

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

## **Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke**

**Benedikt Matthias Sager**

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

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

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Die Dissertation wurde am 28.05.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 17.10.2018 angenommen.



# Inhalt

<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Motivation . . . . .	1
1.2 Problemstellung . . . . .	3
1.3 Zielsetzung . . . . .	6
1.4 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs . . . . .	7
1.4.1 Betrachtungsbereich globale Produktionsnetzwerke . . . . .	7
1.4.2 Gestaltungsprozess Netzwerkkonfiguration . . . . .	10
1.5 Aufbau der Arbeit . . . . .	13
<b>2 Grundlagen</b>	<b>15</b>
2.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie . . . . .	15
2.1.1 Wesentliche Begrifflichkeiten zur Entscheidungstheorie . . . . .	15
2.1.2 Ablauf von Entscheidungsprozessen . . . . .	16
2.1.3 Multikriterielle Entscheidungssituationen . . . . .	18
2.2 Grundlagen der multikriteriellen Optimierung . . . . .	20
2.2.1 Grundlagen der mathematischen Optimierung . . . . .	20
2.2.2 Lösungsverfahren für multikriterielle Optimierungsmodelle . . . . .	23
<b>3 Stand der Erkenntnisse</b>	<b>27</b>
3.1 Anforderungen an eine Methode zur Netzwerkkonfiguration . . . . .	27
3.2 Vorverständnis zur Literaturanalyse . . . . .	29
3.3 Literaturanalyse . . . . .	31
3.3.1 Prozessmodelle zur Netzwerkkonfiguration . . . . .	31
3.3.2 Multikriterielle Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN . . . . .	36
3.3.3 Kombinierte Ansätze zur Netzwerkkonfiguration . . . . .	49
3.3.4 Bewertungsansätze im Rahmen der Netzwerkkonfiguration . . . . .	56
3.4 Forschungsdefizit . . . . .	58

<b>4</b>	<b>Konzeption der Methode</b>	<b>61</b>
4.1	Lösungsansatz . . . . .	61
4.2	Lösungskonzept . . . . .	62
4.2.1	Spezifikation des multikriteriellen Optimierungsmodells . . . . .	62
4.2.2	Herleitung des Aufbaus des Prozessmodells . . . . .	64
4.3	Fazit . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke</b>	<b>67</b>
5.1	Modellbildung . . . . .	67
5.1.1	Festlegung der Netzwerkstruktur . . . . .	68
5.1.2	Anforderungen aus der Netzwerkmigration . . . . .	70
5.1.3	Anforderungen aus dem Netzwerkbetrieb . . . . .	73
5.1.4	Zielsystem für die Netzwerkkonfiguration . . . . .	75
5.2	Mathematisches Modell zur Netzwerkkonfiguration . . . . .	86
5.2.1	Allgemeine Techniken der Modellformulierung . . . . .	86
5.2.2	Festlegung der Netzwerkstruktur . . . . .	88
5.2.3	Anforderungen aus der Netzwerkmigration . . . . .	93
5.2.4	Anforderungen aus dem Netzwerkbetrieb . . . . .	98
5.2.5	Zielsystem für die Netzwerkkonfiguration . . . . .	104
<b>6</b>	<b>Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke</b>	<b>118</b>
6.1	Prozessmodell zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke . . . . .	118
6.1.1	Identifikation des Handlungsbedarfs . . . . .	118
6.1.2	Definition der Aufgabenstellung . . . . .	123
6.1.3	Datenerhebung . . . . .	126
6.1.4	Entwicklung von Handlungsalternativen . . . . .	130
6.1.5	Präzisierung des Zielsystems . . . . .	131
6.1.6	Bewertung . . . . .	131
6.1.7	Auswahl . . . . .	132
6.2	Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums . . . . .	132
<b>7</b>	<b>Fallbeispiel</b>	<b>140</b>
7.1	Pilotanwendung der entwickelten Methode . . . . .	140
7.1.1	Identifikation des Handlungsbedarfs . . . . .	140
7.1.2	Definition der Aufgabenstellung . . . . .	141
7.1.3	Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums . . . . .	147

7.1.4	Bewertung . . . . .	158
7.1.5	Auswahl . . . . .	161
7.2	Erkenntnisse aus der Pilotanwendung . . . . .	161
<b>8</b>	<b>Bewertung der Methode</b>	<b>162</b>
8.1	Bewertung der Zielerreichung . . . . .	162
8.2	Bewertung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	163
8.2.1	Aufwand . . . . .	163
8.2.2	Nutzen . . . . .	165
8.2.3	Verallgemeinerte Bewertung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	166
8.3	Notwendige Voraussetzungen und bestehende Limitationen . . . . .	167
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>168</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>173</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>199</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>201</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>203</b>
	<b>Modellnotation</b>	<b>205</b>
	<b>Anhang</b>	<b>227</b>
	<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>259</b>



## **Abstract**

Manufacturing companies face increasingly competitive and volatile environments due to the inexorable progress of globalisation. The internationalisation of the value-added process enables companies to cope with the upcoming challenges. Altering objectives necessitate the permanent evolution of manufacturing networks. Consequently, the competence to configure global manufacturing networks is indispensable for the enduring competitiveness of manufacturing companies. The design of global manufacturing networks is a procedural as well as analytical highly demanding task. In existing literature no approach could be identified that considers both aspects of complexity in a balanced way. This dissertation therefore seeks to close this gap in order to enable manufacturing companies to improve their network configuration process and to enhance the achievable solution quality.

In the course of this research, the strengths of existing process models and the analytical superiority of dynamic, multi-objective mathematical optimisation models have been combined in a new approach for the configuration of global manufacturing networks. Based on the analysed research within decision theory a seven step method is proposed. In order to reduce the expenditure of time for the necessary data collection caused by the application of an optimisation model, a cyclical approach for the development of action alternatives with a gradual improvement of the evaluation accuracy is provided. The mathematical model allows the optimisation of seven target figures that have been deduced from corporate strategy. In order to enable a differentiated formulation of the target figure metrics, network alternatives are simultaneously evaluated in three operating points. A realistic modelling of the decision problem has been ensured by considering numerous requirements of the network operation and migration.

The performance of the developed approach is exemplified in an industrial case study. The generalisation of the gained insights confirms its economic efficiency. In summary, the proposed approach supports manufacturing companies to successfully meet the procedural and analytical challenges of the network configuration process and thus enables them to effectively evolve their global manufacturing network.





# 1 Einleitung

*I would tell BMW if they think they're gonna build a plant in Mexico and sell cars into the US without a 35 percent tax, it's not gonna happen.*

Donald Trump, Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika

*Unsere starke Präsenz als Arbeitgeber in den USA, China, Europa und auch Großbritannien ist unser größtes politisches Kapital.*

Harald Krüger, Vorstandsvorsitzender der BMW AG

Die Drohung des US-Präsidenten, Strafzölle auf Fahrzeugimporte aus einem geplanten BMW-Produktionsstandort in Mexiko zu erheben, macht deutlich, welchen dynamischen Veränderungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der internationale Handel unterliegt. Die Antwort des Vorstandsvorsitzenden der BMW AG auf diese Drohung zeigt die enorme Bedeutung globaler Produktionsnetzwerke (GPN) im Zusammenhang mit derartigen Umfeldveränderungen. Die vorliegende Arbeit widmet sich der Gestaltung dieser Wertschöpfungsnetzwerke.

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Produktionsnetzwerke bilden das Rückgrat des wirtschaftlichen Erfolgs produzierender Unternehmen (ROLAND BERGER 2015, S. 4). Die Internationalisierung der Wertschöpfung durch die schrittweise Expansion von Unternehmen über Landesgrenzen hinweg ist daher ein seit Jahrhunderten bekanntes Phänomen (JACOB & STRUBE 2008, S. 2). Die rasante Entwicklung des Welthandels sowie der Direktinvestitionen im Ausland in den letzten Jahrzehnten zeugen von einer erheblichen Beschleunigung dieses Prozesses (RUDBERG & WEST 2008, S. 91). Ausgehend von ursprünglich lokalen Wertschöpfungsnetzwerken haben sich im Laufe der Zeit globale Wertschöpfungsnetzwerke entwickelt, die durch vielfältige Liefer- und Leistungsverflechtungen zwischen global verteilten Standorten gekennzeichnet sind (MÖLLER et al. 2011, S. 24; JACOB & STRUBE 2008, S. 3-9). Ermöglicht wurde diese Veränderung u. a. durch stark sinkende Kommunikati-

# 1 Einleitung

---

onskosten, die Beseitigung von Handelshemmnissen, der weltweiten Verfügbarkeit von Wissen und Technologien sowie der preiswerten Mobilität von Mitarbeitern und Waren (FRIEDLI et al. 2014, S. 1; MÖLLER et al. 2011, S. 28-29; JACOB & STRUBE 2008). GPN ermöglichen unter diesen Voraussetzungen die Realisierung der größtmöglichen Effizienz von Produktion und Märkten (MÖLLER et al. 2011, S. 28).

Die Realisierung von Kostensenkungspotenzialen als eines der Hauptmotive der Internationalisierung der Wertschöpfung stellt hierbei eine über Jahrzehnte währende Konstante dar. Vor zwanzig Jahren führte FERDOWS (1997, S. 82) die Reduktion direkter und indirekter Kosten, Logistikkosten sowie Steuerabgaben als die greifbarsten Gründe einer Auslandsproduktion ins Feld. Eine Studie zu Produktionsverlagerungen im deutschen verarbeitenden Gewerbe aus dem Jahr 2009 bestätigt die Aktualität dieses Hauptmotivs: drei Viertel der verlagernden Betriebe nannten die Reduzierung der Personalkosten als entscheidende Triebfeder für die Auslandsproduktion (KINKEL & MALOCA 2009, S. 6-7). Als weitere wesentliche Gründe für den Aufbau GPN wurden im Rahmen der Studie die Nähe zu Schlüsselkunden sowie die Markterschließung des Ziellandes identifiziert. Die Überwindung von Handelshemmnissen, die Eindämmung von Währungsrisiken, der globale Zugang zu Fachkräften sowie die Erschließung neuer Zuliefermärkte bilden weitere Potenziale internationaler Produktion (FERDOWS 1997, S. 82). Das Streben nach einer gleichzeitigen Erfüllung mehrerer dieser Ziele stellt hierbei eine Kernanforderung an die Entwicklung GPN dar. Die Bedeutung der einzelnen Ziele unterliegt dabei einem stetigen Wandel. Im Jahr 2015 lag der Fokus laut einer Studie der Unternehmensberatung Roland Berger auf den Zielen Zuverlässigkeit und Kosten dicht gefolgt von Flexibilität und Liefargeschwindigkeit (ROLAND BERGER 2015, S. 17). Für das Jahr 2020 wird im Rahmen dieser Studie insbesondere für bisher nachrangige Ziele eine höhere Bedeutung vorhergesagt. Globale Wertschöpfungsnetzwerke müssen daher kontinuierlich an sich wandelnde Ziele angepasst werden.

Neben einer sich verändernden Zielsetzung können zahlreiche interne und externe Faktoren die Weiterentwicklung einst effizienter Produktionsnetzwerke erforderlich machen (MAURER et al. 2009, S. 1). Nach SCHMIDT (2011, S. 73-74) treiben fünf Megatrends die Notwendigkeit für die Anpassung GPN: Verschiebung der Absatzmärkte für Konsum- und Investitionsgüter, nach wie vor hohe Unterschiede in Faktorkosten, Weiterentwicklung wichtiger Zulieferindustrien in BRIC-Ländern<sup>1</sup>, fortlaufende Konsolidierung von

---

<sup>1</sup>BRIC: Staatengruppe bestehend aus den aufstrebenden Schwellenländern Brasilien, Russland, Indien, China

Industrien mit neuen globalen Champions sowie die sinkende Verfügbarkeit von Fachkräften in traditionellen Industrieländern. Nach ROLAND BERGER (2015, S. 4) wird die Bedeutung der strategischen Ausrichtung GPN in den nächsten Jahren aufgrund dieses volatilen, unsicheren, komplexen und ungewissen Umfelds weiter zunehmen.

Die aufgrund sich verändernder Zielsetzungen oder Umfeldbedingungen erforderliche Umgestaltung von Wertschöpfungsnetzwerken geht für den Hochlohnstandort Deutschland häufig mit einem Beschäftigungsabbau einher (SCHMIDT 2011, S. 72). Dies ist von zentraler Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland, da das produzierende Gewerbe für die deutsche Volkswirtschaft nach wie vor eine zentrale Rolle einnimmt (ABELE & REINHART 2011, S. 7). Mit über 8 Mio. Beschäftigten im Jahr 2016 waren ca. 19% aller Erwerbstätigen im produzierenden Gewerbe tätig (STATISTISCHES BUNDESAMT 2017). Obgleich die Produktion aus logistischen Gründen, aus Kostengesichtspunkten oder anderweitigen Überlegungen in einigen Branchen nicht in Deutschland verbleiben kann, können dennoch wichtige Beiträge zum Wertschöpfungsprozess geleistet werden. Globale, komplexe Wertschöpfungsnetzwerke können von Deutschland aus orchestriert werden und so gezielt vorhandene Kompetenzen gefördert und ein Beitrag zum Erhalt strategisch wichtiger Wertschöpfungsbestandteile in Deutschland geleistet werden. (MÖLLER et al. 2011, S. 30-31)

Zusammenfassend ist die Kompetenz zur Gestaltung globaler Wertschöpfungsnetzwerke insbesondere für den Hochlohnstandort Deutschland von zentraler Bedeutung für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen auf dem Weltmarkt.

