,26] 1.0625 [10,27] 1.0625
[10,28] 1.0625 [10,29] 1.0625 [10,30] 1.0625 [11,0] 1.0625
[11,1] 1.0625 [11,2] 1.0625 [11,3] 1.0625 [11,4] 1.0625
[11,5] 1.0625 [11,6] 1.0625 [11,7] 1.0625 [11,8] 1.0625
[11,9] 1.0625 [11,10] 1.0625 [11,11] 1.0625 [11,12] 1.0625
[11,13] 1.0625 [11,14] 1.0625 [11,15] 1.0625 [11,16] 1.0625
[11,17] 1.0625 [11,18] 1.0625 [11,19] 1.0625 [11,20] 1.0625
[11,21] 1.0625 [11,22] 1.0625 [11,23] 1.0625 [11,24] 1.0625
[11,25] 1.0625 [11,26] 1.0625 [11,27] 1.0625 [11,28] 1.0625
[11,29] 1.0625 [11,30] 1.0625 [21,0] 1.0625 [21,1] 1.0625
[21,2] 1.0625 [21,3] 1.0625 [21,4] 1.0625 [21,5] 1.0625
[21,6] 1.0625 [21,7] 1.0625 [21,8] 1.0625 [21,9] 1.0625
[21,10] 1.0625 [21,11] 1.0625 [21,12] 1.0625 [21,13] 1.0625
[21,14] 1.0625 [21,15] 1.0625 [21,16] 1.0625 [21,17] 1.0625
[21,18] 1.0625 [21,19] 1.0625 [21,20] 1.0625 [21,21] 1.0625
```

[70,14] 1.028 [70,15] 1.028 [70,16] 1.028 [70,17] 1.028
[70,18] 1.028 [70,19] 1.028 [70,20] 1.028 [70,21] 1.028
[70,22] 1.028 [70,23] 1.028 [70,24] 1.028 [70,25] 1.028
[70,26] 1.028 [70,27] 1.028 [70,28] 1.028 [70,29] 1.028
[70,30] 1.028 [73,0] 1.013 [73,1] 1.013 [73,2] 1.013 [73,3] 1.013
[73,4] 1.013 [73,5] 1.013 [73,6] 1.013 [73,7] 1.013 [73,8] 1.013
[73,9] 1.013 [73,10] 1.013 [73,11] 1.013 [73,12] 1.013
[73,13] 1.013 [73,14] 1.013 [73,15] 1.013 [73,16] 1.013
[73,17] 1.013 [73,18] 1.013 [73,19] 1.013 [73,20] 1.013
[73,21] 1.013 [73,22] 1.013 [73,23] 1.013 [73,24] 1.013
[73,25] 1.013 [73,26] 1.013 [73,27] 1.013 [73,28] 1.013
[73,29] 1.013 [73,30] 1.013 [74,0] 1.013 [74,1] 1.013 [74,2] 1.013
[74,3] 1.013 [74,4] 1.013 [74,5] 1.013 [74,6] 1.013 [74,7] 1.013
[74,8] 1.013 [74,9] 1.013 [74,10] 1.013 [74,11] 1.013
[74,12] 1.013 [74,13] 1.013 [74,14] 1.013 [74,15] 1.013
[74,16] 1.013 [74,17] 1.013 [74,18] 1.013 [74,19] 1.013
[74,20] 1.013 [74,21] 1.013 [74,22] 1.013 [74,23] 1.013
[74,24] 1.013 [74,25] 1.013 [74,26] 1.013 [74,27] 1.013
[74,28] 1.013 [74,29] 1.013 [74,30] 1.013 [75,0] 1.014
[75,1] 1.014 [75,2] 1.014 [75,3] 1.014 [75,4] 1.014 [75,5] 1.014
[75,6] 1.014 [75,7] 1.014 [75,8] 1.014 [75,9] 1.014 [75,10] 1.014
[75,11] 1.014 [75,12] 1.014 [75,13] 1.014 [75,14] 1.014
[75,15] 1.014 [75,16] 1.014 [75,17] 1.014 [75,18] 1.014
[75,19] 1.014 [75,20] 1.014 [75,21] 1.014 [75,22] 1.014
[75,23] 1.014 [75,24] 1.014 [75,25] 1.014 [75,26] 1.014
[75,27] 1.014 [75,28] 1.014 [75,29] 1.014 [75,30] 1.014
[76,0] 1.02 [76,1] 1.02 [76,2] 1.02 [76,3] 1.02 [76,4] 1.02
[76,5] 1.02 [76,6] 1.02 [76,7] 1.02 [76,8] 1.02 [76,9] 1.02
[76,10] 1.02 [76,11] 1.02 [76,12] 1.02 [76,13] 1.02 [76,14] 1.02
[76,15] 1.02 [76,16] 1.02 [76,17] 1.02 [76,18] 1.02 [76,19] 1.02
[76,20] 1.02 [76,21] 1.02 [76,22] 1.02 [76,23] 1.02 [76,24] 1.02
[76,25] 1.02 [76,26] 1.02 [76,27] 1.02 [76,28] 1.02 [76,29] 1.02
[76,30] 1.02 [77,0] 1.021 [77,1] 1.021 [77,2] 1.021 [77,3] 1.021
[77,4] 1.021 [77,5] 1.021 [77,6] 1.021 [77,7] 1.021 [77,8] 1.021
[77,9] 1.021 [77,10] 1.021 [77,11] 1.021 [77,12] 1.021
[77,13] 1.021 [77,14] 1.021 [77,15] 1.021 [77,16] 1.021
[77,17] 1.021 [77,18] 1.021 [77,19] 1.021 [77,20] 1.021
[77,21] 1.021 [77,22] 1.021 [77,23] 1.021 [77,24] 1.021
[77,25] 1.021 [77,26] 1.021 [77,27] 1.021 [77,28] 1.021
[77,29] 1.021 [77,30] 1.021 [78,0] 1.018 [78,1] 1.018 [78,2] 1.018
[78,3] 1.018 [78,4] 1.018 [78,5] 1.018 [78,6] 1.018 [78,7] 1.018
[78,8] 1.018 [78,9] 1.018 [78,10] 1.018 [78,11] 1.018
[78,12] 1.018 [78,13] 1.018 [78,14] 1.018 [78,15] 1.018
[78,16] 1.018 [78,17] 1.018 [78,18] 1.018 [78,19] 1.018
[78,20] 1.018 [78,21] 1.018 [78,22] 1.018 [78,23] 1.018
[78,24] 1.018 [78,25] 1.018 [78,26] 1.018 [78,27] 1.018
[78,28] 1.018 [78,29] 1.018 [78,30] 1.018 [81,0] 1.015
[81,1] 1.015 [81,2] 1.015 [81,3] 1.015 [81,4] 1.015 [81,5] 1.015
[81,6] 1.015 [81,7] 1.015 [81,8] 1.015 [81,9] 1.015 [81,10] 1.015
[81,11] 1.015 [81,12] 1.015 [81,13] 1.015 [81,14] 1.015
[81,15] 1.015 [81,16] 1.015 [81,17] 1.015 [81,18] 1.015
[81,19] 1.015 [81,20] 1.015 [81,21] 1.015 [81,22] 1.015
[81,23] 1.015 [81,24] 1.015 [81,25] 1.015 [81,26] 1.015
[81,27] 1.015 [81,28] 1.015 [81,29] 1.015 [81,30] 1.015
[82,0] 1.015 [82,1] 1.015 [82,2] 1.015 [82,3] 1.015 [82,4] 1.015
[82,5] 1.015 [82,6] 1.015 [82,7] 1.015 [82,8] 1.015 [82,9] 1.015
[82,10] 1.015 [82,11] 1.015 [82,12] 1.015 [82,13] 1.015
[82,14] 1.015 [82,15] 1.015 [82,16] 1.015 [82,17] 1.015

[82,18] 1.015 [82,19] 1.015 [82,20] 1.015 [82,21] 1.015
[82,22] 1.015 [82,23] 1.015 [82,24] 1.015 [82,25] 1.015
[82,26] 1.015 [82,27] 1.015 [82,28] 1.015 [82,29] 1.015
[82,30] 1.015 [83,0] 1.015 [83,1] 1.015 [83,2] 1.015 [83,3] 1.015
[83,4] 1.015 [83,5] 1.015 [83,6] 1.015 [83,7] 1.015 [83,8] 1.015
[83,9] 1.015 [83,10] 1.015 [83,11] 1.015 [83,12] 1.015
[83,13] 1.015 [83,14] 1.015 [83,15] 1.015 [83,16] 1.015
[83,17] 1.015 [83,18] 1.015 [83,19] 1.015 [83,20] 1.015
[83,21] 1.015 [83,22] 1.015 [83,23] 1.015 [83,24] 1.015
[83,25] 1.015 [83,26] 1.015 [83,27] 1.015 [83,28] 1.015
[83,29] 1.015 [83,30] 1.015 [84,0] 1.015 [84,1] 1.015 [84,2] 1.015
[84,3] 1.015 [84,4] 1.015 [84,5] 1.015 [84,6] 1.015 [84,7] 1.015
[84,8] 1.015 [84,9] 1.015 [84,10] 1.015 [84,11] 1.015
[84,12] 1.015 [84,13] 1.015 [84,14] 1.015 [84,15] 1.015
[84,16] 1.015 [84,17] 1.015 [84,18] 1.015 [84,19] 1.015
[84,20] 1.015 [84,21] 1.015 [84,22] 1.015 [84,23] 1.015
[84,24] 1.015 [84,25] 1.015 [84,26] 1.015 [84,27] 1.015
[84,28] 1.015 [84,29] 1.015 [84,30] 1.015 [85,0] 1.015
[85,1] 1.015 [85,2] 1.015 [85,3] 1.015 [85,4] 1.015 [85,5] 1.015
[85,6] 1.015 [85,7] 1.015 [85,8] 1.015 [85,9] 1.015 [85,10] 1.015
[85,11] 1.015 [85,12] 1.015 [85,13] 1.015 [85,14] 1.015
[85,15] 1.015 [85,16] 1.015 [85,17] 1.015 [85,18] 1.015
[85,19] 1.015 [85,20] 1.015 [85,21] 1.015 [85,22] 1.015
[85,23] 1.015 [85,24] 1.015 [85,25] 1.015 [85,26] 1.015
[85,27] 1.015 [85,28] 1.015 [85,29] 1.015 [85,30] 1.015 [86,0] 1
[86,1] 1 [86,2] 1 [86,3] 1 [86,4] 1 [86,5] 1 [86,6] 1 [86,7] 1
[86,8] 1 [86,9] 1 [86,10] 1 [86,11] 1 [86,12] 1 [86,13] 1
[86,14] 1 [86,15] 1 [86,16] 1 [86,17] 1 [86,18] 1 [86,19] 1
[86,20] 1 [86,21] 1 [86,22] 1 [86,23] 1 [86,24] 1 [86,25] 1
[86,26] 1 [86,27] 1 [86,28] 1 [86,29] 1 [86,30] 1 [87,0] 1
[87,1] 1 [87,2] 1 [87,3] 1 [87,4] 1 [87,5] 1 [87,6] 1 [87,7] 1
[87,8] 1 [87,9] 1 [87,10] 1 [87,11] 1 [87,12] 1 [87,13] 1
[87,14] 1 [87,15] 1 [87,16] 1 [87,17] 1 [87,18] 1 [87,19] 1
[87,20] 1 [87,21] 1 [87,22] 1 [87,23] 1 [87,24] 1 [87,25] 1
[87,26] 1 [87,27] 1 [87,28] 1 [87,29] 1 [87,30] 1 [88,0] 1
[88,1] 1 [88,2] 1 [88,3] 1 [88,4] 1 [88,5] 1 [88,6] 1 [88,7] 1
[88,8] 1 [88,9] 1 [88,10] 1 [88,11] 1 [88,12] 1 [88,13] 1
[88,14] 1 [88,15] 1 [88,16] 1 [88,17] 1 [88,18] 1 [88,19] 1
[88,20] 1 [88,21] 1 [88,22] 1 [88,23] 1 [88,24] 1 [88,25] 1
[88,26] 1 [88,27] 1 [88,28] 1 [88,29] 1 [88,30] 1 [89,0] 1
[89,1] 1 [89,2] 1 [89,3] 1 [89,4] 1 [89,5] 1 [89,6] 1 [89,7] 1
[89,8] 1 [89,9] 1 [89,10] 1 [89,11] 1 [89,12] 1 [89,13] 1
[89,14] 1 [89,15] 1 [89,16] 1 [89,17] 1 [89,18] 1 [89,19] 1
[89,20] 1 [89,21] 1 [89,22] 1 [89,23] 1 [89,24] 1 [89,25] 1
[89,26] 1 [89,27] 1 [89,28] 1 [89,29] 1 [89,30] 1 [91,0] 1
[91,1] 1 [91,2] 1 [91,3] 1 [91,4] 1 [91,5] 1 [91,6] 1 [91,7] 1
[91,8] 1 [91,9] 1 [91,10] 1 [91,11] 1 [91,12] 1 [91,13] 1
[91,14] 1 [91,15] 1 [91,16] 1 [91,17] 1 [91,18] 1 [91,19] 1
[91,20] 1 [91,21] 1 [91,22] 1 [91,23] 1 [91,24] 1 [91,25] 1
[91,26] 1 [91,27] 1 [91,28] 1 [91,29] 1 [91,30] 1 [92,0] 1
[92,1] 1 [92,2] 1 [92,3] 1 [92,4] 1 [92,5] 1 [92,6] 1 [92,7] 1
[92,8] 1 [92,9] 1 [92,10] 1 [92,11] 1 [92,12] 1 [92,13] 1
[92,14] 1 [92,15] 1 [92,16] 1 [92,17] 1 [92,18] 1 [92,19] 1
[92,20] 1 [92,21] 1 [92,22] 1 [92,23] 1 [92,24] 1 [92,25] 1
[92,26] 1 [92,27] 1 [92,28] 1 [92,29] 1 [92,30] 1 [93,0] 1
[93,1] 1 [93,2] 1 [93,3] 1 [93,4] 1 [93,5] 1 [93,6] 1 [93,7] 1
[93,8] 1 [93,9] 1 [93,10] 1 [93,11] 1 [93,12] 1 [93,13] 1
[93,14] 1 [93,15] 1 [93,16] 1 [93,17] 1 [93,18] 1 [93,19] 1

```

[93,20] 1 [93,21] 1 [93,22] 1 [93,23] 1 [93,24] 1 [93,25] 1
[93,26] 1 [93,27] 1 [93,28] 1 [93,29] 1 [93,30] 1 [94,0] 1
[94,1] 1 [94,2] 1 [94,3] 1 [94,4] 1 [94,5] 1 [94,6] 1 [94,7] 1
[94,8] 1 [94,9] 1 [94,10] 1 [94,11] 1 [94,12] 1 [94,13] 1
[94,14] 1 [94,15] 1 [94,16] 1 [94,17] 1 [94,18] 1 [94,19] 1
[94,20] 1 [94,21] 1 [94,22] 1 [94,23] 1 [94,24] 1 [94,25] 1
[94,26] 1 [94,27] 1 [94,28] 1 [94,29] 1 [94,30] 1 [96,0] 1
[96,1] 1 [96,2] 1 [96,3] 1 [96,4] 1 [96,5] 1 [96,6] 1 [96,7] 1
[96,8] 1 [96,9] 1 [96,10] 1 [96,11] 1 [96,12] 1 [96,13] 1
[96,14] 1 [96,15] 1 [96,16] 1 [96,17] 1 [96,18] 1 [96,19] 1
[96,20] 1 [96,21] 1 [96,22] 1 [96,23] 1 [96,24] 1 [96,25] 1
[96,26] 1 [96,27] 1 [96,28] 1 [96,29] 1 [96,30] 1 [97,0] 1
[97,1] 1 [97,2] 1 [97,3] 1 [97,4] 1 [97,5] 1 [97,6] 1 [97,7] 1
[97,8] 1 [97,9] 1 [97,10] 1 [97,11] 1 [97,12] 1 [97,13] 1
[97,14] 1 [97,15] 1 [97,16] 1 [97,17] 1 [97,18] 1 [97,19] 1
[97,20] 1 [97,21] 1 [97,22] 1 [97,23] 1 [97,24] 1 [97,25] 1
[97,26] 1 [97,27] 1 [97,28] 1 [97,29] 1 [97,30] 1 [98,0] 1
[98,1] 1 [98,2] 1 [98,3] 1 [98,4] 1 [98,5] 1 [98,6] 1 [98,7] 1
[98,8] 1 [98,9] 1 [98,10] 1 [98,11] 1 [98,12] 1 [98,13] 1
[98,14] 1 [98,15] 1 [98,16] 1 [98,17] 1 [98,18] 1 [98,19] 1
[98,20] 1 [98,21] 1 [98,22] 1 [98,23] 1 [98,24] 1 [98,25] 1
[98,26] 1 [98,27] 1 [98,28] 1 [98,29] 1 [98,30] 1 [99,0] 1
[99,1] 1 [99,2] 1 [99,3] 1 [99,4] 1 [99,5] 1 [99,6] 1 [99,7] 1
[99,8] 1 [99,9] 1 [99,10] 1 [99,11] 1 [99,12] 1 [99,13] 1
[99,14] 1 [99,15] 1 [99,16] 1 [99,17] 1 [99,18] 1 [99,19] 1
[99,20] 1 [99,21] 1 [99,22] 1 [99,23] 1 [99,24] 1 [99,25] 1
[99,26] 1 [99,27] 1 [99,28] 1 [99,29] 1 [99,30] 1 [103,0] 1
[103,1] 1 [103,2] 1 [103,3] 1 [103,4] 1 [103,5] 1 [103,6] 1
[103,7] 1 [103,8] 1 [103,9] 1 [103,10] 1 [103,11] 1 [103,12] 1
[103,13] 1 [103,14] 1 [103,15] 1 [103,16] 1 [103,17] 1 [103,18] 1
[103,19] 1 [103,20] 1 [103,21] 1 [103,22] 1 [103,23] 1 [103,24] 1
[103,25] 1 [103,26] 1 [103,27] 1 [103,28] 1 [103,29] 1 [103,30] 1
[104,0] 1 [104,1] 1 [104,2] 1 [104,3] 1 [104,4] 1 [104,5] 1
[104,6] 1 [104,7] 1 [104,8] 1 [104,9] 1 [104,10] 1 [104,11] 1
[104,12] 1 [104,13] 1 [104,14] 1 [104,15] 1 [104,16] 1 [104,17] 1
[104,18] 1 [104,19] 1 [104,20] 1 [104,21] 1 [104,22] 1 [104,23] 1
[104,24] 1 [104,25] 1 [104,26] 1 [104,27] 1 [104,28] 1 [104,29] 1
[104,30] 1 ;

```

```
param t_k default 4 ;
```

```
param t_tw default 0 :=
```

```

# Montage Ventilgruppen aus eigengefertigten Ventilgrundkörpern
[1,1] 0.0625 [2,1] 0.0625 [3,1] 0.0625 [6,1] 0.0625 [10,1] 0.0625
[11,1] 0.0625 [21,1] 0.0625
# Fertigung Ventilgrundkörper auf erstem Bearbeitungszentrum
[61,2] 0.04 [62,2] 0.04 [63,2] 0.04 [64,2] 0.04 [69,2] 0.04
# Fertigung Ventilgrundkörper auf drittem Bearbeitungszentrum
[95,4] 0.05 [96,4] 0.05 [97,4] 0.05 [98,4] 0.05 [103,4] 0.05
# Fertigung der Anbauteile auf dem ersten Bearbeitungszentrum
[112,2] 0.008 [113,2] 0.008 [114,2] 0.008 [117,2] 0.008
[120,2] 0.005 [121,2] 0.005 [122,2] 0.005 [123,2] 0.006
[124,2] 0.006 [125,2] 0.006 [128,2] 0.015 [129,2] 0.015
[130,2] 0.015 [131,2] 0.015 [132,2] 0.015
# Fertigung einiger Anbauteile auf dem dritten Bearbeitungszentrum
[148,4] 0.01 [149,4] 0.01 [150,4] 0.01 [153,4] 0.01 [156,4] 0.004
[157,4] 0.004 [158,4] 0.004 [159,4] 0.005 [160,4] 0.009
[161,4] 0.006 ;

```

A.4 Partialmodell IV

```
set E :=
  # Ventilgruppen
  1 2 3 6 10 11 21
  # Ventilgrundkörper
  31 32 33 34 39
  # Anbauteile
  65 66 67 70 73 74 75 76 77 78 81 82 83 84 85 86 87 88 89 91 92 93
  94 96 97 98 99 103 104 ;

set P :=
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
  25 26 27 28 29 30 ;

set RW := 4 7 ;

set S :=
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
  25 26 27 28 29 30 ;

param big_m := 1000 ;

param c_z := 0.00054;

param p_min := 0.95;

param lambda default 0 :=
  [*,*,4] 0 4 1 1 5 1 2 6 1 3 7 1 4 8 1 5 9 1 6 10 1 7 11 1
          8 12 1 9 13 1 10 14 1 11 15 1 12 16 1 13 17 1 14 18 1
          15 19 1 16 20 1 17 21 1 18 22 1 19 23 1 20 24 1 21 25 1
          22 26 1 23 27 1 24 28 1 25 29 1 26 30 1
  [*,*,7] 0 7 1 1 8 1 2 9 1 3 10 1 4 11 1 5 12 1 6 13 1
          7 14 1 8 15 1 9 16 1 10 17 1 11 18 1 12 19 1 13 20 1
          14 21 1 15 22 1 16 23 1 17 24 1 18 25 1 19 26 1 20 27 1
          21 28 1 22 29 1 23 30 1 ;

param:
  pi    ny    :=
  0     0     0
  1     1     0
  2     2     1
  3     3     2
  4     4     3
  5     5     4
  6     6     5
  7     7     6
  8     8     7
  9     9     8
  10    10    9
  11    11    10
  12    12    11
  13    13    12
  14    14    13
  15    15    14
  16    16    15
  17    17    16
  18    18    17
  19    19    18
```