## 1.2 Problemstellung

Heutige GPN sind i. d. R. historisch gewachsen und nur selten das Ergebnis einer langfristigen strategischen Planung (JACOB 2006, S. 6). Da es sich statt integrierter Produktionsnetzwerke eher um lose Zusammenstellungen von Produktionsstandorten handelt (CHRISTODOULOU et al. 2007, S. 7), können global agierende Unternehmen die in Abschnitt 1.1 angeführten Potenziale von Wertschöpfungsnetzwerken derzeit nicht vollständig realisieren (THOMAS 2013, S. 7). Der Grund für die fehlende strategische Ausrichtung existierender GPN ist in Unzulänglichkeiten bei der Netzwerkkonfiguration zu sehen, die aus zwei mit dem Netzwerkplanungsprozess einhergehenden Hauptherausforderungen resultieren. Zum einen beschreiben MAURER et al. (2009, S. 1) den Prozess der Neuausrichtung als komplex und politisch schwierig und zum anderen

## 1 Einleitung

---

führen SCHUH et al. (2012, S. 382-383) die Komplexität und Größe des Lösungsraums sowie die geringe Zeit an, die Entscheidungsträgern für die Auswahl einer Netzwerkalternative zur Verfügung steht. Diese beiden Aspekte lassen sich zur analytischen und prozessualen Komplexität der Netzwerkkonfiguration verallgemeinern. Die analytische Komplexität beschreibt Faktoren, welche die logische Durchdringung und Bewertung eines Produktionsnetzwerks sowie der zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen erschweren. Die prozessuale Komplexität hingegen meint Herausforderungen in Bezug auf die Prozessschritte, die für das Herbeiführen einer Entscheidung für eine Lösungsalternative innerhalb eines Unternehmens erforderlich sind.

**Prozessuale Komplexität der Netzwerkkonfiguration** Entscheidungen zur Netzwerkgestaltung besitzen weitreichende Auswirkungen auf die langfristige Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens (GOETSCHALCKS & FLEISCHMANN 2008, S. 120) und haben nicht selten einen Umfang von mehreren Millionen Euro (SCHUH et al. 2012, S. 383). Gepaart mit der hohen Unsicherheit von entscheidungsrelevanten Prognosen und marktwirtschaftlichen Entwicklungen überfordert das komplexe Planungsproblem auch die Fähigkeiten und das Wissen der erfahrensten Entscheidungsträger (GOETSCHALCKS & FLEISCHMANN 2008, S. 118-120). Darüber hinaus verfolgen Vertreter aus den relevanten Fachbereichen Produktion, Vertrieb, Entwicklung und Finanzwesen jeweils eigene Interessen (THOMAS 2013, S. 7). Die Konsens- und Entscheidungsfindung bei der Netzwerkkonfiguration wird in der Folge als langwierig und politisch schwierig charakterisiert (THOMAS 2013, S. 7).

Die Seltenheit mit der ein Unternehmen eine grundlegende Neuausrichtung eines Produktionsnetzwerks anstrebt, macht es wahrscheinlich, dass ein eingesetztes Planungsteam unerfahren in Bezug auf die Anwendung von Methoden zur Netzwerkkonfiguration sowie die erforderliche Entscheidungsunterstützung ist (GOETSCHALCKS & FLEISCHMANN 2008, S. 118). Der gebotenen Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entwicklung und Bewertung von Handlungsalternativen (SCHUH et al. 2012, S. 383) kann damit nur schwer Genüge getan werden.

**Analytische Komplexität der Netzwerkkonfiguration** SCHUH et al. (2012, S. 382) und SCHUH et al. (2014, S. 433) quantifizieren die Größe des Lösungsraums der Netzwerkkonfiguration überschlagsmäßig beispielhaft auf  $10^{4.500}$  bzw.  $10^{256}$  Alternativen. Ein Vergleich mit der Anzahl an Atomen im Universum von ca.  $10^{80}$  verdeutlicht die Herausforderung, die optimale Netzwerkalternative zu identifizieren.

Bereits die Bewertung einer einzelnen Handlungsalternative stellt eine hoch komplexe Aufgabe dar (JACOB 2006, S. 6). Es gilt, zahlreiche Einflussgrößen, wie bspw. Lohnkosten, Materialkosten, Logistikaufwände sowie Migrationskosten für die Überführung des bestehenden Produktionsnetzwerks in die Zielstruktur hinsichtlich definierter Zielkriterien zu bewerten (vgl. MEYER (2008b, S. 35-93)). Diese Komplexität führt in der betrieblichen Praxis häufig zu unzulässigen Vereinfachungen bei der Bewertung von Netzwerkalternativen (MEYER 2008a, S. 125). Statt auf analytisch anspruchsvolle Verfahren wie bspw. Simulations- oder Optimierungsmodelle zurückzugreifen, werden simplifizierte Bewertungen in Tabellenkalkulationsprogrammen vorgenommen (KOHLER 2008, S. 3). Dies führt zu einer unzureichenden Bewertung von Handlungsalternativen und birgt damit die Gefahr von Fehlentscheidungen.

In der betrieblichen Praxis wird oftmals auf eine systematische Herleitung der im Rahmen der Bewertung und Auswahl zu betrachtenden Alternativen verzichtet (ERNST 2012, S. 2). Statt auf eine vollständige Durchsuchung des Lösungsraums zu setzen, bleibt der Prozess zur Erzeugung von Handlungsalternativen meist weitgehend der menschlichen Kreativität überlassen (HARRE 2006, S. 7). So werden häufig nur wenige Alternativen erzeugt, auf die sich die Diskussion im Entscheidungsfindungsprozess vorschnell konzentriert (EISENFÜHR & M. WEBER 2003, S. 74). Neben der Beeinträchtigung der Ergebnisqualität führt die fehlende systematische Alternativenentwicklung zu Defiziten im Lösungsprozess. Evident wird dies im Bekanntwerden neuer Handlungsalternativen in weit fortgeschrittenen Projekten zur Netzwerkkonfiguration, welche den bisher berücksichtigten Gestaltungsoptionen überlegen sind. Diese fehlende Prozesskonvergenz resultiert in erheblichen Projektverzögerungen. (MEYER 2008a, S. 123)

Aufgrund der Defizite bzgl. der Alternativenauswahl und -bewertung hat sich im akademischen Umfeld die Forderung nach dem Einsatz mathematischer Optimierungsmodelle zur Netzwerkkonfiguration etabliert (MEYER 2008a, S. 123; JUSTUS 2009, S. 92; KOHLER 2008, S. 3). Demgegenüber stehen zahlreiche in der Literatur angeführte Kritikpunkte. Zum einen wird die in vielen Fällen auf Kosten- und Gewinnkalkülen basierende, monokriterielle Alternativenentwicklung als unzureichend kritisiert (BEAMON 1998, S. 291; HARRE 2006, S. 6; SCHUH et al. 2008, S. 333). Zum anderen wird mathematischen Modellen eine fehlende Einbettung in die Unternehmensstrategie attestiert, was aufgrund der Schwierigkeit, qualitative Aspekte in quantitativen Modellen zu berücksichtigen, häufig unterlassen wird (HARRE 2006, S. 6). Die Vernachlässigung qualitativer Aspekte wie bspw. Flexibilität widerspricht der strategischen Motivation der Netzwerkkonfiguration (ERNST 2012, S. 4).

## 1 Einleitung

---

Zusammengefasst hindern die analytische und prozessuale Komplexität der Netzwerk-konfiguration global produzierende Unternehmen an der vollumfänglichen Realisierung der in Abschnitt 1.1 aufgeführten Potenziale GPN. Abbildung 1.1 bietet eine Übersicht zu den Defiziten der Netzwerkkonfiguration.

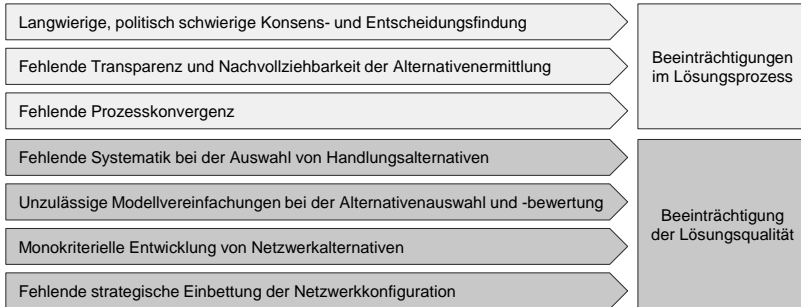


Abbildung 1.1: Defizite bei der Netzwerkkonfiguration

### 1.3 Zielsetzung

Ausgehend von der erläuterten Problemstellung leitet sich das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ab. Die Zielsetzung besteht in der Optimierung des Prozessablaufs der Netzwerkkonfiguration bei gleichzeitiger Erhöhung der erreichbaren Lösungsqualität. Mit diesem Beitrag sollen Entscheidungsträger in der industriellen Praxis dabei unterstützt werden, historisch gewachsene Produktionsnetzwerke neu zu gestalten, um die in Abschnitt 1.1 aufgezeigten Potenziale GPN besser auszuschöpfen. Unternehmen müssen daher befähigt werden, den analytischen und prozessualen Herausforderungen der Konfiguration GPN erfolgreich begegnen zu können.

Daraus ergibt sich die Aufgabe, eine Methode zur Konfiguration GPN zu entwickeln, in welcher die bestehenden Defizite aufgegriffen und beseitigt werden. Es gilt, dem Anspruch einer detaillierten Analyse eines sehr großen Lösungsraums ohne unzulässige Modellvereinfachungen bei gleichzeitiger Wahrung der unverzichtbaren Prozess-transparenz gerecht zu werden. Als handlungsleitende Forschungsfrage ist zu beantworten, wie eine Methode zur Konfiguration GPN zu konzipieren ist, die sowohl die Anforderungen aus analytischer als auch prozessualer Komplexität erfüllt.

### 1.4 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

Der Untersuchungsbereich der vorliegenden Arbeit gliedert sich in den Betrachtungsbereich GPN sowie den zu analysierenden Gestaltungsprozess der Netzwerkkonfiguration. In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt gemäß dieser Aufteilung die Festlegung wesentlicher Begrifflichkeiten sowie die Konkretisierung und Eingrenzung des zu untersuchenden Themenfeldes.

#### 1.4.1 Betrachtungsbereich globale Produktionsnetzwerke

Für die Beschreibung des Betrachtungsbereichs GPN wird eingangs die Systemgrenze festgelegt. Darüber hinaus erfolgt in Anlehnung an THOMAS (2013, S. 24-27) die Spezifizierung der einem Produktionsnetzwerk zugeordneten Aktivitäten sowie der zugrunde gelegten geographischen Verteilung der Produktionsstandorte in einem Netzwerk. Auf Basis der getroffenen Festlegungen wird abschließend die Definition für den Begriff *Globales Produktionsnetzwerk* eingeführt.

##### 1.4.1.1 Festlegung der Systemgrenze

Für die Festlegung der Systemgrenze wird auf die Klassifizierung unterschiedlicher Netzwerktypen nach RUDBERG & OLHAGER (2003) zurückgegriffen. Anhand der Unterscheidungsmerkmale *Anzahl der Organisationen im Netzwerk* und *Anzahl der Produktionsstandorte je beteiligter Organisation* spannen Sie die in folgender Abbildung 1.2 dargestellte Matrix auf.

Anzahl der Organisationen im Netzwerk	mehrere	<b>Supply Chain</b> (ein Standort, mehrere Organisationen)	<b>Unternehmensübergreifendes Netzwerk</b> (mehrere Standorte, mehrere Organisationen)
	eins	<b>Werk</b> (ein Standort, eine Organisation)	<b>Unternehmensinternes Netzwerk</b> (mehrere Standorte, eine Organisation)
		eins	mehrere

**Anzahl der Produktionsstandorte je Organisation**

Abbildung 1.2: Klassifizierung unterschiedlicher Netzwerktypen (Quelle: in Anlehnung an RUDBERG & OLHAGER (2003, S. 35))

## 1 Einleitung

---

Das *Werk* als einziger Standort eines Unternehmens bildet die einfachste Form einer Produktionseinheit. Das *unternehmensinterne Netzwerk* umfasst hingegen mehrere Standorte einer Organisation. Ein Netzwerk, das aus mehreren Organisationen und einem bzw. wenigen Produktionsstandorten je beteiligter Organisation besteht, wird als *Supply Chain* bezeichnet. Das *unternehmensübergreifende Netzwerk* stellt eine Kombination einer Supply Chain und einem unternehmensinternen Netzwerk dar.

Da sich ein unternehmensinternes Produktionsnetzwerk unter vollständiger finanzieller Kontrolle eines Unternehmens befindet, kann uneingeschränkt über die Ausgestaltung des Netzwerks entschieden werden. Demgegenüber erfordert die Planung einer Supply Chain, mit lediglich einem Standort je Unternehmen, schwerpunktmäßig die Koordination der Beziehungen zwischen einzelnen Unternehmen. Für die Konfiguration eines unternehmensübergreifenden Netzwerks ist folglich sowohl die Abstimmung zwischen Organisationen als auch die individuelle Konfiguration interner Produktionsnetzwerke wesentlich. Die Ergebnisse aus dem Abstimmungsprozess sind hierbei als Rahmenbedingungen für die Netzwerkgestaltung der einzelnen Unternehmen zu betrachten.

Die in Abschnitt 1.2 dargelegte Problemstellung zeigt ausschließlich Defizite in Bezug auf die Konfiguration unternehmenseigener Produktionsnetzwerke auf. Dementsprechend ist für das Erreichen der aus der Problemstellung abgeleiteten Zielsetzung der Fokus auf die Netzwerkgestaltung und nicht auf das bspw. von BREDOW (2014) fokussierte Zusammenspiel mehrerer Organisationen zu legen. Dementsprechend wird für den Fortgang der vorliegenden Arbeit eine Einschränkung auf die Gestaltung unternehmensinterner Netzwerke vorgenommen, die sich im direkten Einflussbereich eines fokalen Unternehmens befinden.

### 1.4.1.2 Aktivitäten in einem globalen Produktionsnetzwerk

Die Spezifizierung des Betrachtungsbereichs der vorliegenden Arbeit erfordert die Festlegung, welche Unternehmensaktivitäten bei der Netzwerkgestaltung zu berücksichtigen sind. Die Mehrheit der Autoren beschränkt diese auf den bloßen Leistungserstellungsprozess (THOMAS 2013, S. 26). Weitere Aktivitäten, wie bspw. die Entwicklung oder der Einkauf, werden nicht berücksichtigt. Um dennoch eine stimmige Ausrichtung aller für die Herstellung eines Produkts erforderlichen Aktivitäten zu gewährleisten, wird die Formulierung einer globalen Produktionsstrategie gefordert. Diese muss neben dem Leistungserstellungsprozess die Entwicklung, den Einkauf, die Distribution sowie den



Kundenservice inkl. Reparaturleistungen umfassen (SKINNER 1996, S. 13). Aus dieser übergeordneten Strategie resultieren Vorgaben, die im Rahmen der Netzwerkgestaltung zu berücksichtigen sind (THOMAS 2013, S. 41). Analog zur Mehrheit der Autoren erfolgt im Hinblick auf die Netzwerkgestaltung daher eine Beschränkung der betrachteten Produktionsaktivitäten auf den bloßen Leistungserstellungsprozess. Die Formulierung der globalen Produktionsstrategie stellt einen der Netzwerkgestaltung vorgelagerten Schritt dar und ist folglich kein Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

### 1.4.1.3 Geographische Verteilung der Wertschöpfungsaktivitäten

Die relevanten Einflussfaktoren für die Netzwerkgestaltung hängen maßgeblich von der geographischen Verteilung der Wertschöpfungsaktivitäten ab. Wird die Wertschöpfung bspw. vollständig auf einen Staat konzentriert, so kann im Gestaltungsprozess von einer Berücksichtigung der Zollgesetzgebung abgesehen werden. Dementsprechend ist festzulegen, welche Art der geographischen Verteilung der Aktivitäten in einem Produktionsnetzwerk in die folgenden Betrachtungen einzubeziehen ist.

MILTENBURG (2009, S. 6185-6186) führt für die Typisierung der geographischen Verteilung der Standorte in einem Produktionsnetzwerk analog zu SHI & GREGORY (1998, S. 202-203) die Kategorien *national*, *regional*, *multinational* und *weltweit* ein. Lediglich eine nationale Verteilung der Produktionsstandorte erlaubt die Vernachlässigung von Aspekten internationalen Handels. Bei der Gestaltung von Netzwerken aus den anderen Kategorien spielen diese Aspekte hingegen eine wesentliche Rolle. In der Konsequenz ist im Hinblick auf die Netzwerkgestaltung eine Unterscheidung zwischen einer nationalen und internationalen Verteilung von Produktionsstandorten ausreichend. Wie einleitend dargelegt, birgt die Internationalisierung der Wertschöpfung wesentliche Potenziale für die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen. Dementsprechend werden im folgenden Produktionsnetzwerke mit einer globalen Verteilung der Standorte betrachtet. In Anlehnung an SHI (2005, S. 100-101) wird das Wort *global* in diesem Zusammenhang gleich einer internationalen Verteilung von Produktionsstandorten gesetzt, ohne eine weitere Detaillierung der Verteilungsart vorzunehmen.

### 1.4.1.4 Ableitung der Begriffsdefinition globales Produktionsnetzwerk

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargelegte Beschreibung des Betrachtungsbereichs sowie die vorgenommenen Einschränkungen führen auf die Verwendung der

## 1 Einleitung

---

auf SHI (2005, S. 100) und THOMAS (2013, S. 27) zurückgehenden Definition eines GPN in der vorliegenden Arbeit: *Ein globales Produktionsnetzwerk besteht aus mindestens zwei geographisch verteilten Standorten eines Unternehmens, die primär Fertigungs- und Montagevorgänge durchführen.* Im Folgenden werden die Begriffe *Wertschöpfungsnetzwerk* und *Globales Produktionsnetzwerk* synonym eingesetzt.

### 1.4.2 Gestaltungsprozess Netzwerkkonfiguration

Zur Spezifizierung des Gestaltungsprozesses der Netzwerkkonfiguration wird eingangs eine definitorische Abgrenzung des Begriffs vorgenommen. In den darauf folgenden Abschnitten erfolgt die Konkretisierung der getroffenen begrifflichen Festlegung.

#### 1.4.2.1 Begriffsdefinition Netzwerkkonfiguration

In Anlehnung an PORTER (1986, S. 17) wird unter dem Begriff der Netzwerkkonfiguration in der vorliegenden Arbeit der Gestaltungsprozess verstanden, in dem festgelegt wird, an welchem Ort welcher Teil der Wertschöpfung eines Unternehmens stattfindet. In der Literatur wird der Begriff der Netzwerkkonfiguration neben dieser Auffassung als Entscheidungsprozess auch für das Ergebnis der Entscheidung, d. h. als Bezeichnung für eine bestimmte Gestaltungsalternative eingesetzt (NEUNER 2009, S. 8). Zur strikten Unterscheidung wird im Folgenden der Prozess als *Netzwerkkonfiguration* und das daraus resultierende Ergebnis als *Netzwerk-, Handlungs- oder Standortstrukturalternative* bezeichnet. Die angeführte Begriffsdefinition erfordert die Konkretisierung dessen, was im Rahmen der Netzwerkkonfiguration zu entscheiden ist. Ausgehend von einer Festlegung der erforderlichen Betrachtungstiefe werden in den folgenden Abschnitten daher die zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen abgeleitet.

#### 1.4.2.2 Festlegung der Betrachtungstiefe

Die Festlegung der Betrachtungstiefe, d. h. der zu wählenden Auflösung des Entscheidungsproblems, kann auf Basis einer produktionsressourcenbezogenen, hierarchischen Gliederung der Produktion erfolgen. H.-P. WIENDAHL et al. (2007, S. 785) stellen aufbauend auf den Arbeiten von NYHUIS et al. (2005) und WESTKÄMPER (2006) ein hierfür geeignetes Modell zur Verfügung (vgl. Abbildung 1.3).

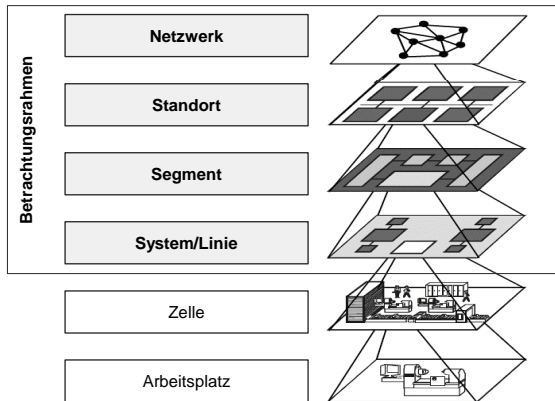


Abbildung 1.3: Ressourcenorientiertes Ebenenmodell einer Produktion (Quelle: in Anlehnung an H.-P. WIENDAHL et al. (2007, S. 785))

In diesem Ebenenmodell der Produktion bildet der *Arbeitsplatz* die unterste und damit detaillierteste Betrachtungsebene. Mehrere Arbeitsplätze bilden eine sog. *Zelle*. Aus der Verknüpfung mehrerer Zellen resultiert auf nächsthöherer Ebene ein *System* bzw. eine *Linie*. In dieser sind die für die Herstellung eines Zwischen- oder Endprodukts erforderlichen Prozesse vereinigt. Ein *Segment* wiederum enthält mehrere Linien, die nach der Art der Produktionstätigkeit zusammengefasst sind. Ein *Standort* besteht aus mehreren gleich- oder verschiedenartigen Segmenten. Die Produktionsstandorte eines Unternehmens stehen i. d. R. durch Material- und Informationsflüsse untereinander in Beziehung und bilden die Knoten eines *Produktionsnetzwerks*. Dieses repräsentiert die höchste Strukturierungsebene.

Da in einer Produktionslinie alle für die Herstellung eines Zwischen- oder Endprodukts notwendigen Prozesse zusammengefasst sind, können dieser relevante Eigenschaften, wie bspw. die Fähigkeit gewisse Produkte herzustellen oder produktspezifische Produktionskapazitäten, zugewiesen werden. Bei einer weiteren Untergliederung einer Produktionslinie in Zellen rücken Fragestellungen wie bspw. die Anordnung einzelner Anlagen oder die Linienausstattung in den Fokus, welche keinen Einfluss auf die Netzwerkgestaltung haben. Die gewählte Betrachtungstiefe des Entscheidungsproblems der Netzwerkkonfiguration wird folglich auf die obersten vier Ebenen des vorgestellten Modells festgelegt. Die Produktionslinie bildet die unterste Betrachtungsebene, welche im Rahmen der Netzwerkkonfiguration nicht weiter aufgelöst wird.

### 1.4.2.3 Ableitung der zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen

Ausgehend von der Definition sowie der Festlegung der Betrachtungstiefe lassen sich die zu berücksichtigenden Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration ableiten. Auf den ausgewählten Detaillierungsebenen eines Netzwerks Standort, Segment und System/Linie können Elemente hinzugefügt oder entfernt werden. Dementsprechend bilden die Eröffnung bzw. Schließung von Produktionslinien, Segmenten und Standorten relevante Entscheidungsdimensionen. Darüber hinaus ist im Rahmen der Netzwerkkonfiguration definitionsgemäß die geographische Verteilung der Wertschöpfung vorzunehmen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, sind drei Entscheidungsdimensionen erforderlich. Erstens ist die Lage der Standorte im Sinne der Festlegung der Weltregion zu bestimmen und Segmente sowie Produktionslinien sind Standorten zuzuweisen. Zweitens ist die Kapazität der einzelnen Standorte zu definieren und drittens ist die Zuordnung von Zwischen- oder Endprodukten zu Standorten vorzunehmen. Produktionslinien bilden aufgrund der gewählten Betrachtungstiefe die Letztelemente, d. h. die kleinsten unterscheidbaren Objekte, eines Produktionsnetzwerks. Die Produktionskapazität eines Standorts sowie das zugewiesene Produktportfolio resultiert in der Konsequenz aus der Aggregation der Eigenschaften der dem Standort zugehörigen Produktionslinien. Die Dimensionierung der Kapazitäten von Produktionslinien sowie die Zuweisung von Zwischen- oder Endprodukten zu Linien bilden daher die relevanten Entscheidungsdimensionen. Im Sinne der Einbettung des Systems Produktionsnetzwerk in dessen Umwelt ist darüber hinaus die Zuordnung der Standorte zu den Quellen und Senken des Materialflusses, d. h. zu Beschaffungs- und Absatzmärkten, vorzunehmen. Die abschließende Detaillierung der Entscheidungsdimensionen erfolgt im Rahmen der ausführlichen Modellbildung zur Netzwerkkonfiguration.

In der Literatur werden die Entscheidungsdimensionen zur Festlegung der Bezugsart für Zwischen- und Endprodukte sowie zur Auswahl von Fertigungstechnologien mitunter der Netzwerkkonfiguration zugewiesen. Diese Dimensionen werden explizit aus dem Betrachtungsrahmen der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen. Es wird die Auffassung vertreten, dass die Festlegung der Bezugsart einen der Netzwerkkonfiguration vorgelagerten Schritt darstellt. Die Auswahl der Fertigungstechnologien ist gemäß der Ausführungen aus Abschnitt 1.4.2.2 der Ebene einer Zelle zuzuweisen und dementsprechend kein Bestandteil der Netzwerkkonfiguration. In Tabelle 1.1 sind die im Rahmen der vorliegenden Arbeit berücksichtigten Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration abschließend zusammengefasst.

*Tabelle 1.1: Berücksichtigte Entscheidungsdimensionen der Netzwerkconfiguration*

Betrachtungsebene	Entscheidungsdimension
Standort	Eröffnung/Schließung von Standorten
	Festlegung der Lage (Weltregion) der Standorte
	Zuordnung von Beschaffungs- und Absatzmärkten zu Standorten
Segment	Eröffnung/Schließung von Segmenten
	Zuordnung von Segmenten zu Standorten
System/Linie	Eröffnung/Schließung von Produktionslinien
	Zuordnung von Produktionslinien zu Segmenten und Standorten
	Zuordnung von Zwischen- und Endprodukten zu Produktionslinien
	Dimensionierung der Kapazität der Produktionslinien

## 1.5 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel gegliedert. Einleitend wurden die Ausgangssituation und die Motivation dargelegt und der Bedarf zur Entwicklung einer Methode zur Konfiguration GPN aufgezeigt. Mit der Festlegung wesentlicher Begrifflichkeiten und erforderlicher Einschränkungen wurde der Untersuchungsbereich spezifiziert. Im nachfolgenden Kapitel 2 wird das der vorliegenden Arbeit zugrundeliegende theoretische Fundament erläutert. Dieses gliedert sich in die Grundlagen der Entscheidungstheorie sowie der multikriteriellen Optimierung. Das dritte Kapitel dient der Darlegung wesentlicher wissenschaftlicher Erkenntnisse auf dem Gebiet der Konfiguration GPN sowie der Ableitung des vorhandenen Forschungsdefizits.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten drei Kapitel erfolgt in Kapitel 4 die Konzeption der Methode zur Konfiguration GPN. Der Lösungsansatz sieht die Einbettung eines multikriteriellen Optimierungsmodells in den Entscheidungsfindungsprozess der Netzwerkconfiguration vor. Das fünfte Kapitel ist der Modellbildung sowie der Formulierung des multikriteriellen Optimierungsmodells zur Netzwerkconfiguration gewidmet. Die strategische Ableitung der zu verfolgenden Zielgrößen sowie die umfangreiche Berücksichtigung gestaltungsrelevanter Restriktionen bilden hierbei die Schwerpunkte. In Kapitel 6 erfolgt die Beschreibung der einzelnen Phasen der Methode zur Konfiguration GPN. Die Vorstellung der Ergebnisse aus der Anwendung der entwickelten Methode in der unternehmerischen Praxis bildet den Kern des siebten Kapitels. Anhand eines realen

# 1 Einleitung

---

Fallbeispiels mit dem Ziel der Optimierung des GPN für Verbrennungsmotoren eines Automobilherstellers wird die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methode demonstriert. Ziel von Kapitel 8 ist die Bewertung der entwickelten Methode. Hierzu werden die Erfüllung der formulierten Zielsetzung kritisch reflektiert, die Wirtschaftlichkeit der Methodenanwendung bewertet und die Grenzen des Lösungsansatzes diskutiert. Die vorliegende Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Konfiguration GPN. In Abbildung 1.4 ist der Aufbau der Arbeit visualisiert.