```

20    20    19
21    21    20
22    22    21
23    23    22
24    24    23
25    25    24
26    26    25
27    27    26
28    28    27
29    29    28
30    30    29 ;

```

```
param omega default 1 ;
```

```
param c_l default 1 :=
```

```

1 0.15 2 0.15 3 0.15 6 0.15 10 0.15 11 0.15 21 0.15 65 0.025
66 0.025 67 0.025 70 0.025 73 0.025 74 0.025 75 0.025 76 0.025
77 0.025 78 0.025 81 0.025 82 0.025 83 0.025 84 0.025 85 0.025
86 0.025 87 0.025 88 0.025 89 0.025 91 0.025 92 0.5 93 0.025
94 0.025 96 0.025 97 0.025 98 0.025 99 0.025 103 0.025 104 0.5;

```

```
param c_p_var default 0 :=
```

```

[31,0] 215 [31,1] 215 [31,2] 215 [31,3] 215 [31,4] 215 [31,5] 215
[31,6] 215 [31,7] 215 [31,8] 215 [31,9] 215 [31,10] 215
[31,11] 215 [31,12] 215 [31,13] 215 [31,14] 215 [31,15] 215
[31,16] 215 [31,17] 215 [31,18] 215 [31,19] 215 [31,20] 215
[32,0] 215 [32,1] 215 [32,2] 215 [32,3] 215 [32,4] 215 [32,5] 215
[32,6] 215 [32,7] 215 [32,8] 215 [32,9] 215 [32,10] 215
[32,11] 215 [32,12] 215 [32,13] 215 [32,14] 215 [32,15] 215
[32,16] 215 [32,17] 215 [32,18] 215 [32,19] 215 [32,20] 215
[33,0] 215 [33,1] 215 [33,2] 215 [33,3] 215 [33,4] 215 [33,5] 215
[33,6] 215 [33,7] 215 [33,8] 215 [33,9] 215 [33,10] 215
[33,11] 215 [33,12] 215 [33,13] 215 [33,14] 215 [33,15] 215
[33,16] 215 [33,17] 215 [33,18] 215 [33,19] 215 [33,20] 215
[34,0] 215 [34,1] 215 [34,2] 215 [34,3] 215 [34,4] 215 [34,5] 215
[34,6] 215 [34,7] 215 [34,8] 215 [34,9] 215 [34,10] 215
[34,11] 215 [34,12] 215 [34,13] 215 [34,14] 215 [34,15] 215
[34,16] 215 [34,17] 215 [34,18] 215 [34,19] 215 [34,20] 215
[39,0] 215 [39,1] 215 [39,2] 215 [39,3] 215 [39,4] 215 [39,5] 215
[39,6] 215 [39,7] 215 [39,8] 215 [39,9] 215 [39,10] 215
[39,11] 215 [39,12] 215 [39,13] 215 [39,14] 215 [39,15] 215
[39,16] 215 [39,17] 215 [39,18] 215 [39,19] 215 [39,20] 215
[65,0] 43 [65,1] 43 [65,2] 43 [65,3] 43 [65,4] 43 [65,5] 43
[65,6] 43 [65,7] 43 [65,8] 43 [65,9] 43 [65,10] 43 [65,11] 43
[65,12] 43 [65,13] 43 [65,14] 43 [65,15] 43 [65,16] 43 [65,17] 43
[65,18] 43 [65,19] 43 [65,20] 43 [66,0] 43 [66,1] 43 [66,2] 43
[66,3] 43 [66,4] 43 [66,5] 43 [66,6] 43 [66,7] 43 [66,8] 43
[66,9] 43 [66,10] 43 [66,11] 43 [66,12] 43 [66,13] 43 [66,14] 43
[66,15] 43 [66,16] 43 [66,17] 43 [66,18] 43 [66,19] 43 [66,20] 43
[67,0] 43 [67,1] 43 [67,2] 43 [67,3] 43 [67,4] 43 [67,5] 43
[67,6] 43 [67,7] 43 [67,8] 43 [67,9] 43 [67,10] 43 [67,11] 43
[67,12] 43 [67,13] 43 [67,14] 43 [67,15] 43 [67,16] 43 [67,17] 43
[67,18] 43 [67,19] 43 [67,20] 43 [70,0] 43 [70,1] 43 [70,2] 43
[70,3] 43 [70,4] 43 [70,5] 43 [70,6] 43 [70,7] 43 [70,8] 43
[70,9] 43 [70,10] 43 [70,11] 43 [70,12] 43 [70,13] 43 [70,14] 43
[70,15] 43 [70,16] 43 [70,17] 43 [70,18] 43 [70,19] 43 [70,20] 43
[73,0] 21.25 [73,1] 21.25 [73,2] 21.25 [73,3] 21.25 [73,4] 21.25
[73,5] 21.25 [73,6] 21.25 [73,7] 21.25 [73,8] 21.25 [73,9] 21.25

```

```
[73,10] 21.25 [73,11] 21.25 [73,12] 21.25 [73,13] 21.25
[73,14] 21.25 [73,15] 21.25 [73,16] 21.25 [73,17] 21.25
[73,18] 21.25 [73,19] 21.25 [73,20] 21.25 [74,0] 21.25
[74,1] 21.25 [74,2] 21.25 [74,3] 21.25 [74,4] 21.25 [74,5] 21.25
[74,6] 21.25 [74,7] 21.25 [74,8] 21.25 [74,9] 21.25 [74,10] 21.25
[74,11] 21.25 [74,12] 21.25 [74,13] 21.25 [74,14] 21.25
[74,15] 21.25 [74,16] 21.25 [74,17] 21.25 [74,18] 21.25
[74,19] 21.25 [74,20] 21.25 [75,0] 22.5 [75,1] 22.5 [75,2] 22.5
[75,3] 22.5 [75,4] 22.5 [75,5] 22.5 [75,6] 22.5 [75,7] 22.5
[75,8] 22.5 [75,9] 22.5 [75,10] 22.5 [75,11] 22.5 [75,12] 22.5
[75,13] 22.5 [75,14] 22.5 [75,15] 22.5 [75,16] 22.5 [75,17] 22.5
[75,18] 22.5 [75,19] 22.5 [75,20] 22.5 [76,0] 31 [76,1] 31
[76,2] 31 [76,3] 31 [76,4] 31 [76,5] 31 [76,6] 31 [76,7] 31
[76,8] 31 [76,9] 31 [76,10] 31 [76,11] 31 [76,12] 31 [76,13] 31
[76,14] 31 [76,15] 31 [76,16] 31 [76,17] 31 [76,18] 31 [76,19] 31
[76,20] 31 [77,0] 32.25 [77,1] 32.25 [77,2] 32.25 [77,3] 32.25
[77,4] 32.25 [77,5] 32.25 [77,6] 32.25 [77,7] 32.25 [77,8] 32.25
[77,9] 32.25 [77,10] 32.25 [77,11] 32.25 [77,12] 32.25
[77,13] 32.25 [77,14] 32.25 [77,15] 32.25 [77,16] 32.25
[77,17] 32.25 [77,18] 32.25 [77,19] 32.25 [77,20] 32.25
[78,0] 28.5 [78,1] 28.5 [78,2] 28.5 [78,3] 28.5 [78,4] 28.5
[78,5] 28.5 [78,6] 28.5 [78,7] 28.5 [78,8] 28.5 [78,9] 28.5
[78,10] 28.5 [78,11] 28.5 [78,12] 28.5 [78,13] 28.5 [78,14] 28.5
[78,15] 28.5 [78,16] 28.5 [78,17] 28.5 [78,18] 28.5 [78,19] 28.5
[78,20] 28.5 [81,0] 33.75 [81,1] 33.75 [81,2] 33.75 [81,3] 33.75
[81,4] 33.75 [81,5] 33.75 [81,6] 33.75 [81,7] 33.75 [81,8] 33.75
[81,9] 33.75 [81,10] 33.75 [81,11] 33.75 [81,12] 33.75
[81,13] 33.75 [81,14] 33.75 [81,15] 33.75 [81,16] 33.75
[81,17] 33.75 [81,18] 33.75 [81,19] 33.75 [81,20] 33.75
[82,0] 33.75 [82,1] 33.75 [82,2] 33.75 [82,3] 33.75 [82,4] 33.75
[82,5] 33.75 [82,6] 33.75 [82,7] 33.75 [82,8] 33.75 [82,9] 33.75
[82,10] 33.75 [82,11] 33.75 [82,12] 33.75 [82,13] 33.75
[82,14] 33.75 [82,15] 33.75 [82,16] 33.75 [82,17] 33.75
[82,18] 33.75 [82,19] 33.75 [82,20] 33.75 [83,0] 33.75
[83,1] 33.75 [83,2] 33.75 [83,3] 33.75 [83,4] 33.75 [83,5] 33.75
[83,6] 33.75 [83,7] 33.75 [83,8] 33.75 [83,9] 33.75 [83,10] 33.75
[83,11] 33.75 [83,12] 33.75 [83,13] 33.75 [83,14] 33.75
[83,15] 33.75 [83,16] 33.75 [83,17] 33.75 [83,18] 33.75
[83,19] 33.75 [83,20] 33.75 [84,0] 33.75 [84,1] 33.75 [84,2] 33.75
[84,3] 33.75 [84,4] 33.75 [84,5] 33.75 [84,6] 33.75 [84,7] 33.75
[84,8] 33.75 [84,9] 33.75 [84,10] 33.75 [84,11] 33.75
[84,12] 33.75 [84,13] 33.75 [84,14] 33.75 [84,15] 33.75
[84,16] 33.75 [84,17] 33.75 [84,18] 33.75 [84,19] 33.75
[84,20] 33.75 [85,0] 33.75 [85,1] 33.75 [85,2] 33.75 [85,3] 33.75
[85,4] 33.75 [85,5] 33.75 [85,6] 33.75 [85,7] 33.75 [85,8] 33.75
[85,9] 33.75 [85,10] 33.75 [85,11] 33.75 [85,12] 33.75
[85,13] 33.75 [85,14] 33.75 [85,15] 33.75 [85,16] 33.75
[85,17] 33.75 [85,18] 33.75 [85,19] 33.75 [85,20] 33.75 ;
```

```
param c_p_fix default 0 :=
```

```
[31,0] 531.25 [31,1] 531.25 [31,2] 531.25 [31,3] 531.25
[31,4] 531.25 [31,5] 531.25 [31,6] 531.25 [31,7] 531.25
[31,8] 531.25 [31,9] 531.25 [31,10] 531.25 [31,11] 531.25
[31,12] 531.25 [31,13] 531.25 [31,14] 531.25 [31,15] 531.25
[31,16] 531.25 [31,17] 531.25 [31,18] 531.25 [31,19] 531.25
[31,20] 531.25 [32,0] 531.25 [32,1] 531.25 [32,2] 531.25
[32,3] 531.25 [32,4] 531.25 [32,5] 531.25 [32,6] 531.25
[32,7] 531.25 [32,8] 531.25 [32,9] 531.25 [32,10] 531.25
```



```

[76,12] 531.25 [76,13] 531.25 [76,14] 531.25 [76,15] 531.25
[76,16] 531.25 [76,17] 531.25 [76,18] 531.25 [76,19] 531.25
[76,20] 531.25 [77,0] 531.25 [77,1] 531.25 [77,2] 531.25
[77,3] 531.25 [77,4] 531.25 [77,5] 531.25 [77,6] 531.25
[77,7] 531.25 [77,8] 531.25 [77,9] 531.25 [77,10] 531.25
[77,11] 531.25 [77,12] 531.25 [77,13] 531.25 [77,14] 531.25
[77,15] 531.25 [77,16] 531.25 [77,17] 531.25 [77,18] 531.25
[77,19] 531.25 [77,20] 531.25 [78,0] 531.25 [78,1] 531.25
[78,2] 531.25 [78,3] 531.25 [78,4] 531.25 [78,5] 531.25
[78,6] 531.25 [78,7] 531.25 [78,8] 531.25 [78,9] 531.25
[78,10] 531.25 [78,11] 531.25 [78,12] 531.25 [78,13] 531.25
[78,14] 531.25 [78,15] 531.25 [78,16] 531.25 [78,17] 531.25
[78,18] 531.25 [78,19] 531.25 [78,20] 531.25 [81,0] 281.25
[81,1] 281.25 [81,2] 281.25 [81,3] 281.25 [81,4] 281.25
[81,5] 281.25 [81,6] 281.25 [81,7] 281.25 [81,8] 281.25
[81,9] 281.25 [81,10] 281.25 [81,11] 281.25 [81,12] 281.25
[81,13] 281.25 [81,14] 281.25 [81,15] 281.25 [81,16] 281.25
[81,17] 281.25 [81,18] 281.25 [81,19] 281.25 [81,20] 281.25
[82,0] 281.25 [82,1] 281.25 [82,2] 281.25 [82,3] 281.25
[82,4] 281.25 [82,5] 281.25 [82,6] 281.25 [82,7] 281.25
[82,8] 281.25 [82,9] 281.25 [82,10] 281.25 [82,11] 281.25
[82,12] 281.25 [82,13] 281.25 [82,14] 281.25 [82,15] 281.25
[82,16] 281.25 [82,17] 281.25 [82,18] 281.25 [82,19] 281.25
[82,20] 281.25 [83,0] 281.25 [83,1] 281.25 [83,2] 281.25
[83,3] 281.25 [83,4] 281.25 [83,5] 281.25 [83,6] 281.25
[83,7] 281.25 [83,8] 281.25 [83,9] 281.25 [83,10] 281.25
[83,11] 281.25 [83,12] 281.25 [83,13] 281.25 [83,14] 281.25
[83,15] 281.25 [83,16] 281.25 [83,17] 281.25 [83,18] 281.25
[83,19] 281.25 [83,20] 281.25 [84,0] 281.25 [84,1] 281.25
[84,2] 281.25 [84,3] 281.25 [84,4] 281.25 [84,5] 281.25
[84,6] 281.25 [84,7] 281.25 [84,8] 281.25 [84,9] 281.25
[84,10] 281.25 [84,11] 281.25 [84,12] 281.25 [84,13] 281.25
[84,14] 281.25 [84,15] 281.25 [84,16] 281.25 [84,17] 281.25
[84,18] 281.25 [84,19] 281.25 [84,20] 281.25 [85,0] 281.25
[85,1] 281.25 [85,2] 281.25 [85,3] 281.25 [85,4] 281.25
[85,5] 281.25 [85,6] 281.25 [85,7] 281.25 [85,8] 281.25
[85,9] 281.25 [85,10] 281.25 [85,11] 281.25 [85,12] 281.25
[85,13] 281.25 [85,14] 281.25 [85,15] 281.25 [85,16] 281.25
[85,17] 281.25 [85,18] 281.25 [85,19] 281.25 [85,20] 281.25 ;

```

```
param g default 0 :=
```

```

[31,1] 1 [31,2] 1 [31,3] 1 [32,6] 1 [33,10] 1 [34,11] 1 [39,21] 1
[65,1] 1 [65,2] 1 [65,10] 1 [65,11] 1 [65,21] 1 [66,1] 1 [66,2] 1
[66,3] 1 [66,6] 1 [67,10] 1 [67,11] 1 [70,21] 1 [73,1] 1 [73,2] 1
[73,3] 1 [74,6] 1 [74,10] 1 [74,11] 1 [75,21] 1 [76,1] 1 [77,2] 1
[77,11] 1 [77,21] 1 [78,3] 1 [78,6] 1 [78,10] 1 [81,1] 1 [81,2] 1
[81,11] 1 [81,21] 1 [82,3] 1 [82,6] 1 [82,10] 1 [83,1] 1 [84,1] 1
[85,1] 1 [86,1] 1 [87,1] 1 [88,2] 1 [88,11] 1 [88,21] 1 [89,3] 1
[89,6] 1 [89,10] 1 [91,1] 1 [91,2] 1 [91,3] 1 [92,6] 1 [93,10] 1
[94,11] 1 [94,21] 1 [96,1] 1 [96,2] 1 [96,3] 1 [97,6] 1 [98,10] 1
[99,11] 1 [99,21] 1 [103,1] 1 [104,1] 1 ;

```

```
param n_ges default 0 :=
```

```

[1,6] 15 [2,17] 20 [3,5] 40 [3,10] 60 [6,28] 10 [10,8] 30
[11,13] 30 [11,20] 50 [21,23] 50 [21,27] 50 [21,30] 50 [31,5] 40
[31,6] 15 [31,10] 60 [31,17] 20 [32,28] 10 [33,8] 30 [34,13] 30
[34,20] 50 [39,23] 50 [39,27] 50 [39,30] 50 [65,6] 30 [65,8] 60
[65,13] 60 [65,17] 40 [65,20] 100 [65,23] 100 [65,27] 100

```

```

[65,30] 100 [66,5] 80 [66,6] 30 [66,10] 120 [66,17] 40 [66,28] 20
[67,8] 60 [67,13] 60 [67,20] 100 [70,23] 100 [70,27] 100
[70,30] 100 [73,5] 80 [73,6] 30 [73,10] 120 [73,17] 40 [74,8] 60
[74,13] 60 [74,20] 100 [74,28] 20 [75,23] 100 [75,27] 100
[75,30] 100 [76,6] 30 [77,13] 60 [77,17] 40 [77,20] 100
[77,23] 100 [77,27] 100 [77,30] 100 [78,5] 80 [78,8] 60
[78,10] 120 [78,28] 20 [81,6] 30 [81,13] 60 [81,17] 40 [81,20] 100
[81,23] 100 [81,27] 100 [81,30] 100 [82,5] 80 [82,8] 60
[82,10] 120 [82,28] 20 [83,6] 30 [84,6] 30 [85,6] 30 [86,6] 15
[87,6] 15 [88,13] 30 [88,17] 20 [88,20] 50 [88,23] 50 [88,27] 50
[88,30] 50 [89,5] 40 [89,8] 30 [89,10] 60 [89,28] 10 [91,5] 40
[91,6] 15 [91,10] 60 [91,17] 20 [92,28] 10 [93,8] 30 [94,13] 30
[94,20] 50 [94,23] 50 [94,27] 50 [94,30] 50 [96,5] 40 [96,6] 15
[96,10] 60 [96,17] 20 [97,28] 10 [98,8] 30 [99,13] 30 [99,20] 50
[99,23] 50 [99,27] 50 [99,30] 50 [103,6] 15 [104,6] 15 ;

```