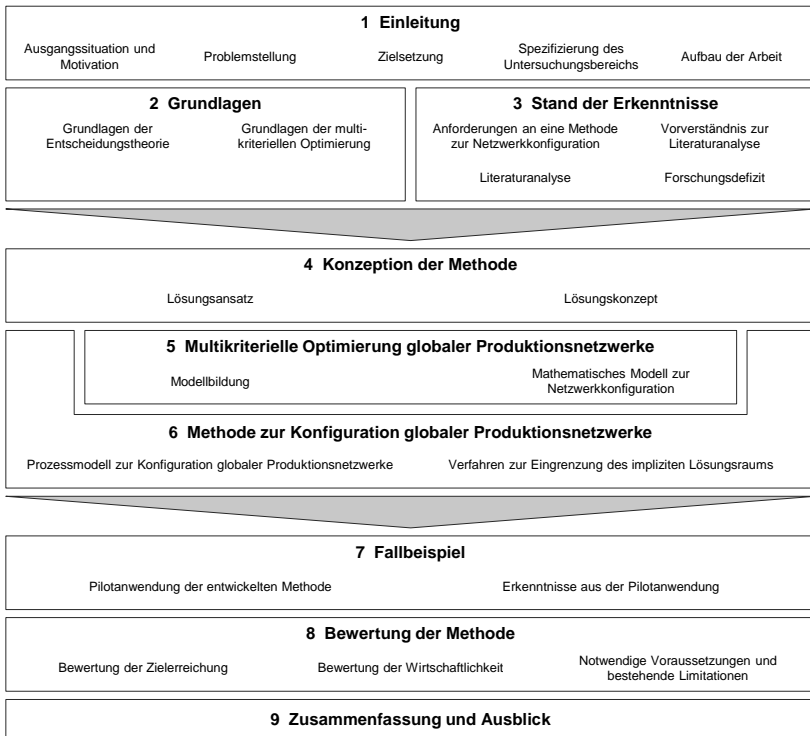


Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis der nachfolgenden Methode zur Konfiguration GPN erforderlichen theoretischen Grundlagen gelegt. Diese umfassen die beiden Themenbereiche Entscheidungstheorie und multikriterielle mathematische Optimierung.

### 2.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie

Gemäß der eingangs dargestellten Definition wird bei der Konfiguration GPN festgelegt, an welchem Ort welcher Teil der Wertschöpfung eines Unternehmens stattfindet (vgl. Abschnitt 1.4.1.4). Bei der Netzwerkkonfiguration handelt es sich daher um einen Entscheidungsprozess. Die Erkenntnisse aus dem Gebiet der Entscheidungstheorie bilden damit das theoretische Fundament einer Methode zur Konfiguration GPN. In der Literatur wird eine Unterscheidung zwischen deskriptiver und präskriptiver Entscheidungstheorie vorgenommen. Während erstere zu beschreiben versucht, wie in der Realität Entscheidungen getroffen werden, zielt die präskriptive Entscheidungstheorie auf das Bereitstellen einer abstrahierten Logik zum Treffen rationaler Entscheidungen ab (LAUX et al. 2014, S. 4). Eine Methode zur Konfiguration GPN ist dementsprechend der zweiten Kategorie zuzuordnen. Die nachfolgenden Ausführungen fokussieren sich daher auf die Darstellung wesentlicher Erkenntnisse aus dem Bereich der präskriptiven Entscheidungstheorie.

#### 2.1.1 Wesentliche Begrifflichkeiten zur Entscheidungstheorie

Nach WILZ (2010, S. 63) gibt es keine einzige und allumfassende Definition für das Phänomen der Entscheidung. Obwohl die Begriffe *Entscheidung*, *Entscheidungsproblem* und *Entscheidungsprozess* alltagsweltlich verständlich sind, ist die eindeutige Formulierung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit vertretenen Verständnisses für die einzelnen Begriffe unerlässlich.

## 2 Grundlagen

---

GRÜNIG & R. KÜHN (2009, S. 7) verstehen unter einem *Entscheidungsproblem* „eine Abweichung zwischen einer Sollvorstellung und dem Istzustand (...), zu deren Bewältigung mindestens zwei Varianten offenstehen“. Während JUNGERMANN et al. (2010, S. 4) eine *Entscheidung* als Prozess auffassen, „dessen wesentliche Komponenten Beurteilungen (...) und Wahlen (...) sind“, vertreten LAUX et al. (2014, S. 3) und DINKELBACH & KLEINE (1996, S. 1) ein engeres Begriffsverständnis und definieren Entscheidung als mehr oder weniger bewusste Auswahl einer aus mehreren Handlungsalternativen. Für die weiteren Ausführungen ist eine Unterscheidung zwischen dem Moment der Alternativauswahl und den dafür erforderlichen vorbereitenden Schritten essentiell. Im Folgenden meint der Begriff des *Entscheidungsprozesses* daher den Weg hin zu einer Alternativauswahl und die Entscheidung beschreibt die Wahl selbst.

### 2.1.2 Ablauf von Entscheidungsprozessen

Die präskriptive Entscheidungstheorie stellt allgemeine Ablaufbeschreibungen zu Entscheidungsprozessen bereit. Diese sind vom Kontext expliziter Entscheidungen abstrahiert und daher allgemeingültig anwendbar (LAUX et al. 2014, S. 4). Nach JUNGERMANN et al. (2010, S. 4) kann entweder die Erkenntnis, dass zwei oder mehr Optionen zur Auswahl stehen oder die Feststellung einer Diskrepanz zwischen Soll- und Ist-Zustand mit der daraus resultierenden Notwendigkeit zur Suche von Handlungsoptionen, den Prozessbeginn markieren. Das Prozessende kann in der Auswahl einer Alternative, deren Realisierung bzw. der retrospektiven Bewertung der Entscheidung bestehen. In der Literatur stehen vielfältige Ablaufmodelle zum Entscheidungsprozess zur Verfügung. Abbildung 2.1 zeigt eine Übersicht wesentlicher Modelle.

Die verschiedenen Ablaufbeschreibungen unterscheiden sich sowohl bezüglich der gewählten Phasenanzahl, dem Betrachtungsumfang als auch der Terminologie. Die Synthese der vorhandenen Prozessmodelle resultiert in einem achtstufigen, kontextunabhängigen Ablaufmodell für Entscheidungsprozesse. Der erste Schritt besteht in der *Identifikation eines Handlungsbedarfes* durch die Beobachtung einer Abweichung des Ist-Zustandes von einem gewünschten Zustand (GRÜNIG & R. KÜHN 2009, S. 41). Auf dieser Basis erfolgt die konkrete Problembeschreibung (LAUX et al. 2014, S. 13). Die *Definition der Aufgabenstellung* hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidung, da bereits in diesem Schritt bewusst oder unbewusst einige Handlungsalternativen ausgeschlossen und andere favorisiert werden (MEIXNER & HAAS 2012, S. 79-80). Im Rahmen der *Präzisierung des Zielsystems* gilt es, aus Wünschen, Bedürfnissen



## 2.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie

Anregung	Suche		Entscheidungsfindung		Durchsetzung	
	Ermittlung des Soll	Ermittlung denkbarer Aktionen	Ermittlung der Konsequenzen der Aktionen	Auswahl der Aktionen		
<b>ADAM 1983</b>	Ermittlung des Ist			Entscheidung		
<b>BRAUCHLIN &amp; HENNE 1995*</b>	Charakterisierung der Situation			Auswahl der Aktionen	Entscheidung	
	Zielformulierung und Problemdefinition	Bereitstellung rel. Informationen	Bestimmung Entscheidungsalternativen und -kriterien	Festlegung Entscheidungsregeln	Realisierung und Kontrolle	
<b>GRÜNG &amp; R. KUHN 2009</b>	Problemanalyse sowie Erarbeitung und Bewertung von Problemlösungsvarianten					
<b>HEINEN 1990</b>	Anregung		Suche	Auswahl	Vollzug	
<b>KLEIN &amp; SCHOLL 2012</b>	Problematstellung und -definition		Alternativen-ermittlung	Bewertung und Auswahl		
	Problemformulierung	Präzisierung des Zielsystems		Auswahl einer Alternative	Entsch. in der Realisationsphase	
<b>MEIXNER &amp; HAAS 2012</b>	Formulierung des Problems	Zielfestlegung	Suche nach Handlungsalternativen	Entscheiden	Kontrolle	
	Problem	Suche	Ableitung	Entscheidung	Kontrolle	
<b>PFOHL &amp; BRAUN 1981</b>		Zielbildung	Erarbeitung Erschließung von Handlungsmöglichkeiten	Aufstellung Entscheidungsregel und Entscheidung		
	Problemformulierung	Informationsbeschaffung	Alternativen-generierung	Vergleich und Bewertung	Realisierung	
<b>SCHREYÖGG 2008</b>	Definition Aufgabenstellung	Präzisierung Zielsystem	Datenerhebung	Bewertung	Realisierung	
<b>Synthese</b>	Identifikation Handlungsbedarf	Definition Aufgabenstellung	Präzisierung Zielsystem	Entwicklung Handlungsalternativen	Bewertung	Auswahl

\*) Reihenfolge der Phasen im Vergleich zum Original angepasst

Abbildung 2.1: Ablauf von Entscheidungsprozessen

## 2 Grundlagen

---

und Neigungen auf das zu schließen, was bei einem Wahlproblem erreicht werden soll (SCHNEIDER 1995, S. 22). Die anschließende Phase der *Datenerhebung* dient der Bereitstellung entscheidungsrelevanter Informationen wie bspw. Prognosen über Umweltdaten (GÖBEL 2014, S. 39). Auf dieser Grundlage erfolgt die *Entwicklung von Handlungsalternativen* sowie die *Bewertung* der Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich der zugrunde liegenden Ziele (KLEIN & SCHOLL 2012, S. 14-15). Zudem ist zu untersuchen, ob die vorgesehenen Lösungen Folgeprobleme verursachen, die zu berücksichtigen sind (BRAUCHLIN & HEENE 1995, S. 119). In der darauf folgenden Phase der *Auswahl* wird aus der Menge der definierten und bewerteten Alternativen die im Hinblick auf das angestrebte Ziel beste Option selektiert (SCHREYÖGG 2008, S. 56). Mit der Entschlussfassung ist die Willensbildung abgeschlossen und es folgt die Willensdurchsetzung mit der *Realisierung* der gewählten Handlungsalternative (HEINEN 1990, S. 46).

Das vermeintliche Fehlen einer oder mehrerer dieser acht Phasen in einem bekannten Modell aus der Literatur ist nicht gleichbedeutend mit der Negierung dieser Phase durch den jeweiligen Autor. Mit dem Verzicht auf den Schritt der Datenerhebung verneinen LAUX et al. (2014) bspw. nicht die Notwendigkeit dieser Aufgabe, ordnen sie aber gleichwohl in der Bedeutung den anderen Phasen unter. Abschließend sei angemerkt, dass die dargestellte Reihenfolge der Schritte keine starre Abfolge ausdrückt, die in einem Entscheidungsprozess linear vom Anfang bis zum Ende zu durchlaufen ist (PFOHL & BRAUN 1981, S. 104). Ergeben sich im Verlauf der Problembearbeitung Erkenntnisse, die in bereits durchlaufenen Teilaufgaben berücksichtigt werden sollen, so resultiert dies in Rückkopplungen im Prozess (ADAM 1993, S. 17).

### 2.1.3 Multikriterielle Entscheidungssituationen

Die Auswahl einer Handlungsoption kann nur selten an einem einzigen Ziel festgemacht werden (HWANG & MASUD 1979, S. 1). Entscheidungsträger müssen i. d. R. gleichzeitig eine Kombination aus technischen, wirtschaftlichen, ethischen, politischen, rechtlichen und sozialen Kriterien berücksichtigen (R. V. RAO 2007, S. 5). Entscheidungsmodelle mit mehreren Zielsetzungen, häufig auch als multikriterielle Entscheidungsmodelle oder Vektoroptimierungsmodelle bezeichnet, beschreiben die Realität daher im Allgemeinen besser als monokriterielle Modelle (BAMBERG et al. 2013, S. 45).

Verschiedene Ziele können i. d. R. nicht unabhängig voneinander betrachtet werden (ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002, S. 17). In der Literatur hat sich die Unter-

## 2.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie

---

scheidung der drei Zielbeziehungstypen *indifferent*, *konkurrierend* und *komplementär* durchgesetzt (BAMBERG et al. 2013, S. 49). Hat die Verbesserung einer Zielgröße keinen Einfluss auf die Ausprägung einer anderen Zielgröße, besteht zwischen den beiden Zielen eine *indifferente* Beziehung (ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002, S. 17). Eine *komplementäre* Beziehung zwischen Zielen besteht, falls die Verbesserung einer Zielgröße gleichzeitig zur besseren Erfüllung einer anderen beiträgt. Führt die Verbesserung eines Ziels hingegen zur Verschlechterung des Erfüllungsgrades einer anderen Zielgröße, so wird die Zielbeziehung als *konkurrierend* bzw. *konfliktär* bezeichnet (LAUX et al. 2014, S. 45). Der Beziehungstyp zwischen zwei Zielen muss dabei nicht über den gesamten zu analysierenden Wertebereich gleich bleiben. In diesem Fall wird von partieller Neutralität, Konkurrenz und Komplementarität gesprochen (ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002, S. 17).