```
param t_rw default 0 :=
```

```

[1,0] 7 [1,1] 7 [1,2] 7 [1,3] 7 [1,4] 7 [1,5] 7 [1,6] 7 [1,7] 7
[1,8] 7 [1,9] 7 [1,10] 7 [1,11] 7 [1,12] 7 [1,13] 7 [1,14] 7
[1,15] 7 [1,16] 7 [1,17] 7 [1,18] 7 [1,19] 7 [1,20] 7 [1,21] 7
[1,22] 7 [1,23] 7 [1,24] 7 [1,25] 7 [1,26] 7 [1,27] 7 [1,28] 7
[1,29] 7 [1,30] 7 [2,0] 7 [2,1] 7 [2,2] 7 [2,3] 7 [2,4] 7 [2,5] 7
[2,6] 7 [2,7] 7 [2,8] 7 [2,9] 7 [2,10] 7 [2,11] 7 [2,12] 7
[2,13] 7 [2,14] 7 [2,15] 7 [2,16] 7 [2,17] 7 [2,18] 7 [2,19] 7
[2,20] 7 [2,21] 7 [2,22] 7 [2,23] 7 [2,24] 7 [2,25] 7 [2,26] 7
[2,27] 7 [2,28] 7 [2,29] 7 [2,30] 7 [3,0] 7 [3,1] 7 [3,2] 7
[3,3] 7 [3,4] 7 [3,5] 7 [3,6] 7 [3,7] 7 [3,8] 7 [3,9] 7 [3,10] 7
[3,11] 7 [3,12] 7 [3,13] 7 [3,14] 7 [3,15] 7 [3,16] 7 [3,17] 7
[3,18] 7 [3,19] 7 [3,20] 7 [3,21] 7 [3,22] 7 [3,23] 7 [3,24] 7
[3,25] 7 [3,26] 7 [3,27] 7 [3,28] 7 [3,29] 7 [3,30] 7 [6,0] 7
[6,1] 7 [6,2] 7 [6,3] 7 [6,4] 7 [6,5] 7 [6,6] 7 [6,7] 7 [6,8] 7
[6,9] 7 [6,10] 7 [6,11] 7 [6,12] 7 [6,13] 7 [6,14] 7 [6,15] 7
[6,16] 7 [6,17] 7 [6,18] 7 [6,19] 7 [6,20] 7 [6,21] 7 [6,22] 7
[6,23] 7 [6,24] 7 [6,25] 7 [6,26] 7 [6,27] 7 [6,28] 7 [6,29] 7
[6,30] 7 [10,0] 7 [10,1] 7 [10,2] 7 [10,3] 7 [10,4] 7 [10,5] 7
[10,6] 7 [10,7] 7 [10,8] 7 [10,9] 7 [10,10] 7 [10,11] 7 [10,12] 7
[10,13] 7 [10,14] 7 [10,15] 7 [10,16] 7 [10,17] 7 [10,18] 7
[10,19] 7 [10,20] 7 [10,21] 7 [10,22] 7 [10,23] 7 [10,24] 7
[10,25] 7 [10,26] 7 [10,27] 7 [10,28] 7 [10,29] 7 [10,30] 7
[11,0] 7 [11,1] 7 [11,2] 7 [11,3] 7 [11,4] 7 [11,5] 7 [11,6] 7
[11,7] 7 [11,8] 7 [11,9] 7 [11,10] 7 [11,11] 7 [11,12] 7 [11,13] 7
[11,14] 7 [11,15] 7 [11,16] 7 [11,17] 7 [11,18] 7 [11,19] 7
[11,20] 7 [11,21] 7 [11,22] 7 [11,23] 7 [11,24] 7 [11,25] 7
[11,26] 7 [11,27] 7 [11,28] 7 [11,29] 7 [11,30] 7 [21,0] 7
[21,1] 7 [21,2] 7 [21,3] 7 [21,4] 7 [21,5] 7 [21,6] 7 [21,7] 7
[21,8] 7 [21,9] 7 [21,10] 7 [21,11] 7 [21,12] 7 [21,13] 7
[21,14] 7 [21,15] 7 [21,16] 7 [21,17] 7 [21,18] 7 [21,19] 7
[21,20] 7 [21,21] 7 [21,22] 7 [21,23] 7 [21,24] 7 [21,25] 7
[21,26] 7 [21,27] 7 [21,28] 7 [21,29] 7 [21,30] 7 [31,0] 7
[31,1] 7 [31,2] 7 [31,3] 7 [31,4] 7 [31,5] 7 [31,6] 7 [31,7] 7
[31,8] 7 [31,9] 7 [31,10] 7 [31,11] 7 [31,12] 7 [31,13] 7
[31,14] 7 [31,15] 7 [31,16] 7 [31,17] 7 [31,18] 7 [31,19] 7
[31,20] 7 [31,21] 7 [31,22] 7 [31,23] 7 [31,24] 7 [31,25] 7
[31,26] 7 [31,27] 7 [31,28] 7 [31,29] 7 [31,30] 7 [32,0] 7
[32,1] 7 [32,2] 7 [32,3] 7 [32,4] 7 [32,5] 7 [32,6] 7 [32,7] 7
[32,8] 7 [32,9] 7 [32,10] 7 [32,11] 7 [32,12] 7 [32,13] 7
[32,14] 7 [32,15] 7 [32,16] 7 [32,17] 7 [32,18] 7 [32,19] 7
[32,20] 7 [32,21] 7 [32,22] 7 [32,23] 7 [32,24] 7 [32,25] 7

```

[32,26] 7 [32,27] 7 [32,28] 7 [32,29] 7 [32,30] 7 [33,0] 7
[33,1] 7 [33,2] 7 [33,3] 7 [33,4] 7 [33,5] 7 [33,6] 7 [33,7] 7
[33,8] 7 [33,9] 7 [33,10] 7 [33,11] 7 [33,12] 7 [33,13] 7
[33,14] 7 [33,15] 7 [33,16] 7 [33,17] 7 [33,18] 7 [33,19] 7
[33,20] 7 [33,21] 7 [33,22] 7 [33,23] 7 [33,24] 7 [33,25] 7
[33,26] 7 [33,27] 7 [33,28] 7 [33,29] 7 [33,30] 7 [34,0] 7
[34,1] 7 [34,2] 7 [34,3] 7 [34,4] 7 [34,5] 7 [34,6] 7 [34,7] 7
[34,8] 7 [34,9] 7 [34,10] 7 [34,11] 7 [34,12] 7 [34,13] 7
[34,14] 7 [34,15] 7 [34,16] 7 [34,17] 7 [34,18] 7 [34,19] 7
[34,20] 7 [34,21] 7 [34,22] 7 [34,23] 7 [34,24] 7 [34,25] 7
[34,26] 7 [34,27] 7 [34,28] 7 [34,29] 7 [34,30] 7 [39,0] 7
[39,1] 7 [39,2] 7 [39,3] 7 [39,4] 7 [39,5] 7 [39,6] 7 [39,7] 7
[39,8] 7 [39,9] 7 [39,10] 7 [39,11] 7 [39,12] 7 [39,13] 7
[39,14] 7 [39,15] 7 [39,16] 7 [39,17] 7 [39,18] 7 [39,19] 7
[39,20] 7 [39,21] 7 [39,22] 7 [39,23] 7 [39,24] 7 [39,25] 7
[39,26] 7 [39,27] 7 [39,28] 7 [39,29] 7 [39,30] 7 [65,0] 7
[65,1] 7 [65,2] 7 [65,3] 7 [65,4] 7 [65,5] 7 [65,6] 7 [65,7] 7
[65,8] 7 [65,9] 7 [65,10] 7 [65,11] 7 [65,12] 7 [65,13] 7
[65,14] 7 [65,15] 7 [65,16] 7 [65,17] 7 [65,18] 7 [65,19] 7
[65,20] 7 [65,21] 7 [65,22] 7 [65,23] 7 [65,24] 7 [65,25] 7
[65,26] 7 [65,27] 7 [65,28] 7 [65,29] 7 [65,30] 7 [66,0] 7
[66,1] 7 [66,2] 7 [66,3] 7 [66,4] 7 [66,5] 7 [66,6] 7 [66,7] 7
[66,8] 7 [66,9] 7 [66,10] 7 [66,11] 7 [66,12] 7 [66,13] 7
[66,14] 7 [66,15] 7 [66,16] 7 [66,17] 7 [66,18] 7 [66,19] 7
[66,20] 7 [66,21] 7 [66,22] 7 [66,23] 7 [66,24] 7 [66,25] 7
[66,26] 7 [66,27] 7 [66,28] 7 [66,29] 7 [66,30] 7 [67,0] 7
[67,1] 7 [67,2] 7 [67,3] 7 [67,4] 7 [67,5] 7 [67,6] 7 [67,7] 7
[67,8] 7 [67,9] 7 [67,10] 7 [67,11] 7 [67,12] 7 [67,13] 7
[67,14] 7 [67,15] 7 [67,16] 7 [67,17] 7 [67,18] 7 [67,19] 7
[67,20] 7 [67,21] 7 [67,22] 7 [67,23] 7 [67,24] 7 [67,25] 7
[67,26] 7 [67,27] 7 [67,28] 7 [67,29] 7 [67,30] 7 [70,0] 7
[70,1] 7 [70,2] 7 [70,3] 7 [70,4] 7 [70,5] 7 [70,6] 7 [70,7] 7
[70,8] 7 [70,9] 7 [70,10] 7 [70,11] 7 [70,12] 7 [70,13] 7
[70,14] 7 [70,15] 7 [70,16] 7 [70,17] 7 [70,18] 7 [70,19] 7
[70,20] 7 [70,21] 7 [70,22] 7 [70,23] 7 [70,24] 7 [70,25] 7
[70,26] 7 [70,27] 7 [70,28] 7 [70,29] 7 [70,30] 7 [73,0] 7
[73,1] 7 [73,2] 7 [73,3] 7 [73,4] 7 [73,5] 7 [73,6] 7 [73,7] 7
[73,8] 7 [73,9] 7 [73,10] 7 [73,11] 7 [73,12] 7 [73,13] 7
[73,14] 7 [73,15] 7 [73,16] 7 [73,17] 7 [73,18] 7 [73,19] 7
[73,20] 7 [73,21] 7 [73,22] 7 [73,23] 7 [73,24] 7 [73,25] 7
[73,26] 7 [73,27] 7 [73,28] 7 [73,29] 7 [73,30] 7 [74,0] 7
[74,1] 7 [74,2] 7 [74,3] 7 [74,4] 7 [74,5] 7 [74,6] 7 [74,7] 7
[74,8] 7 [74,9] 7 [74,10] 7 [74,11] 7 [74,12] 7 [74,13] 7
[74,14] 7 [74,15] 7 [74,16] 7 [74,17] 7 [74,18] 7 [74,19] 7
[74,20] 7 [74,21] 7 [74,22] 7 [74,23] 7 [74,24] 7 [74,25] 7
[74,26] 7 [74,27] 7 [74,28] 7 [74,29] 7 [74,30] 7 [75,0] 7
[75,1] 7 [75,2] 7 [75,3] 7 [75,4] 7 [75,5] 7 [75,6] 7 [75,7] 7
[75,8] 7 [75,9] 7 [75,10] 7 [75,11] 7 [75,12] 7 [75,13] 7
[75,14] 7 [75,15] 7 [75,16] 7 [75,17] 7 [75,18] 7 [75,19] 7
[75,20] 7 [75,21] 7 [75,22] 7 [75,23] 7 [75,24] 7 [75,25] 7
[75,26] 7 [75,27] 7 [75,28] 7 [75,29] 7 [75,30] 7 [76,0] 7
[76,1] 7 [76,2] 7 [76,3] 7 [76,4] 7 [76,5] 7 [76,6] 7 [76,7] 7
[76,8] 7 [76,9] 7 [76,10] 7 [76,11] 7 [76,12] 7 [76,13] 7
[76,14] 7 [76,15] 7 [76,16] 7 [76,17] 7 [76,18] 7 [76,19] 7
[76,20] 7 [76,21] 7 [76,22] 7 [76,23] 7 [76,24] 7 [76,25] 7
[76,26] 7 [76,27] 7 [76,28] 7 [76,29] 7 [76,30] 7 [77,0] 7
[77,1] 7 [77,2] 7 [77,3] 7 [77,4] 7 [77,5] 7 [77,6] 7 [77,7] 7
[77,8] 7 [77,9] 7 [77,10] 7 [77,11] 7 [77,12] 7 [77,13] 7

[77,14] 7 [77,15] 7 [77,16] 7 [77,17] 7 [77,18] 7 [77,19] 7
[77,20] 7 [77,21] 7 [77,22] 7 [77,23] 7 [77,24] 7 [77,25] 7
[77,26] 7 [77,27] 7 [77,28] 7 [77,29] 7 [77,30] 7 [78,0] 7
[78,1] 7 [78,2] 7 [78,3] 7 [78,4] 7 [78,5] 7 [78,6] 7 [78,7] 7
[78,8] 7 [78,9] 7 [78,10] 7 [78,11] 7 [78,12] 7 [78,13] 7
[78,14] 7 [78,15] 7 [78,16] 7 [78,17] 7 [78,18] 7 [78,19] 7
[78,20] 7 [78,21] 7 [78,22] 7 [78,23] 7 [78,24] 7 [78,25] 7
[78,26] 7 [78,27] 7 [78,28] 7 [78,29] 7 [78,30] 7 [81,0] 7
[81,1] 7 [81,2] 7 [81,3] 7 [81,4] 7 [81,5] 7 [81,6] 7 [81,7] 7
[81,8] 7 [81,9] 7 [81,10] 7 [81,11] 7 [81,12] 7 [81,13] 7
[81,14] 7 [81,15] 7 [81,16] 7 [81,17] 7 [81,18] 7 [81,19] 7
[81,20] 7 [81,21] 7 [81,22] 7 [81,23] 7 [81,24] 7 [81,25] 7
[81,26] 7 [81,27] 7 [81,28] 7 [81,29] 7 [81,30] 7 [82,0] 7
[82,1] 7 [82,2] 7 [82,3] 7 [82,4] 7 [82,5] 7 [82,6] 7 [82,7] 7
[82,8] 7 [82,9] 7 [82,10] 7 [82,11] 7 [82,12] 7 [82,13] 7
[82,14] 7 [82,15] 7 [82,16] 7 [82,17] 7 [82,18] 7 [82,19] 7
[82,20] 7 [82,21] 7 [82,22] 7 [82,23] 7 [82,24] 7 [82,25] 7
[82,26] 7 [82,27] 7 [82,28] 7 [82,29] 7 [82,30] 7 [83,0] 7
[83,1] 7 [83,2] 7 [83,3] 7 [83,4] 7 [83,5] 7 [83,6] 7 [83,7] 7
[83,8] 7 [83,9] 7 [83,10] 7 [83,11] 7 [83,12] 7 [83,13] 7
[83,14] 7 [83,15] 7 [83,16] 7 [83,17] 7 [83,18] 7 [83,19] 7
[83,20] 7 [83,21] 7 [83,22] 7 [83,23] 7 [83,24] 7 [83,25] 7
[83,26] 7 [83,27] 7 [83,28] 7 [83,29] 7 [83,30] 7 [84,0] 7
[84,1] 7 [84,2] 7 [84,3] 7 [84,4] 7 [84,5] 7 [84,6] 7 [84,7] 7
[84,8] 7 [84,9] 7 [84,10] 7 [84,11] 7 [84,12] 7 [84,13] 7
[84,14] 7 [84,15] 7 [84,16] 7 [84,17] 7 [84,18] 7 [84,19] 7
[84,20] 7 [84,21] 7 [84,22] 7 [84,23] 7 [84,24] 7 [84,25] 7
[84,26] 7 [84,27] 7 [84,28] 7 [84,29] 7 [84,30] 7 [85,0] 7
[85,1] 7 [85,2] 7 [85,3] 7 [85,4] 7 [85,5] 7 [85,6] 7 [85,7] 7
[85,8] 7 [85,9] 7 [85,10] 7 [85,11] 7 [85,12] 7 [85,13] 7
[85,14] 7 [85,15] 7 [85,16] 7 [85,17] 7 [85,18] 7 [85,19] 7
[85,20] 7 [85,21] 7 [85,22] 7 [85,23] 7 [85,24] 7 [85,25] 7
[85,26] 7 [85,27] 7 [85,28] 7 [85,29] 7 [85,30] 7 [86,0] 4
[86,1] 4 [86,2] 4 [86,3] 4 [86,4] 4 [86,5] 4 [86,6] 4 [86,7] 4
[86,8] 4 [86,9] 4 [86,10] 4 [86,11] 4 [86,12] 4 [86,13] 4
[86,14] 4 [86,15] 4 [86,16] 4 [86,17] 4 [86,18] 4 [86,19] 4
[86,20] 4 [86,21] 4 [86,22] 4 [86,23] 4 [86,24] 4 [86,25] 4
[86,26] 4 [86,27] 4 [86,28] 4 [86,29] 4 [86,30] 4 [87,0] 4
[87,1] 4 [87,2] 4 [87,3] 4 [87,4] 4 [87,5] 4 [87,6] 4 [87,7] 4
[87,8] 4 [87,9] 4 [87,10] 4 [87,11] 4 [87,12] 4 [87,13] 4
[87,14] 4 [87,15] 4 [87,16] 4 [87,17] 4 [87,18] 4 [87,19] 4
[87,20] 4 [87,21] 4 [87,22] 4 [87,23] 4 [87,24] 4 [87,25] 4
[87,26] 4 [87,27] 4 [87,28] 4 [87,29] 4 [87,30] 4 [88,0] 4
[88,1] 4 [88,2] 4 [88,3] 4 [88,4] 4 [88,5] 4 [88,6] 4 [88,7] 4
[88,8] 4 [88,9] 4 [88,10] 4 [88,11] 4 [88,12] 4 [88,13] 4
[88,14] 4 [88,15] 4 [88,16] 4 [88,17] 4 [88,18] 4 [88,19] 4
[88,20] 4 [88,21] 4 [88,22] 4 [88,23] 4 [88,24] 4 [88,25] 4
[88,26] 4 [88,27] 4 [88,28] 4 [88,29] 4 [88,30] 4 [89,0] 4
[89,1] 4 [89,2] 4 [89,3] 4 [89,4] 4 [89,5] 4 [89,6] 4 [89,7] 4
[89,8] 4 [89,9] 4 [89,10] 4 [89,11] 4 [89,12] 4 [89,13] 4
[89,14] 4 [89,15] 4 [89,16] 4 [89,17] 4 [89,18] 4 [89,19] 4
[89,20] 4 [89,21] 4 [89,22] 4 [89,23] 4 [89,24] 4 [89,25] 4
[89,26] 4 [89,27] 4 [89,28] 4 [89,29] 4 [89,30] 4 [91,0] 4
[91,1] 4 [91,2] 4 [91,3] 4 [91,4] 4 [91,5] 4 [91,6] 4 [91,7] 4
[91,8] 4 [91,9] 4 [91,10] 4 [91,11] 4 [91,12] 4 [91,13] 4
[91,14] 4 [91,15] 4 [91,16] 4 [91,17] 4 [91,18] 4 [91,19] 4
[91,20] 4 [91,21] 4 [91,22] 4 [91,23] 4 [91,24] 4 [91,25] 4
[91,26] 4 [91,27] 4 [91,28] 4 [91,29] 4 [91,30] 4 [92,0] 4