In realen Entscheidungssituationen bei mehrfachen Zielsetzungen stehen Zielgrößen i. d. R. zumindest partiell in Konflikt. In dieser Konstellation erfordert das Treffen einer Entscheidung die Abwägung der konkurrierenden Ziele (BAMBERG et al. 2013, S. 49-52). Wirkt sich die Verbesserung einer Zielgröße negativ auf den Erfüllungsgrad eines weiteren Zieles aus, ist unmittelbar einsichtig, dass nicht alle Zielgrößen gleichzeitig ihren optimalen Wert annehmen können. Es ist lediglich die Angabe effizienter Lösungen, die in der Literatur auch als *pareto-optimal* bzw. *undominiert* bezeichnet werden, möglich (BAMBERG et al. 2013, S. 50; BALLESTERO & ROMERO 1998, S. 7). Eine effiziente Lösung zeichnet sich dadurch aus, dass keine andere Lösung existiert, die bzgl. wenigstens einer Zielgröße einen besseren Wert aufweist, ohne gleichzeitig in mindestens einer anderen Zielgröße einen niedrigeren Erfüllungsgrad zu besitzen (ZELENY 2010, S. 250). Laut HWANG & MASUD (1979, S. 20) ist die Menge aller effizienten Lösungen für Vektroptimierungsprobleme i. d. R. sehr groß. Die Auswahl der sog. bevorzugten Lösung aus dieser *pareto-optimalen* Menge muss der Entscheider daher auf Basis von Kriterien vornehmen, welche die vorhandenen Zielgrößen ergänzen. Entscheidungsprobleme mit mehreren Zielsetzungen, von denen zwei mindestens partiell konkurrierend sind, erfordern folglich die Angabe einer sog. *Artenpräferenzrelation*. Darunter ist eine Vorschrift zur Priorisierung bzw. Gewichtung der einzelnen Ziele zu verstehen (ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002, S. 16).

Das *Multi-criteria Decision Making* (MCDM) beschäftigt sich mit der Strukturierung und Lösung derart gelagerter Entscheidungsprobleme (ARULDOSS et al. 2013, S. 31). Das *Multi-objective Decision Making* (MODM) und *Multi-attribute Decision Making* (MADM) bilden die beiden Teilbereiche des MCDM (R. V. RAO 2007, S. 5-6). Während

## 2 Grundlagen

---

unter Attributen (engl. *attributes*) die Charakteristika oder Leistungsparameter einer Handlungsalternative verstanden werden, beschreiben Ziele (engl. *objectives*) die vom Entscheidungsträger gewünschte Richtung, in die sich etwas entwickeln soll (HWANG & MASUD 1979, S. 12-13). Im Hinblick auf das MODM steht die Entwicklung der besten Handlungsalternative im Zentrum. Die Aufgabe besteht darin, die Freiheitsgrade einer Entscheidung so zu wählen, dass ein aus mehreren Größen bestehendes Zielsystem den optimalen Wert auf Basis der angegebenen Artenpräferenzrelation annimmt. Dabei sind evtl. vorhandene Einschränkungen, bspw. bzgl. der Kombinierbarkeit von Ausprägungen verschiedener Freiheitsgrade, zu berücksichtigen. (HWANG & YOON 1981, S. 3)

Während im Rahmen des MODM Vektoroptimierungsmodelle mit einem kontinuierlichen Entscheidungsraum betrachtet werden (R. V. RAO 2007, S. 6), steht beim MADM die Auswahl einer Lösung aus diskreten, vorbestimmten Handlungsalternativen im Fokus (TRIANANTAPHYLLOU 2000, S. 1). Im Gegensatz zum MODM werden die Attribute beim MADM nicht als Entscheidungsvariablen aufgefasst, die es zu bestimmen gilt. Diese sind bereits festgelegt und implizieren damit einen Zielerfüllungsgrad. Die beiden Bereiche des MCDM beschreiben daher zwei unterschiedliche Aspekte der Entscheidungsfindung: MADM beschreibt die Auswahl bzw. Bewertung von Handlungsalternativen und MODM deren Entwicklung (HWANG & YOON 1981, S. 3).

### 2.2 Grundlagen der multikriteriellen Optimierung

Ansätze zur Lösung von MODM Problemen erfordern aufgrund des zugrundeliegenden kontinuierlichen Lösungsraums den Einsatz mathematischer Modelle (TRIANANTAPHYLLOU 2000) und sind daher dem Gebiet des *Operations Research* (OR) zuzuordnen. SUHL & MELLOULI (2009, S. 5) beschreiben OR als „*Entwicklung und (...) Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung in Unternehmen und Organisationen*“.

#### 2.2.1 Grundlagen der mathematischen Optimierung

Optimierung ist als die Ermittlung derjenigen zulässigen Handlungsalternative aus einer Menge von Alternativen definiert, die ein vorgegebenes Ziel am besten erfüllt. Existieren nur wenige Handlungsoptionen, so kann das Optimum durch vollständige Enumeration, den Vergleich aller Möglichkeiten, ermittelt werden. Liegt eine Vielzahl an Alternativen

vor, so ist diese Vorgehensweise aufwandsbedingt nicht geeignet. Stattdessen werden alle Handlungsalternativen implizit in einem Optimierungsmodell erfasst und mit einem Algorithmus die optimale Alternative berechnet. (WERNERS 2013, S. 8-9)

### 2.2.1.1 Formulierung mathematischer Optimierungsmodelle

Unter einem Modell wird allgemein ein vereinfachtes Abbild eines realen Systems oder Problems verstanden. Im Rahmen des OR kommen vorwiegend Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodelle und Simulationsmodelle zum Einsatz. Bei einem Optimierungsmodell handelt es sich um die formale Darstellung eines Entscheidungs- oder Planungsproblems, für das mit geeigneten Verfahren Lösungsvorschläge ermittelt werden können. Im Gegensatz dazu sind Simulationsmodelle häufig sehr komplexe Optimierungsmodelle, die nicht mit analytischen Verfahren gelöst werden können. Sie können daher lediglich zur Untersuchung der Konsequenzen einzelner Handlungsalternativen, jedoch nicht zu deren Ermittlung eingesetzt werden. (DOMSCHKE et al. 2015, S. 3-4)

Da der Einsatz von Simulationsmodellen das Vorliegen diskreter Handlungsalternativen erfordert, eignen sich diese primär nicht für das Lösen von MODM-Problemen. Die folgenden Ausführungen beschränken sich daher auf Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodelle. Die Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells erfordert die Identifikation der drei Hauptobjekte *Variablen*, *Zielfunktion* und *Nebenbedingungen* (KALLRATH 2013, S. 9). *Variablen*, häufig auch als Entscheidungsvariablen bezeichnet, bilden die Freiheitsgrade einer Entscheidungssituation ab (S. S. RAO 2009, S. 6). Dem gegenüber stehen die Parameter, die als bekannt vorausgesetzt werden und durch den Entscheidungsträger nicht beeinflusst werden können (EISELT & SANDBLOM 2007, S. 48). Die *Zielfunktion* beschreibt die Wünsche des Entscheiders und ist abhängig von den Variablen (EISELT & SANDBLOM 2007, S. 49). Im Rahmen der mathematischen Optimierung gilt es demnach, den Wert der Zielfunktion durch geeignete Wahl der Variablen je nach Zielsetzung zu minimieren bzw. zu maximieren (BENKER 2003, S. 115). Anhand von *Nebenbedingungen* in der Form von Gleichungen und Ungleichungen werden Restriktionen formuliert, denen die Entscheidungsvariablen genügen müssen (SUHL & MELLOULI 2009, S. 20). Jede Alternative, welche diese Bedingungen erfüllt, wird als zulässige Lösung bezeichnet (JARRE & STOER 2004, S. 9).

Mathematische Optimierungsmodelle können nach verschiedenen Kriterien kategorisiert werden. Auf oberster Ebene lassen sich, wie bereits eingeführt, Modelle mit einer und

## 2 Grundlagen

---

mehreren Zielsetzungen unterscheiden. Das allgemeine Vektoroptimierungsproblem mit  $k$  Zielgrößen hat die folgende Form (COLLETTE & SIARRY 2004, S. 18):

$$\begin{aligned} \min \quad & \vec{f}(\vec{x}) \quad \text{u. d. N.} \quad \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \quad \text{und} \quad \vec{h}(\vec{x}) = 0 \\ \text{mit} \quad & \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m, \vec{h}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^p; \quad k, m, n, p \in \mathbb{N} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Der Vektor  $\vec{x}$  repräsentiert die Menge der Entscheidungsvariablen. Während  $\vec{f}(\vec{x})$  die Zielfunktion bildet, stellen die Funktionen  $\vec{g}(\vec{x})$  und  $\vec{h}(\vec{x})$  die Gleichheits- bzw. Ungleichheitsnebenbedingungen dar. Sie schränken den Lösungsraum auf den zulässigen Lösungsraum  $\mathbb{X}$  ein. Die Zielrichtung *minimiere* stellt keine Einschränkung der Allgemeingültigkeit dar. Soll eine Zielfunktion  $f'_k$  maximiert werden, lässt sich mit  $f_k := -f'_k$  ersatzweise eine zu minimierende Zielfunktion definieren (HANNE 1998, S. 2).

Neben der Anzahl an Zielkriterien kann eine Kategorisierung von Optimierungsmodellen nach Typus der Zielfunktion und Nebenbedingungen in lineare bzw. nichtlineare Modelle vorgenommen werden. Erfolgt die implizite Beschreibung des Lösungsraums durch lineare Gleichungen und Ungleichungen und handelt es sich bei der Zielfunktion um eine lineare Funktion, so wird von linearer, andernfalls von nichtlinearer Optimierung gesprochen (DEMPE & SCHREIER 2006, S. 13-14).

Die Art der Entscheidungsvariablen, reellwertig bzw. ganzzahlig, bildet die Grundlage für die Unterscheidung von kontinuierlichen, ganzzahligen und gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodellen (ELLINGER et al. 2003, S. 12; COLLETTE & SIARRY 2004, S. 17). Praktische Fragestellungen erfordern häufig den Einsatz sog. Binärvariablen zur Modellierung von Null-Eins-Entscheidungen und führen damit auf (gemischt-) ganzzahlige Optimierungsmodelle (KALLRATH 2013, S. 2).

Anhand der Beschaffenheit der Entscheidungsvariablen kann eine Einteilung in statische und dynamische Optimierungsmodelle erfolgen. Bei ersteren kommen ausschließlich Entscheidungsvariablen zum Einsatz, bei denen es sich um unbekannte Parameterwerte handelt. Sind die Variablen jedoch kontinuierliche Funktionen von Parametern, bspw. der Zeit, so wird von dynamischen Modellen gesprochen. (S. S. RAO 2009, S. 15)

Hinsichtlich des Informationsgrades wird zwischen deterministischen und stochastischen Modellen unterschieden. Werden die Parameter der Zielfunktion und Nebenbedingungen als bekannt vorausgesetzt, so liegt ein deterministisches Modell vor. Erfolgt die Modellierung mindestens eines Parameters als Zufallszahl, bzw. Zufallsvariable, so handelt es sich um ein stochastisches Modell. (DOMSCHKE et al. 2015, S. 7)

## 2.2 Grundlagen der multikriteriellen Optimierung

Nachfolgende Abbildung 2.2 zeigt zusammenfassend das resultierende Klassifizierungsschema für Optimierungsmodelle.

<b>Anzahl Zielgrößen</b>	monokriteriell	multikriteriell	
<b>Typus Zielfunktion und Nebenbedingungen</b>	linear	nichtlinear	
<b>Art der Entscheidungsvariablen</b>	kontinuierlich	ganzzahlig	gemischt-ganzzahlig
	statisch		dynamisch
<b>Informationsgrad</b>	deterministisch	stochastisch	

Abbildung 2.2: Klassifizierungsschema für Optimierungsmodelle

### 2.2.1.2 Optimierungsalgorithmen zur Lösung mathematischer Modelle

Nach der Abbildung eines Entscheidungsproblems in einem Optimierungsmodell gilt es, dieses zu lösen. Im Lösungsprozess werden die Entscheidungsvariablen mittels eines Algorithmus derart bestimmt, dass die Zielfunktion den besten Wert annimmt (COLLETTE & SIARRY 2004, S. 16). Unter einem Algorithmus wird dabei eine Verarbeitungsvorschrift zur Lösung eines Problems verstanden (WERNERS 2013, S. 9).

Zur Lösung von Optimierungsmodellen stehen leistungsfähige Standardsoftwarepakete zur Verfügung (ELLINGER et al. 2003, S. 6-7), auf die im Rahmen dieser Arbeit zurückgegriffen wird. Für das Verständnis der folgenden Ausführungen ist daher kein vertieftes Wissen zu Optimierungsalgorithmen erforderlich. Für detaillierte Erklärungen hierzu sei auf die Fachliteratur verwiesen (z. B. die in Abschnitt 2.2.1.1 zitierte Literatur).

### 2.2.2 Lösungsverfahren für multikriterielle Optimierungsmodelle

Optimierungsmodelle mit mehreren Zielsetzungen besitzen i. d. R. kein eindeutiges Optimum, sondern mehrere pareto-optimale Lösungen (LUC 2016, S. 2). Gemäß Abschnitt 2.1.3 erfordert die Lösung von Vektoroptimierungsproblemen daher die Angabe einer Artenpräferenzrelation durch den Entscheidungsträger. Lösungsverfahren für multikriterielle Optimierungsmodelle, auch MODM-Methoden genannt, lassen sich nach HWANG & MASUD (1979, S. 7-11) anhand des Zeitpunkts zu dem diese Präferenzinformation in das Problem einfließt, in vier Kategorien gliedern. Liegt die Information vor

## 2 Grundlagen

---

dem Einsatz eines Verfahrens vor, so ist die Rede von Verfahren mit *a priori Information*. Im Gegensatz dazu basieren Verfahren mit *a posteriori Information* auf einer nachträglichen Informationsangabe. Bei Verfahren mit *progressiver Information* ergibt sich die Präferenzinformation in einem interaktiven Prozess im Verlauf der Anwendung einer MODM-Methode. Die vierte Kategorie bilden Verfahren, bei denen die Angabe einer *Präferenzinformation unterbleibt*. Im Folgenden werden einige Methoden vorgestellt, welche der Kategorie mit *a priori Information* angehören.

Die Definition einer sog. Nutzenfunktion stellt ein allgemeines Konzept dar, auf das viele Verfahren dieser Kategorie zurückgreifen. Der Begriff Nutzen ist in diesem Zusammenhang als Maß für die Zufriedenheit eines Entscheidungsträgers zu verstehen. Für jedes Ziel ist eine individuelle Nutzenfunktion  $u_i$  zu definieren, welche dessen relative Wichtigkeit repräsentiert. In der Gesamtnutzenfunktion  $u$  werden die individuellen Nutzenfunktionen zusammengefasst. Sie repräsentiert die mathematische Formulierung der Artenpräferenzinformation. (MARLER & ARORA 2004, S. 371)

Zur folgenden Erläuterung ausgewählter Verfahren wird die in Tabelle 2.1 zusammengefasste Notation verwendet.

Tabelle 2.1: Notation zur Erläuterung der Lösungsverfahren

Formelzeichen	Bedeutung
$k$	Anzahl Zielfunktionen
$\vec{f}$	Vektor der Zielfunktionen
$f_i$	Zielfunktion $i$
$\vec{w}$	Vektor der Gewichtungskoeffizienten
$w_i$	Gewichtungskoeffizient des Kriteriums $i$
$u$	Nutzenfunktion
$\vec{x}$	Vektor der Entscheidungsvariablen
$X$	Zulässiger Lösungsraum

### 2.2.2.1 Lexikographische Optimierung

Bei der lexikographischen Optimierung ordnet der Entscheidungsträger die Zielfunktionen absteigend nach ihrer Wichtigkeit (HWANG & MASUD 1979, S. 45). Das optimale Ergebnis des Vektoroptimierungsproblems ergibt sich aus der schrittweisen Lösung der



## 2.2 Grundlagen der multikriteriellen Optimierung

folgenden Optimierungsprobleme (MARLER & ARORA 2004, S. 375). Dabei steht  $i$  für die Position einer Zielfunktion in der nach ihrer Wichtigkeit sortierten Reihenfolge und  $f_j(\vec{x}_j^*)$  ist das Optimum der  $j$ . Zielfunktion, das in der  $j$ . Iteration berechnet wurde:

$$\begin{aligned} \min_{\vec{x} \in X} \quad & f_i(\vec{x}) \quad \text{u. d. N.} \quad f_j(\vec{x}) \leq f_j(\vec{x}_j^*) \\ \text{mit} \quad & j = 1, 2, \dots, i-1, i > 1, i = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (2.2)$$

Der Hauptkritikpunkt an diesem Verfahren besteht in der Tatsache, dass das Auftreten einer eindeutigen Lösung in der Iteration  $j$  zur Vernachlässigung aller Zielfunktionen  $f_i$  mit  $i > j$  führt (DEMPE & SCHREIER 2006, S. 64).

### 2.2.2.2 Zielgewichtungsmodell

Die Transformation eines multikriteriellen Optimierungsmodells in ein monokriterielles Ersatzmodell durch die Verwendung der gewichteten Summe der Zielgrößen als Nutzenfunktion ist der offensichtlichste Zugang zur Lösung von Vektoroptimierungsproblemen (COLLETTE & SIARRY 2004, S. 45):

$$u(\vec{x}) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(\vec{x}) \quad (2.3)$$

Die Schwierigkeit, die mit dem Festlegen der Gewichtungsfaktoren einhergeht sowie die Nichterreichbarkeit von effizienten Lösungen in nicht-konvexen Bereichen der pareto-optimalen Menge sind die Hauptkritikpunkte an dieser Vorgehensweise. (MARLER & ARORA 2004, S. 375)

### 2.2.2.3 $\epsilon$ -constraint Methode

Bei der auf HAIMES et al. (1971) zurückgehenden  $\epsilon$ -constraint Methode ist die grundlegende Idee, alle Zielfunktionen bis auf eine in Nebenbedingungen zu transformieren (EISELT & SANDBLOM 2007, S. 339). Für zu maximierende bzw. minimierende Zielfunktionen werden mindestens zu erreichende bzw. höchstens annehmbare Schranken, sog. Anspruchsniveaus definiert (DOMSCHKE et al. 2015, S. 62-63). In der Literatur findet hierfür häufig der von DINKELBACH (1982) eingeführte Begriff des Satisfizierungsziels Verwendung. Der Entscheider muss die Anspruchsniveaus *a priori*, d. h. ohne

## 2 Grundlagen

---

Kenntnis über Optima einzelner Zielgrößen oder effiziente Lösungen, festlegen. Das monokriterielle Ersatzproblem ergibt sich zu (EHRGOTT 2005, S. 98-99):

$$\begin{aligned} \min_{\vec{x} \in \mathbb{X}} \quad & f_i(\vec{x}) \quad \text{u. d. N.} \quad f_j(\vec{x}) \leq \epsilon_j \\ \text{mit} \quad & j = 1, 2, \dots, k-1, j \neq i, \epsilon \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Durch die Wahl ungeeigneter Schranken kann das Ersatzmodell unlösbar werden bzw. es besteht das Risiko eines unzureichenden Erfüllungsgrades des Hauptzieles, falls die Satisfizierungziele den Lösungsraum zu stark einschränken. (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 120)

### 2.2.2.4 Zielprogrammierung

Bei der Zielprogrammierung (engl. *Goal Programming*) muss der Entscheidungsträger für jedes Ziel  $f_j$  ein Anspruchsniveau  $b_j$  definieren, das erreicht werden soll (DINKELBACH & KLEINE 1996, S. 56). Da im Allgemeinen keine Lösung existiert, die alle Anspruchsniveaus gleichzeitig erfüllt, müssen Abweichungen  $d_j$  von den gewünschten Zielwerten akzeptiert werden (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 121). Als bevorzugte Lösung wird diejenige bezeichnet, bei der die Summe dieser Abweichungen  $\sum_{j=1}^k |d_j|$  minimal ist (HWANG & MASUD 1979, S. 56). Zur Modellierung des Betrags wird  $d_j$  in einen negativen und positiven Anteil aufgeteilt, so dass  $d_j = d_j^+ - d_j^-$  mit  $d_j^+ \geq 0$ ,  $d_j^- \geq 0$  und  $d_j^+ d_j^- = 0$ . Das monokriterielle Ersatzmodell lässt sich auf dieser Basis wie folgt formulieren (MARLER & ARORA 2004, S. 377):

$$\begin{aligned} \min_{\vec{x} \in \mathbb{X}, \vec{d}^+, \vec{d}^-} \quad & \sum_{i=1}^k (d_i^+ + d_i^-) \\ \text{u. d. N.} \quad & f_j(\vec{x}) + d_j^+ - d_j^- = b_j \quad \text{und} \quad d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \text{und} \quad d_j^+ d_j^- = 0 \\ \text{mit} \quad & j = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (2.5)$$

Ungeachtet der großen Popularität der Zielprogrammierung führt diese Methode nicht notwendigerweise auf eine pareto-optimale Lösung (MARLER & ARORA 2004, S. 377). Die archimedische und lexikographische Variante bilden Untergruppen dieses Verfahrens. Während bei ersterer die Abweichungen von den Zielgrößen mit Gewichtungsparemtern versehen werden, erfolgt bei zweiterer eine Priorisierung der Zielkriterien. (KALLRATH 2013, S. 188-189)

### 3 Stand der Erkenntnisse

In den folgenden Abschnitten wird der Stand der Erkenntnisse zur Konfiguration GPN dargestellt. Einführend erfolgt die Ableitung von Anforderungen, die an entsprechende Methoden gestellt werden. Darauf aufbauend folgt die Darstellung und Abgrenzung relevanter Forschungsrichtungen sowie die Vorstellung der bedeutendsten Ansätze in den jeweiligen Kategorien. Auf Basis der Gegenüberstellung der Modelle mit den definierten Anforderungen erfolgt abschließend die Ableitung des Forschungsdefizits.

#### 3.1 Anforderungen an eine Methode zur Netzwerkkonfiguration

Die in Abschnitt 1.2 dargestellten Faktoren, die den Lösungsprozess sowie die erreichbare Lösungsqualität negativ beeinflussen, resultieren in folgenden Anforderungen an eine Methode zur Konfiguration GPN:

1. *Konformität zum Prozessmodell der Entscheidungsfindung*: Diese Forderung ergibt sich aus der Charakterisierung der Konsensfindung bei der Netzwerkkonfiguration als langwierig und politisch schwierig. Durch eine stringente Bearbeitung der in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten generischen Phasen eines Entscheidungsprozesses können verschiedene Fachbereiche frühzeitig ihre Belange einbringen und werden gemeinsam zu einer Entscheidung geführt.
2. *Erzeugung multipler Handlungsalternativen*: Diese Forderung trägt der kritisierten fehlenden Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Alternativenermittlung Rechnung. Die Generierung einer einzigen Netzwerkalternative mit einem Optimierungsmodell führt auf ein nach menschlichem Ermessen nicht intuitiv nachvollziehbares Ergebnis. Es ist daher die Erzeugung mehrerer Handlungsoptionen zu berücksichtigen. Ein detaillierter Vergleich von mittels mathematischer Algorithmen ermittelter Netzwerkalternativen erlaubt es Entscheidungsträgern, durch die Abwägung verschiedener Optionen eine Auswahl zu treffen, obwohl das Zustandekommen der einzelnen Lösungen nicht intuitiv nachvollziehbar ist.

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

3. *Implizite Definition des Lösungsraums*: Die fehlende Systematik bei der Auswahl von Handlungsalternativen sowie der daraus folgenden fehlenden Prozesskonvergenz erfordert die vollständige Durchsuchung des Lösungsraums. Aufgrund der Größe des Lösungsraums ist die explizite Formulierung aller Handlungsalternativen nicht möglich. Es ist daher eine implizite Definition des Lösungsraums erforderlich.
4. *Iterative Vorgehensweise bei der Datenbeschaffung*: Diese Forderung ist unweigerlich mit der impliziten Definition des Lösungsraums verbunden. Es ist weder möglich einen Lösungsraum mit der in Abschnitt 1.2 abgeschätzten Größenordnung initial exakt zu erfassen, noch diesen perfekt zu parametrieren. Es ist daher ein iterativer Prozess aus Ermittlung von Handlungsalternativen und schrittweiser Verbesserung der Qualität der Datenbasis zu fordern.
5. *Berücksichtigung der wesentlichen Entscheidungsdimensionen*: Die Notwendigkeit dieser Anforderung ist eine Konsequenz aus suboptimalen Ergebnissen bei der Netzwerkkonfiguration aufgrund von unzulässigen Modellvereinfachungen zur Komplexitätsreduzierung bei der Alternativenauswahl. Erst die Berücksichtigung und Festlegung der in Abschnitt 1.4.2.3 abgeleiteten Entscheidungsdimensionen bei der Konfiguration GPN erlaubt eine umfassende Beschreibung der Handlungsalternativen.
6. *Ausreichende Detailtiefe der Netzwerkmodellierung*: Die Forderung nach einer Berücksichtigung der wesentlichen Entscheidungsdimensionen ist nicht hinreichend, um die Defizite aus Modellvereinfachungen zu vermeiden. Dies kann erst durch eine ausreichende Detailtiefe der Netzwerkbetrachtung gewährleistet werden. Gemäß den Ausführungen aus Abschnitt 1.4.2.2 ist für die Netzwerkkonfiguration eine Auflösung des Entscheidungsproblems mindestens auf der Ebene von Produktionslinien erforderlich.
7. *Einsatz eines multikriteriellen Zielsystems*: Die Berücksichtigung mehrerer Ziele beschreibt reale Entscheidungsprobleme i. d. R. besser als eine singuläre Zielgröße (vgl. Abschnitt 2.1.3). Es ist daher der Einsatz eines multikriteriellen Zielsystems zur Netzwerkkonfiguration zu fordern.
8. *Zielableitung aus der Unternehmensstrategie*: Durch die Ableitung des Zielsystems aus der Unternehmensstrategie wird sichergestellt, dass sich das Produktionsnetzwerk in übergeordnete unternehmerische Leitlinien einfügt.

### 3.2 Vorverständnis zur Literaturanalyse

In der folgenden Abbildung 3.1 sind die an eine Methode zur Netzwerkkonfiguration gestellten Anforderungen inkl. ihres Ursprungs zusammengefasst. In Anlehnung an die Ausführungen zur analytischen und prozessualen Komplexität der Netzwerkkonfiguration sind die Anforderungen in die Kategorien prozessual und analytisch eingeteilt.



Abbildung 3.1: Anforderungen an eine Methode zur Konfiguration GPN

### 3.2 Vorverständnis zur Literaturanalyse

Der Darlegung der Anforderungen an eine Methode zur Konfiguration GPN folgend, dient dieser Abschnitt zur Identifikation und Strukturierung der relevanten Forschungsrichtungen als Basis für die Literaturanalyse. Das Feld der Netzwerkkonfiguration lässt sich durch eine zweidimensionale Matrix, bestehend aus den beiden Achsen Erfüllung der prozessualen bzw. analytischen Anforderungen aufspannen. Diese Matrix kann anhand der von JACOB (2006) und ERNST (2012) entwickelten Klassifizierungsansätze für Modelle zur Konfiguration GPN in mehrere Bereiche untergliedert werden.