```
[92,1] 4 [92,2] 4 [92,3] 4 [92,4] 4 [92,5] 4 [92,6] 4 [92,7] 4
[92,8] 4 [92,9] 4 [92,10] 4 [92,11] 4 [92,12] 4 [92,13] 4
[92,14] 4 [92,15] 4 [92,16] 4 [92,17] 4 [92,18] 4 [92,19] 4
[92,20] 4 [92,21] 4 [92,22] 4 [92,23] 4 [92,24] 4 [92,25] 4
[92,26] 4 [92,27] 4 [92,28] 4 [92,29] 4 [92,30] 4 [93,0] 4
[93,1] 4 [93,2] 4 [93,3] 4 [93,4] 4 [93,5] 4 [93,6] 4 [93,7] 4
[93,8] 4 [93,9] 4 [93,10] 4 [93,11] 4 [93,12] 4 [93,13] 4
[93,14] 4 [93,15] 4 [93,16] 4 [93,17] 4 [93,18] 4 [93,19] 4
[93,20] 4 [93,21] 4 [93,22] 4 [93,23] 4 [93,24] 4 [93,25] 4
[93,26] 4 [93,27] 4 [93,28] 4 [93,29] 4 [93,30] 4 [94,0] 4
[94,1] 4 [94,2] 4 [94,3] 4 [94,4] 4 [94,5] 4 [94,6] 4 [94,7] 4
[94,8] 4 [94,9] 4 [94,10] 4 [94,11] 4 [94,12] 4 [94,13] 4
[94,14] 4 [94,15] 4 [94,16] 4 [94,17] 4 [94,18] 4 [94,19] 4
[94,20] 4 [94,21] 4 [94,22] 4 [94,23] 4 [94,24] 4 [94,25] 4
[94,26] 4 [94,27] 4 [94,28] 4 [94,29] 4 [94,30] 4 [96,0] 4
[96,1] 4 [96,2] 4 [96,3] 4 [96,4] 4 [96,5] 4 [96,6] 4 [96,7] 4
[96,8] 4 [96,9] 4 [96,10] 4 [96,11] 4 [96,12] 4 [96,13] 4
[96,14] 4 [96,15] 4 [96,16] 4 [96,17] 4 [96,18] 4 [96,19] 4
[96,20] 4 [96,21] 4 [96,22] 4 [96,23] 4 [96,24] 4 [96,25] 4
[96,26] 4 [96,27] 4 [96,28] 4 [96,29] 4 [96,30] 4 [97,0] 4
[97,1] 4 [97,2] 4 [97,3] 4 [97,4] 4 [97,5] 4 [97,6] 4 [97,7] 4
[97,8] 4 [97,9] 4 [97,10] 4 [97,11] 4 [97,12] 4 [97,13] 4
[97,14] 4 [97,15] 4 [97,16] 4 [97,17] 4 [97,18] 4 [97,19] 4
[97,20] 4 [97,21] 4 [97,22] 4 [97,23] 4 [97,24] 4 [97,25] 4
[97,26] 4 [97,27] 4 [97,28] 4 [97,29] 4 [97,30] 4 [98,0] 4
[98,1] 4 [98,2] 4 [98,3] 4 [98,4] 4 [98,5] 4 [98,6] 4 [98,7] 4
[98,8] 4 [98,9] 4 [98,10] 4 [98,11] 4 [98,12] 4 [98,13] 4
[98,14] 4 [98,15] 4 [98,16] 4 [98,17] 4 [98,18] 4 [98,19] 4
[98,20] 4 [98,21] 4 [98,22] 4 [98,23] 4 [98,24] 4 [98,25] 4
[98,26] 4 [98,27] 4 [98,28] 4 [98,29] 4 [98,30] 4 [99,0] 4
[99,1] 4 [99,2] 4 [99,3] 4 [99,4] 4 [99,5] 4 [99,6] 4 [99,7] 4
[99,8] 4 [99,9] 4 [99,10] 4 [99,11] 4 [99,12] 4 [99,13] 4
[99,14] 4 [99,15] 4 [99,16] 4 [99,17] 4 [99,18] 4 [99,19] 4
[99,20] 4 [99,21] 4 [99,22] 4 [99,23] 4 [99,24] 4 [99,25] 4
[99,26] 4 [99,27] 4 [99,28] 4 [99,29] 4 [99,30] 4 [103,0] 4
[103,1] 4 [103,2] 4 [103,3] 4 [103,4] 4 [103,5] 4 [103,6] 4
[103,7] 4 [103,8] 4 [103,9] 4 [103,10] 4 [103,11] 4 [103,12] 4
[103,13] 4 [103,14] 4 [103,15] 4 [103,16] 4 [103,17] 4 [103,18] 4
[103,19] 4 [103,20] 4 [103,21] 4 [103,22] 4 [103,23] 4 [103,24] 4
[103,25] 4 [103,26] 4 [103,27] 4 [103,28] 4 [103,29] 4 [103,30] 4
[104,0] 4 [104,1] 4 [104,2] 4 [104,3] 4 [104,4] 4 [104,5] 4
[104,6] 4 [104,7] 4 [104,8] 4 [104,9] 4 [104,10] 4 [104,11] 4
[104,12] 4 [104,13] 4 [104,14] 4 [104,15] 4 [104,16] 4 [104,17] 4
[104,18] 4 [104,19] 4 [104,20] 4 [104,21] 4 [104,22] 4 [104,23] 4
[104,24] 4 [104,25] 4 [104,26] 4 [104,27] 4 [104,28] 4 [104,29] 4
[104,30] 4 ;
```