### 3 Stand der Erkenntnisse

*Prozessmodelle*, deren Fokus laut ERNST (2012) auf der Beschreibung des zeitlichen Ablaufs sowie der inhaltlichen Erläuterung der einzelnen Phasen liegt, die konkrete Ermittlung und Bewertung von Netzwerkalternativen aber vernachlässigen, bilden den rechnerunabhängigen, nicht analytisch elaborierten Extrempunkt dieser Matrix. Dem gegenüber stehen MODM- und MADM-Ansätze zur Netzwerkkonfiguration mit dem Schwerpunkt der Entwicklung bzw. Bewertung von Handlungsoptionen. MODM-Ansätze in Form *mathematischer Optimierungsmodelle*, die zur Berechnung der optimalen Netzwerkkonfiguration unter Vernachlässigung jeglicher prozessualer Anforderungen eingesetzt werden können, stellen den rechnergestützten, analytisch anspruchsvollen Extrempunkt dar. Zwischen diesen beiden Ausprägungen sind *Bewertungsansätze* einzuordnen, die dem Bereich des MADM angehören. Bei diesen wird der Fokus auf die Auswahl einer Handlungsalternative gelegt. Neben der Berücksichtigung von prozessualen Aspekten finden bei Bewertungsansätzen detaillierte Analysen von Netzwerkalternativen bspw. unter Verwendung von modellgestützten Simulationsansätzen statt. Ansätze, die ein Prozessmodell sowie ein mathematisches Optimierungsmodell umfassen und damit sowohl einen Beitrag zur Beherrschung der prozessualen wie analytischen Komplexität leisten, werden als *kombinierte Ansätze* bezeichnet. Die in Abbildung 3.2 dargestellte Matrix zeigt die wesentlichen Kategorien, in welche die bestehenden Ansätze zur Konfiguration GPN eingeordnet werden können. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im Folgenden für Prozessmodelle und mathematische Optimierungsmodelle auf eine Unterscheidung zwischen der reinen und analytisch bzw. prozessual fundierten Variante verzichtet.

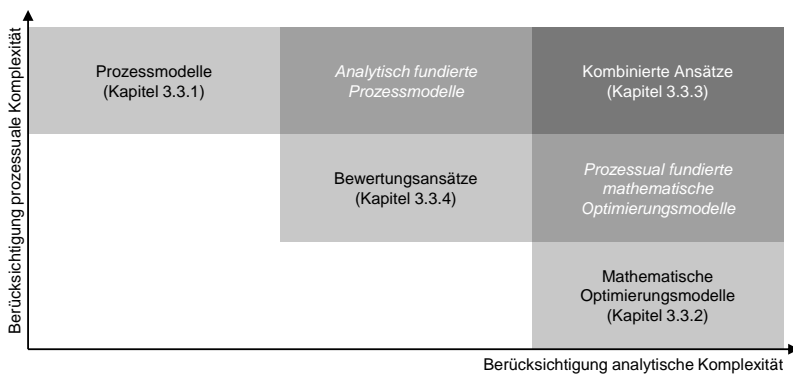


Abbildung 3.2: Gliederung der Literatur zur Konfiguration GPN

### 3.3 Literaturanalyse

Gemäß den Ausführungen aus Abschnitt 3.2 werden in diesem Abschnitt die vorhandenen Ansätze zur Netzwerkkonfiguration, gegliedert in die Bereiche Prozessmodelle, Optimierungsmodelle, kombinierte Ansätze und Bewertungsansätze, vorgestellt. In der Literatur steht eine unüberschaubare Vielfalt an mathematischen Optimierungsmodellen zur Konfiguration GPN zur Verfügung. Dies macht eine Einschränkung des Betrachtungsumfangs notwendig. Nach Abschnitt 2.2 kann zwischen monokriteriellen und multikriteriellen Optimierungsmodellen unterschieden werden. Da Optimierungsmodelle mit einer Zielgröße den definierten Anforderungen grundlegend widersprechen, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf multikriterielle Optimierungsmodelle. Eine Ausnahme bilden monokriterielle Modelle, die in Prozessmodelle eingebettet sind und daher Teil kombinierter Ansätze zur Netzwerkkonfiguration sind.

#### 3.3.1 Prozessmodelle zur Netzwerkkonfiguration

**Prozessmodell nach CHRISTODOULOU et al. (2007)** Der am Institute for Manufacturing der Universität Cambridge entwickelte Ansatz zur Netzwerkkonfiguration basiert auf vier Leitfragen, deren Beantwortung den Prozessablauf, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, in vier Phasen unterteilt.

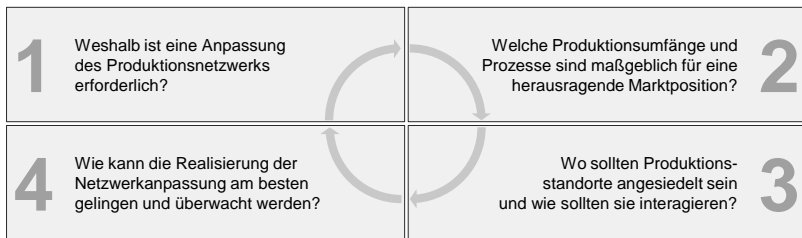


Abbildung 3.3: Prozessmodell nach CHRISTODOULOU et al. (2007) (eigene Darstellung)

Im Prozessmodell von CHRISTODOULOU et al. (2007) finden sich die einzelnen Phasen der Entscheidungsfindung weitestgehend wieder. Beginnend mit der Frage nach der Notwendigkeit der Netzwerkanpassung und endend mit der Ergebniskontrolle im Rahmen der Realisierung wird der Prozess von Anfang bis Ende thematisiert. Lediglich die Phase

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

der Datenerhebung findet nur beiläufig Erwähnung. Durch die Einbindung von *Make-or-Buy* Entscheidungen in den Prozess gelingt eine klare Abgrenzung und Definition der im Rahmen der Alternativenentwicklung vorzusehenden Wertschöpfungsumfänge.

Während sich das Modell inhaltlich über den Gesamtprozess der Entscheidungsfindung erstreckt und beschreibt *was* zu tun ist, bleibt die Frage *wie* die einzelnen Schritte bearbeitet werden können weitestgehend unbeantwortet. So wird zwar die Vorgehensweise zur Alternativenentwicklung in sieben Schritte untergliedert, jedoch bleibt eine Beschreibung, wie attraktive Netzwerkoptionen identifiziert werden können und wie der strategische Zielbeitrag zu bewerten ist, aus. Ebenso verhält es sich mit der Definition strategischer Zielsetzungen. Es werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Zieldefinition genannt, eine explizite inhaltliche Beschreibung, wie Zielgrößen festzulegen sind, erfolgt nicht. Das Prozessmodell von CHRISTODOULOU et al. (2007) bietet umfassend einen guten Überblick über relevante Aufgaben, die es bei der Konfiguration GPN zu bearbeiten gilt, sie befähigt den Leser jedoch nicht, diese zu bewältigen.

**Prozessmodell nach KAMPKER et al. (2010)** Das Fazit zum Prozessmodell nach CHRISTODOULOU et al. (2007) lässt sich auf den von KAMPKER et al. (2010) entwickelten Ansatz übertragen. Auch hier erfolgt eine Beschreibung wesentlicher Aufgaben bei der Netzwerkkonfiguration ohne jedoch konkrete Methoden und Hilfsmittel zu deren Bearbeitung vorzustellen. Die schrittweise Eingrenzung des Lösungsraums bildet den zentralen Grundgedanken zur Realisierung der Zielsetzung einer signifikanten Verringerung des Bewertungsaufwands bei gleichzeitiger Verbesserung der Bewertungsergebnisse. Mit den ersten beiden Schritten des Prozessmodells wird der Lösungsraum durch die Analyse der Netzwerkstruktur sowie der strategischen Rahmenbedingungen aufgespannt. Auf Basis strategischer Zielsetzungen werden hierbei bereits erste Einflussfaktoren aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. In der dritten Phase werden Gestaltungsoptionen eliminiert und in Clustern zusammengefasst. Der vierte Schritt dient zur Vereinigung ähnlicher Szenarien sowie für den Ausschluss der in Bezug auf die verbleibenden Alternativen irrelevanten Einflussfaktoren. Durch eine umfassende Bewertung erfolgt schließlich die Entscheidung für eine Handlungsoption.

Zusammenfassend erkennen KAMPKER et al. (2010) die Notwendigkeit einer schrittweisen Eingrenzung des Lösungsraums und entwickeln hierfür ein entsprechendes Prozessmodell. Der Kernkritikpunkt an diesem Modell geht auf die nicht vertiefte Behandlung der eigentlichen Entwicklung von Handlungsalternativen zurück.



**Prozessmodell nach LIEBECK (2009)** LIEBECK (2009) nimmt bei der Entwicklung seines Ansatzes weniger eine prozessuale denn eine strategische Sichtweise ein. Es wird daher keine phasenbezogene Anleitung mit dem Ziel der Entscheidungsfindung vorgestellt, sondern eine Vorgehensweise zur Identifikation verbesserter Wertschöpfungsstrukturen. Die Grundidee des entwickelten Ansatz besteht in der Auffassung, dass sich der Erfolg eines Unternehmens aus Wettbewerbsvorteilen durch eine überlegene Produktleistung und Kostenstruktur ergibt. Es fließt daher sowohl die Marktsituation eines Unternehmens als auch dessen Wertschöpfungsstruktur in die Netzwerkgestaltung mit ein. Für ein repräsentatives Produkt aus dem Gesamtportfolio werden die kundenrelevanten Produkteigenschaften und -funktionen abgeleitet und deren Marktwert mittels der Target Costing Methode monetär bewertet. Bei der Modellierung der Wertschöpfungskette werden die zur Herstellung erforderlichen Produktions- und Logistikprozesse erfasst und deren Kosten in Abhängigkeit des Standorts bewertet. Durch den Einsatz einer Variation des *Quality Function Deployment* wird der Marktwert der Produkteigenschaften und -funktionen auf die Produktionsprozesse übertragen. Die eigentliche Entwicklung von Netzwerkalternativen erfolgt auf Basis einer Gegenüberstellung des Marktwerts von Produkteigenschaften mit den Herstellkosten in einem Portfolio mit dem Ziel das Kosten/Wert-Verhältnis zu optimieren.

Da LIEBECK (2009) die Netzwerkkonfiguration nicht aus dem Blickwinkel der Herbeiführung einer Entscheidung betrachtet, deckt der entwickelte Ansatz nicht den Gesamtprozess der Entscheidungsfindung ab. Die vorgesehene manuelle Ableitung von Handlungsalternativen verhindert eine integrierte Betrachtung des gesamten Produktportfolios sowie aller Wertschöpfungsprozesse im Sinne einer vollständigen Durchsuchung des Lösungsraums. Durch die direkte Einbeziehung des erbrachten Kundennutzens ergänzt die Methode die Konfiguration GPN um eine wertvolle Perspektive.

**Prozessmodell nach HERM (2006)** Analog zum Ansatz von LIEBECK (2009) bildet das Produkt auch für das von HERM (2006) entwickelte Prozessmodell den Ausgangspunkt. Statt den Marktwert von Produktfunktionen zu bestimmen findet hier eine Ableitung der für den Herstellungsprozess erforderlichen *Business Capabilities* statt. Diese beschreiben „die Fähigkeit einer Funktion bzw. organisatorischen wirtschaftlichen Einheit, einen definierten Output zu erzeugen (...)“ (HERM 2006, S. 13). Im Rahmen des sog. *Business Capabilities Mapping* erfolgt der Abgleich der erforderlichen Fähigkeiten mit dem angebotenen Leistungsvermögen der Netzwerkknoten, d. h. im Wesentlichen Produktionsstandorte und Lieferanten. Auf dieser Basis erfolgt eine Zu-

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

weisung von *Business Capabilities* zu potentiellen Knoten und anschließend die Bildung von Wertschöpfungsmodulen durch die standortabhängige Belegung von *Business Capabilities* mit Ressourcen und Technologien. Die Verknüpfung der Wertschöpfungsmodule führt schließlich auf eine Netzwerkalternative. Diese zu bearbeitenden Aufgaben bettet HERM (2006) in eine aus elf Schritten bestehende Methode ein, die von der Festlegung des Systemhorizonts bis hin zur Entscheidungsfindung reicht. Eine explizite Erwähnung verdienen die Ausführungen zur Definition des Zielsystems. Der Autor fordert ein multikriterielles Zielsystem, das die Strategie des konfigurierenden Unternehmens widerspiegelt und führt Ziele in den Kategorien Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität detaillierter aus. Die Berücksichtigung übergeordneter Unternehmensleitlinien wird durch die Aufnahme strategischer Restriktionen ergänzt.

Ogleich HERM (2006) ein an der Unternehmensstrategie ausgerichtetes Zielsystem fordert, bleibt die Frage nach der Ableitung von Handlungsalternativen im Hinblick auf definierte Zielgrößen weitgehend unbeantwortet. Es erfolgt der Verweis auf das Potenzial mathematischer Optimierungsalgorithmen zur Bewältigung dieser Aufgabe. Die Entwicklung einer Unterstützung in Form eines integrierten Modellierungs- und Optimierungswerkzeugs für den Netzwerplaner wird im Ausblick der Arbeit als weiterer Forschungsbedarf deklariert. Das entwickelte Prozessmodell bietet zusammenfassend ein umfangreiches Rahmenmodell für die Konfiguration GPN. Durch die fehlende Detaillierung einzelner Phasen befähigt der Ansatz jedoch nicht zur systematischen Entwicklung konkreter Netzwerkalternativen.

**Prozessmodell nach JUSTUS (2009)** JUSTUS (2009) stellt ein ähnlich gelagertes Ablaufmodell mit vergleichbaren Stärken und Schwächen wie HERM (2006) vor. Der unter Einsatz eines Bezugsrahmens konzipierte Ansatz besteht aus fünf Phasen. In der ersten Phase wird das Betrachtungsobjekt in Form eines Produktes definiert. Mit dem anschließenden Strategieaudit für das Unternehmen sollen auf Basis der aktuellen Positionierung im Wettbewerbsumfeld und der strategischen Ausrichtung Maßnahmen definiert werden, die einen Beitrag zur Verbesserung der strategisch wichtigen Fähigkeiten leisten. Im folgenden Strukturaudit erfolgt die Analyse der erforderlichen Wertschöpfungsaktivitäten. Sowohl für das Strategie- als auch Strukturaudit werden Methoden für relevante Teilaufgaben vorgestellt und die zu erarbeitenden Ergebnisse definiert. Im Gegensatz dazu beschränken sich die Ausführungen zur Netzwerkentwicklung auf die Definition der Teilschritte Bestimmung des Produktionsprogramms, der Produktionsstandortrollen sowie der Produktionsnetzwerkstruktur. Durch eine Netz-

werksimulation in der fünften Phase sollen komplexe Zusammenhänge modelliert und visualisiert werden, die Netzwerkconfiguration unterstützt und die *Total Landed Costs* und *Total Landed Time* optimiert werden.