```
param x_l0 default 0 :=
1 20 3 50 31 60 65 50 66 100 73 110 76 30 78 80 81 30 82 80 83 30
84 30 85 30 86 15 87 15 89 40 91 55 96 55 103 5 104 15 ;
```

```
param x_mb :=
1 25 2 33 3 65 6 7 10 19 11 49 21 81 31 105 32 17 33 19 34 81
39 131 65 211 66 193 67 161 70 211 73 193 74 161 75 211 76 64
77 211 78 193 81 211 82 193 83 64 84 64 85 64 86 36 87 36 88 120
89 96 91 96 92 14 93 42 94 120 96 96 97 14 98 42 99 120 103 36
104 36 ;
```

Anhang B: Ausgaben der Optimierung

B.1: Ausgaben Optimierung Partialmodell I

Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 43015 rows and 27190 columns.
MIP Presolve modified 22507 coefficients.
Aggregator did 3575 substitutions.
Reduced MIP has 10667 rows, 12725 columns, and 50916 nonzeros.
Presolve time = 0.41 sec.
Clique table members: 3018.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
Root relaxation solution time = 0.64 sec.

| Node | Nodes Left | Objective | IInf | Best Integer | Cuts/ Best Node | ItCnt | Gap |
|------|---------------|---------------|------|--------------|--------------------|-------|-----|
| 0 | 0 | -2.92776e+007 | 355 | | -2.92776e+007 | 3528 | |
| | | -2.92712e+007 | 400 | | Cuts: 549 | 4534 | |
| | | -2.92693e+007 | 404 | | Cuts: 328 | 5316 | |
| | | -2.92687e+007 | 442 | | Cuts: 213 | 6029 | |
| | | -2.92685e+007 | 435 | | Cuts: 212 | 6596 | |
| | | -2.92682e+007 | 444 | | Cuts: 146 | 7005 | |

Heuristic still looking.

Heuristic complete.

Elapsed time = 38.28 sec. (tree size = 0.00 MB).

| | | | | | | | |
|--------|-----|---------------|-----|---------------|---------------|-------|-------|
| 100 | 100 | -2.92230e+007 | 198 | | -2.92311e+007 | 37854 | |
| 200 | 200 | -2.92135e+007 | 110 | | -2.92311e+007 | 57567 | |
| * 200+ | 198 | | 0 | -2.92013e+007 | -2.92311e+007 | 57567 | 0.10% |
| 300 | 298 | -2.92127e+007 | 43 | -2.92013e+007 | -2.92311e+007 | 58195 | 0.10% |
| * 387 | 381 | | 0 | -2.92117e+007 | -2.92311e+007 | 58934 | 0.07% |
| * 387+ | 361 | | 0 | -2.92120e+007 | -2.92311e+007 | 58934 | 0.07% |

Clique cuts applied: 29

Cover cuts applied: 32

Implied bound cuts applied: 9

Flow cuts applied: 481

Gomory fractional cuts applied: 36

MIP - Integer optimal, tolerance (0.0005/1e-006):

Objective = -2.9212008277e+007

Current MIP best bound = -2.9224929493e+007 (gap = 12921.2, 0.04%)

Solution time = 91.45 sec. Iterations = 58986 Nodes = 390 (358)

B.2: Ausgaben Optimierung Partialmodell II

Tried aggregator 2 times.

MIP Presolve eliminated 452668 rows and 24132 columns.
MIP Presolve modified 13929 coefficients.
Aggregator did 4521 substitutions.
Reduced MIP has 7404 rows, 11536 columns, and 39992 nonzeros.
Presolve time = 0.66 sec.
Clique table members: 469.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
Root relaxation solution time = 0.88 sec.

| Nodes | | Objective | IInf | Best Integer | Cuts/ | | Gap |
|-------|------|---------------|------|--------------|---------------|-------|-----|
| Node | Left | | | | Best Node | ItCnt | |
| 0 | 0 | -2.97561e+008 | 338 | | -2.97561e+008 | 5672 | |
| | | -2.97559e+008 | 472 | | Cuts: 831 | 6763 | |
| | | -2.97559e+008 | 392 | | Cuts: 440 | 7553 | |
| | | -2.97559e+008 | 447 | | Cuts: 249 | 8092 | |

Heuristic still looking.
Heuristic complete.
Elapsed time = 34.33 sec. (tree size = 0.00 MB).

| | | | | | | | |
|--------|-----|---------------|-----|---------------|---------------|-------|-------|
| 100 | 100 | -2.97557e+008 | 286 | | -2.97559e+008 | 14927 | |
| 200 | 200 | -2.97556e+008 | 166 | | -2.97559e+008 | 18324 | |
| 300 | 300 | -2.97555e+008 | 113 | | -2.97559e+008 | 19605 | |
| * 370+ | 370 | | 0 | -2.97531e+008 | -2.97559e+008 | 22495 | 0.01% |

Cover cuts applied: 9
Implied bound cuts applied: 6
Flow cuts applied: 381
Flow path cuts applied: 157
Gomory fractional cuts applied: 77

MIP - Integer optimal, tolerance (0.0005/1e-006):
Objective = -2.9753075160e+008
Current MIP best bound = -2.9755852120e+008 (gap = 27769.6, 0.01%)
Solution time = 72.08 sec. Iterations = 22495 Nodes = 370 (371)

B.3: Ausgaben Optimierung Partialmodell III

Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 171796 rows and 6345 columns.
MIP Presolve modified 2813 coefficients.
Aggregator did 124 substitutions.
Reduced MIP has 89 rows, 122 columns, and 356 nonzeros.
Presolve time = 0.17 sec.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
Root relaxation solution time = -0.00 sec.

| Nodes | | Objective | IInf | Best Integer | Cuts/ | | Gap |
|-------|------|------------|------|--------------|------------|-------|--------|
| Node | Left | | | | Best Node | ItCnt | |
| 0 | 0 | 14950.1941 | 5 | | 14950.1941 | 139 | |
| * 0+ | 0 | | 0 | 16705.8909 | 14950.1941 | 139 | 10.51% |
| | | 15290.3021 | 14 | 16705.8909 | Cuts: 7 | 151 | 8.47% |
| * 0+ | 0 | | 0 | 15558.9032 | 15290.3021 | 151 | 1.73% |
| | | 15312.1386 | 5 | 15558.9032 | Cuts: 15 | 155 | 1.59% |
| * 0+ | 0 | | 0 | 15466.6522 | 15312.1386 | 155 | 1.00% |
| * 7 | 0 | | 0 | 15415.9142 | 15415.9142 | 180 | 0.00% |

Implied bound cuts applied: 2

Gomory fractional cuts applied: 4

MIP - Integer optimal solution: Objective = 1.5415914158e+004
 Solution time = 0.19 sec. Iterations = 180 Nodes = 7

B.4: Ausgaben Optimierung Partialmodell IV

Tried aggregator 1 time.

MIP Presolve eliminated 4884 rows and 3536 columns.

MIP Presolve modified 2483 coefficients.

Aggregator did 448 substitutions.

Reduced MIP has 8119 rows, 3796 columns, and 19107 nonzeros.

Presolve time = 0.11 sec.

Clique table members: 3321.

MIP emphasis: balance optimality and feasibility.

Root relaxation solution time = 0.08 sec.

| Node | Nodes Left | Objective | IInf | Best Integer | Cuts/ Best Node | ItCnt | Gap |
|--------|------------|-------------|------|--------------|--------------------|-------|-------|
| 0 | 0 | 130824.5552 | 570 | | 130824.5552 | 1954 | |
| | | 228701.7286 | 205 | | Cuts: 1193 | 3097 | |
| | | 235987.7416 | 217 | | Cuts: 419 | 3447 | |
| | | 236386.3806 | 157 | | Cuts: 117 | 3540 | |
| | | 237572.2926 | 225 | | Cuts: 74 | 3639 | |
| | | 237801.8161 | 289 | | Cuts: 106 | 3693 | |
| | | 237855.1588 | 286 | | Cuts: 9 | 3726 | |
| | | 237855.2573 | 286 | | Cuts: 0 | 3728 | |
| * 0+ | 0 | | 0 | 320282.6481 | 237855.2573 | 3728 | |
| 25.74% | | | | | | | |
| * 40+ | 22 | | 0 | 263954.8948 | 238590.7683 | 4557 | 9.61% |
| * 60+ | 19 | | 0 | 263639.9039 | 241128.6313 | 4925 | 8.54% |
| * 70+ | 25 | | 0 | 263365.8614 | 241128.6313 | 5015 | 8.44% |
| 100 | 39 | 262090.8452 | 93 | 263365.8614 | 242970.8264 | 5518 | 7.74% |
| * 100+ | 17 | | 0 | 262203.1946 | 242970.8264 | 5518 | 7.33% |
| * 120+ | 4 | | 0 | 251552.6137 | 243724.5191 | 5711 | 3.11% |
| * 140+ | 19 | | 0 | 250304.3814 | 243724.5191 | 5933 | 2.63% |
| 200 | 30 | 249968.4516 | 126 | 250304.3814 | 245318.1791 | 6990 | 1.99% |
| * 249 | 20 | | 0 | 249744.1955 | 248627.5927 | 7442 | 0.45% |
| * 260+ | 15 | | 0 | 249673.4543 | 249530.8612 | 7518 | 0.06% |

Clique cuts applied: 310

Cover cuts applied: 13

Implied bound cuts applied: 382

Flow cuts applied: 74

Gomory fractional cuts applied: 66

MIP - Integer optimal, tolerance (0.0005/1e-006):

Objective = 2.4967345431e+005

Current MIP best bound = 2.4958291531e+005 (gap = 90.539, 0.04%)

Solution time = 7.39 sec. Iterations = 7587 Nodes = 273 (21)

Anhang C: Ergebnisse der Optimierung

C.1: Ergebnisse Optimierung Partialmodell I⁴²

B_pn(1,0) 1 B_pn(1,1) 1 B_pn(1,2) 1 B_pn(1,3) 1 B_pn(1,4) 1 B_pn(1,5) 1
 B_pn(1,6) 1 B_pn(1,7) 1 B_pn(1,8) 1 B_pn(1,9) 1 B_pn(1,10) 1
 B_pn(1,11) 1 B_pn(1,12) 1 B_pn(1,13) 1 B_pn(1,14) 1 B_pn(1,15) 1
 B_pn(1,16) 1 B_pn(1,17) 1 B_pn(1,18) 1 B_pn(1,19) 1 B_pn(1,20) 1

B_w(1,0) 1 B_w(1,1) 1 B_w(1,2) 1 B_w(1,3) 1 B_w(1,4) 1 B_w(1,5) 1
 B_w(1,6) 1 B_w(1,7) 1 B_w(1,8) 1 B_w(1,9) 1 B_w(1,10) 1 B_w(1,11) 1
 B_w(1,12) 1 B_w(1,13) 1 B_w(1,14) 1 B_w(1,15) 1 B_w(1,16) 1 B_w(1,17) 1
 B_w(1,18) 1 B_w(1,19) 1 B_w(1,20) 1 B_w(2,0) 1 B_w(2,1) 1 B_w(2,2) 1
 B_w(2,3) 1 B_w(2,4) 1 B_w(2,5) 1 B_w(2,6) 1 B_w(2,7) 1 B_w(2,8) 1
 B_w(2,9) 1 B_w(2,10) 1 B_w(2,11) 1 B_w(2,12) 1 B_w(2,13) 1 B_w(2,14) 1
 B_w(2,15) 1 B_w(2,16) 1 B_w(4,0) 1 B_w(4,1) 1 B_w(4,2) 1 B_w(4,3) 1
 B_w(4,4) 1 B_w(4,5) 1 B_w(4,6) 1 B_w(4,7) 1 B_w(4,8) 1 B_w(4,9) 1
 B_w(4,10) 1

B_k(48,0) 1 B_k(48,1) 1 B_k(48,2) 1 B_k(48,3) 1 B_k(48,4) 1 B_k(48,5) 1
 B_k(48,6) 1 B_k(48,7) 1 B_k(48,8) 1 B_k(48,9) 1 B_k(48,10) 1
 B_k(48,11) 1 B_k(48,12) 1 B_k(48,13) 1 B_k(48,14) 1 B_k(48,15) 1
 B_k(48,16) 1 B_k(48,17) 1 B_k(48,18) 1 B_k(48,19) 1 B_k(48,20) 1
 B_k(49,0) 1 B_k(49,1) 1 B_k(49,2) 1 B_k(49,3) 1 B_k(49,4) 1 B_k(49,5) 1
 B_k(49,6) 1 B_k(49,7) 1 B_k(49,8) 1 B_k(49,9) 1 B_k(49,10) 1
 B_k(49,11) 1 B_k(49,12) 1 B_k(49,13) 1 B_k(49,14) 1 B_k(49,15) 1
 B_k(49,16) 1 B_k(49,17) 1 B_k(49,18) 1 B_k(49,19) 1 B_k(49,20) 1
 B_k(50,0) 1 B_k(50,1) 1 B_k(50,2) 1 B_k(50,3) 1 B_k(50,4) 1 B_k(50,5) 1
 B_k(50,6) 1 B_k(50,7) 1 B_k(50,8) 1 B_k(50,9) 1 B_k(50,10) 1
 B_k(50,11) 1 B_k(50,12) 1 B_k(50,13) 1 B_k(50,14) 1 B_k(50,15) 1
 B_k(50,16) 1 B_k(50,17) 1 B_k(50,18) 1 B_k(50,19) 1 B_k(50,20) 1
 B_k(51,0) 1 B_k(51,1) 1 B_k(51,2) 1 B_k(51,3) 1 B_k(51,4) 1 B_k(51,5) 1
 B_k(51,6) 1 B_k(51,7) 1 B_k(51,8) 1 B_k(51,9) 1 B_k(51,10) 1
 B_k(51,11) 1 B_k(51,12) 1 B_k(51,13) 1 B_k(51,14) 1 B_k(51,15) 1
 B_k(51,16) 1 B_k(51,17) 1 B_k(51,18) 1 B_k(51,19) 1 B_k(51,20) 1
 B_k(52,0) 1 B_k(52,1) 1 B_k(52,2) 1 B_k(52,3) 1 B_k(52,4) 1 B_k(52,5) 1
 B_k(52,6) 1 B_k(52,7) 1 B_k(52,8) 1 B_k(52,9) 1 B_k(52,10) 1
 B_k(52,11) 1 B_k(52,12) 1 B_k(52,13) 1 B_k(52,14) 1 B_k(52,15) 1
 B_k(52,16) 1 B_k(52,17) 1 B_k(52,18) 1 B_k(52,19) 1 B_k(52,20) 1
 B_k(53,0) 1 B_k(53,1) 1 B_k(53,2) 1 B_k(53,3) 1 B_k(53,4) 1 B_k(53,5) 1
 B_k(53,6) 1 B_k(53,7) 1 B_k(53,8) 1 B_k(53,9) 1 B_k(53,10) 1

42 Hier werden nur die relevanten Entscheidungsvariablen dargestellt. Nicht aufgeführte Indexkombinationen dieser Variablen sind 0. Die Variablen b_{ij}^{WN} und b_i^{PNA} werden nicht aufgeführt, da sie durch die Variablen b_{ij}^W und b_{ij}^{PN} implizit gegeben sind.

B_k(103,7) 1 B_k(103,8) 1 B_k(103,9) 1 B_k(103,10) 1 B_k(103,11) 1
 B_k(103,12) 1 B_k(103,13) 1 B_k(103,14) 1 B_k(103,15) 1 B_k(103,16) 1
 B_k(103,17) 1 B_k(103,18) 1 B_k(103,19) 1 B_k(103,20) 1 B_k(104,0) 1
 B_k(104,1) 1 B_k(104,2) 1 B_k(104,3) 1 B_k(104,4) 1 B_k(104,5) 1
 B_k(104,6) 1 B_k(104,7) 1 B_k(104,8) 1 B_k(104,9) 1 B_k(104,10) 1
 B_k(104,11) 1 B_k(104,12) 1 B_k(104,13) 1 B_k(104,14) 1 B_k(104,15) 1
 B_k(104,16) 1 B_k(104,17) 1 B_k(104,18) 1 B_k(104,19) 1 B_k(104,20) 1

C.2: Ergebnisse Optimierung Partialmodell II⁴³

B_mr(4,1) 1 B_mr(5,1) 1 B_mr(10,1) 1 B_mr(12,1) 1 B_mr(13,1) 1
 B_mr(15,1) 1 B_mr(16,1) 1 B_mr(14,13) 1

B_mqn(9,2,1) 1 B_mqn(9,2,5) 1 B_mqn(9,2,9) 1

C.3: Ergebnisse Optimierung Partialmodell III⁴⁴

B_ls(1) 1 B_ls(2) 1 B_ls(3) 1 B_ls(6) 1 B_ls(10) 1 B_ls(11) 1
 B_ls(21) 1 B_ls(31) 1 B_ls(32) 1 B_ls(33) 1 B_ls(34) 1 B_ls(39) 1
 B_ls(65) 1 B_ls(66) 1 B_ls(67) 1 B_ls(70) 1 B_ls(73) 1 B_ls(74) 1
 B_ls(75) 1 B_ls(76) 1 B_ls(77) 1 B_ls(78) 1 B_ls(81) 1 B_ls(82) 1
 B_ls(83) 1 B_ls(84) 1 B_ls(85) 1 B_ls(86) 1 B_ls(87) 1 B_ls(88) 1
 B_ls(89) 1 B_ls(91) 1 B_ls(92) 1 B_ls(93) 1 B_ls(94) 1 B_ls(96) 1
 B_ls(97) 1 B_ls(98) 1 B_ls(99) 1 B_ls(103) 1 B_ls(104) 1

X_mb(1) 25 X_mb(10) 19 X_mb(103) 36 X_mb(104) 36 X_mb(11) 49 X_mb(2) 33
 X_mb(21) 81 X_mb(3) 65 X_mb(31) 105 X_mb(32) 17 X_mb(33) 19 X_mb(34) 81
 X_mb(39) 131 X_mb(6) 7 X_mb(65) 211 X_mb(66) 193 X_mb(67) 161
 X_mb(70) 211 X_mb(73) 193 X_mb(74) 161 X_mb(75) 211 X_mb(76) 64
 X_mb(77) 211 X_mb(78) 193 X_mb(81) 211 X_mb(82) 193 X_mb(83) 64
 X_mb(84) 64 X_mb(85) 64 X_mb(86) 36 X_mb(87) 36 X_mb(88) 120
 X_mb(89) 96 X_mb(91) 96 X_mb(92) 14 X_mb(93) 42 X_mb(94) 120
 X_mb(96) 96 X_mb(97) 14 X_mb(98) 42 X_mb(99) 120

B_bz(1) 1 B_bz(10) 1 B_bz(11) 1 B_bz(2) 1 B_bz(21) 1 B_bz(3) 1
 B_bz(31) 1 B_bz(32) 1 B_bz(33) 1 B_bz(34) 1 B_bz(39) 1 B_bz(6) 1
 B_bz(65) 1 B_bz(66) 1 B_bz(67) 1 B_bz(70) 1 B_bz(73) 1 B_bz(74) 1
 B_bz(75) 1 B_bz(76) 1 B_bz(77) 1 B_bz(78) 1 B_bz(81) 1 B_bz(82) 1
 B_bz(83) 1 B_bz(84) 1 B_bz(85) 1

C.4: Ergebnisse Optimierung Partialmodell IV⁴⁵

X_lg(10) 30 X_lg(103) 10 X_lg(11) 50 X_lg(2) 20 X_lg(21) 100
 X_lg(31) 95 X_lg(32) 20 X_lg(33) 80 X_lg(34) 82 X_lg(39) 150 X_lg(6) 10
 X_lg(65) 470 X_lg(66) 244 X_lg(67) 342 X_lg(70) 250 X_lg(73) 180

43 Hier werden nur die relevanten Entscheidungsvariablen dargestellt. Nicht aufgeführte Indexkombinationen dieser Variablen sind 0. Die Variablen b_{ij}^M und b_{ijk}^{MO} werden nicht aufgeführt, da sie durch die Variablen b_{ij}^{MR} , b_{ij}^{ME} (für alle Kombinationen von i und j) und b_{ijk}^{MON} sowie die Ausgangssituation implizit gegeben sind.

44 Hier werden nur die relevanten Entscheidungsvariablen dargestellt. Nicht aufgeführte Indexkombinationen dieser Variablen sind 0.

45 Hier werden nur die relevanten Entscheidungsvariablen dargestellt. Nicht aufgeführte Indexkombinationen dieser Variablen sind 0.

X_lg(74) 342 X_lg(75) 250 X_lg(77) 400 X_lg(78) 404 X_lg(81) 400
X_lg(82) 404 X_lg(88) 150 X_lg(89) 70 X_lg(91) 48.5 X_lg(92) 20
X_lg(93) 60 X_lg(94) 140.5 X_lg(96) 48.5 X_lg(97) 20 X_lg(98) 60
X_lg(99) 140.5