Das Prozessmodell von JUSTUS (2009) bietet eine gute Grundlage zur Analyse der unternehmensstrategischen Implikationen auf die Netzwerkgestaltung. Das Strategieaudit mündet jedoch nicht in konkreten Zielgrößen, an denen die Erarbeitung von Netzwerkalternativen auszurichten ist. Mit der Beschränkung der Bewertung auf eine Kosten- und eine Zeitgröße erfolgt keine Evaluation von Handlungsoptionen hinsichtlich eines Beitrags zur Umsetzung der im Rahmen des Strategieaudits definierten Ausrichtung.

**Fazit zu Prozessmodellen** In Tabelle 3.1 ist dargestellt, inwiefern die in Abschnitt 2.1.2 abgeleiteten Phasen der Entscheidungsfindung in den vorgestellten Prozessmodellen Berücksichtigung finden.

*Tabelle 3.1: Abgleich der Prozessmodelle mit den Phasen der Entscheidungsfindung*

Modell	Ident. Handlungsbedarf	Definition Aufgabenstellung	Präzisierung Zielsystem	Datenerhebung	Entw. Handlungsalternativen	Bewertung	Auswahl	Realisierung
CHRISTODOULOU et al. (2007)	●	●	●	●	●	●	●	●
KAMPKER et al. (2010)	●	●	●	●	●	●	●	●
LIEBECK (2009)				●	●	●		
HERM (2006)		●	●	●	●	●	●	
JUSTUS (2009)		●	●	●	●	●		

Phase der Entscheidungsfindung wird...

nicht erwähnt. ● erwähnt. ● beschrieben. ● detailliert beschrieben. ● anwendungstauglich beschrieben.

Mit Ausnahme der Arbeit von LIEBECK (2009) orientieren sich die vorgestellten Prozessmodelle umfassend an den Phasen der Entscheidungsfindung. Gleichwohl werden nur im Ansatz von CHRISTODOULOU et al. (2007) alle Schritte im Mindesten erwähnt. Die *Definition der Aufgabenstellung*, *Präzisierung des Zielsystems* sowie die *Bewertung* bilden die Betrachtungsschwerpunkte der Konfigurationsmethoden. Obwohl die *Entwicklung von Handlungsalternativen* und die hierfür erforderliche *Datenerhebung* in

allen Modellen thematisiert werden, ist mit keinem der Ansätze die Erarbeitung konkreter Netzwerkszenarien im Sinne der Festlegung der in Abschnitt 1.4.2.3 definierten Entscheidungsdimensionen möglich. Die *Identifikation des Handlungsbedarfs* bildet nur in zwei Modellen den Ausgangspunkt für die Netzwerkkonfiguration. Sowohl die Phase der *Auswahl* als auch der *Realisierung* spielen in den Methoden lediglich eine untergeordnete Rolle. Weiterhin lässt sich keine übergeordnete Grundstruktur für eine Vorgehensweise zur Netzwerkkonfiguration identifizieren, die Gegenstand einer kontinuierlichen Weiterentwicklung wäre. Die einzelnen Ansätze basieren im Allgemeinen auf singulären innovativen Ideen und bauen nicht aufeinander auf. Mit der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Methode gilt es daher, einen Beitrag zur Zusammenführung bestehender Ansätze zu leisten. Insbesondere sei an dieser Stelle auf die Berücksichtigung von kunden- und produktrelevanten Anforderungen an ein Produktionsnetzwerk durch die Autoren LIEBECK (2009) und HERM (2006) hingewiesen.

#### 3.3.2 Multikriterielle Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN

Multikriterielle Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN sind im Gegensatz zu Prozessmodellen Gegenstand der Forschung in verschiedenen Fachbereichen, wie bspw. im *Operations Research* oder in Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften. Zur Identifikation der relevanten Modelle kommt daher die Vorgehensweise der strukturierten Literaturrecherche unter Berücksichtigung der hierfür von SEURING & GOLD (2012) entwickelten Richtlinien zum Einsatz. Hierdurch kann eine systematische Durchsichtung der vorhandenen Literatur ohne subjektive Einschränkungen gewährleistet werden.

##### 3.3.2.1 Vorgehensweise zur Identifikation relevanter Optimierungsmodelle

In einem Vergleich der wissenschaftlichen Datenbanken für Fachartikel *Google Scholar*, *Science direct*, *Web of Science* und *Scopus* wurde letztere aufgrund des größten Abdeckungsbereichs an Fachzeitschriften als Recherchedatenbank ausgewählt. Ergänzend wurden die in den vergangenen 20 Jahren an den Instituten der *Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik* (WGP) entstandenen Dissertationen auf relevante Titel durchsucht. Die für die Recherche herangezogenen Suchbegriffe wurden in einer mehrstufigen Vorgehensweise ermittelt und in drei Begriffsfamilien eingeteilt. Die erste dient zur Beschreibung des Themenfelds Produktionsnetzwerk. Die zweite Familie beinhaltet Begriffe zur Methode der mathematischen Optimierung. Da ausschließlich

multikriterielle Ansätze als relevant erachtet werden, erfolgt durch die dritte Kategorie eine Spezifikation der Methode. Die ausgewählten Suchbegriffe sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.<sup>1</sup> Die Suchanfrage wurde derart formuliert, dass jeweils mindestens ein Begriff aus den drei definierten Familien in Titel, Schlüsselwörtern und *Abstract* enthalten sein muss.

Tabelle 3.2: Suchanfrage zur Identifikation relevanter Veröffentlichungen

Begriffsfamilie 1 Themenfeld	UND	Begriffsfamilie 2 Methode	UND	Begriffsfamilie 3 Spezifikation Methode
ODER production network manufacturing network plant network global network supply chain global manufacturing production distribution		ODER integer* algorithm mathematical optimi* search method optimum		ODER multi* pre/3 objective multi* pre/3 crit* bi objective bi crit* pareto

Insgesamt wurden im Laufe der Literaturrecherche 3.681 Paper gesichtet, von denen auf Basis des Titels, der Schlüsselwörter sowie des *Abstracts* 285 Veröffentlichungen als für die definierte Aufgabenstellung relevant eingestuft wurden. Anhand der Untersuchung der Volltexte wurde die Anzahl der Beiträge, die in die Literaturanalyse überführt wurden, auf 54 eingegrenzt. Insbesondere wurden mehrfache Beiträge eines Autors zu einem schrittweise ergänzten Optimierungsmodell, Fachartikel mit dem Fokus der Verbesserung von Algorithmen sowie Modelle, die sich ausschließlich auf die Konfiguration von Distributionsnetzwerken beziehen, ausgeschlossen. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse aus der Klassifizierung der 54 identifizierten Veröffentlichungen vorgestellt, gefolgt von einem detaillierten Review ausgewählter Modelle.

#### 3.3.2.2 Klassifizierung der identifizierten Modelle

Die Klassifizierung der identifizierten Modelle zur Konfiguration GPN in Tabelle 3.3 erfolgt anhand einer Auswahl der von HÜBNER (2007, S. 54-56) und MELO et al. (2006)

<sup>1</sup>Die Ergänzung eines Suchbegriffs durch das Zeichen \* stellt eine spezielle Anweisung an die Suchmaschine dar und ermöglicht eine Abwandlungssuche (ELSEVIER B.V. 2016a). So werden durch die Suche nach *optimi\** die Begriffe *optimization*, *optimisation*, *optimize*, *optimizing*, etc. gefunden. Durch die Anweisung *pre/3* werden nur Texte identifiziert, bei denen der Begriff *objective* maximal 3 Wörter nach dem Begriff *multi\** steht. (ELSEVIER B.V. 2016b)

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

hierzu vorgeschlagenen Kategorien sowie eigenständigen Ergänzungen. Im Einzelnen werden folgende Bewertungskriterien herangezogen:

1. *Planungshorizont*: Mittels einperiodiger Modelle (S) wird ein Netzwerk im Gegensatz zu mehrperiodigen Ansätzen (M) ohne Berücksichtigung zeitlicher Aspekte wie bspw. die Bedarfsentwicklung über mehrere Jahre hinweg optimiert.
2. *Informationsgrad*: Anhand des Umgangs mit Unsicherheit vorliegender Daten wird zwischen deterministischen (D) und stochastischen (S) Modellen unterschieden. Während in ersteren von sicheren Informationen ausgegangen wird, werden in letzteren Unsicherheiten explizit berücksichtigt. Wird bei Optimierungsmodellen auf Ansätze aus dem Bereich der *Fuzzy-Logik* zurückgegriffen werden diese vereinfachend der Kategorie der stochastischen Modelle zugewiesen. Werden Unsicherheiten nicht explizit im Optimierungsmodell abgebildet sondern anhand postoptimaler Verfahren wie bspw. der Sensitivitätsanalyse untersucht, so handelt es dennoch um ein deterministisches Modell.
3. *Internationale Aspekte*: Werden bei der Abbildung des Entscheidungsproblems der Netzwerkkonfiguration in einem Optimierungsmodell Aspekte des internationalen Handels wie bspw. Zölle, *Local Content Anforderungen*<sup>2</sup>, Wechselkurse von Währungen etc. berücksichtigt, so werden diese als internationale Modelle (I) ansonsten als nationale Modelle (N) klassifiziert.
4. *Betrachtungsumfang*: Hinsichtlich des Betrachtungsumfanges der identifizierten Modelle kann unterschieden werden, ob lediglich das Produktionsnetzwerk (P) oder zusätzlich das Distributionsnetzwerk (PD) analysiert wird. Ansätze mit dem ausschließlichen Fokus auf Distributionsnetzwerke wurden im Hinblick auf den Untersuchungsrahmen der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen.
5. *Betrachtungstiefe*: Das Kriterium der Betrachtungstiefe dient zur Unterscheidung der Modelle anhand der gewählten Modellierungsebene. Diese variiert zwischen der Betrachtung auf Ebene von Produktionsstandorten (ST), Technologien (TE), Produktionslinien (L) und Anlagen (A).

---

<sup>2</sup>Unter einer *Local Content Anforderung* ist eine Vorgabe zu verstehen, die einen festgelegten Adressaten (-kreis) dazu verpflichtet, einen gewissen *Local Content* zu erreichen (PETERSEN 2004, S. 17). Der *Local Content* beschreibt dabei den „Anteil an lokal entstandener Wertschöpfung an einem Gut“ (JETTER 1990, S. 166).

6. *Anzahl Produktionsschritte:* Die Anzahl der Produktionsschritte gibt an, in wie viele Schritte die Herstellung eines Produktes untergliedert wird. Kommt eine allgemeine Stücklistenstruktur zum Einsatz, so ist die Anzahl der modellierten Schritte nicht durch das Modell vorgegeben, sondern es können unbegrenzt viele Produktionsschritte (U) abgebildet werden.
7. *Gliederung Produktportfolio:* In einigen Optimierungsmodellen wird die Menge aller betrachteten Produkte und Komponenten in Produktfamilien (F) oder Module (M) gegliedert. Dies erlaubt eine realitätsnähere Modellierung heutiger Produktionsnetzwerke.
8. *Zielgrößen:* Die identifizierten Modelle unterscheiden sich durch die implementierten Zielgrößen. Die Kategorien Profit (P), Kapitalwert (KW), Kosten (K) und Investitionen (I) beschreiben finanzielle Zielgrößen. Die Kriterien Flexibilität (F), Risiko (R), Qualität (Q), Liefer- bzw. Durchlaufzeit (Z), Nachhaltigkeit (N), Liefertreue (LZ) und *Customer Service Level* (CSL) decken weitere strategische Zielsetzungen ab. Größen, die lediglich in einem der Modelle Anwendung finden, gehören der Kategorie Sonstige (S) an.
9. *Entscheidungsvariablen:* Die ermittelten multikriteriellen Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN unterscheiden sich anhand der durch die Variablen abgedeckten Entscheidungsdimensionen. Während in einigen Optimierungsmodellen isoliert die Errichtung bzw. Schließung von Standorten (ST) oder Produktionslinien (L) bzw. der Einsatz einer Technologie (TE) betrachtet wird, dienen andere Modelle darüber hinaus zur integrierten Auswahl der Transportmodi (T), der kapazitiven Auslegung (K) von Produktionsressourcen sowie der Allokation (A) von Produkten bzw. Komponenten.
10. *Technische Restriktionen:* Durch die Berücksichtigung technischer Restriktionen wird die Abbildungsgenauigkeit von Optimierungsmodellen erhöht. Dies wird durch die Begrenzung von Ressourcen (R) pro Standort bzw. Produktionslinien sowie der maximal darstellbaren Kapazitätsanpassungsrate (K) umgesetzt.
11. *Lösungsmethode:* Zur Lösung zahlreicher Optimierungsmodelle kommen kommerzielle Standardsolver (S) wie bspw. *CPLEX* zum Einsatz. Dem gegenüber stehen Modelle die mittels spezieller Algorithmen (A) bzw. Heuristiken (H) gelöst werden, die auf das jeweilige Optimierungsmodell zugeschnitten sind. In einigen Fällen wird auf die Angabe einer Lösungsmethode verzichtet (k. A.).

### 3 Stand der Erkenntnisse

12. *Anwendungsbereich:* Zum Test bzw. zur Validierung von Optimierungsmodellen werden diese häufig in der industriellen Praxis eingesetzt. Folgende Industrien werden unterschieden: Automobilindustrie (A), Chemieindustrie (C), Elektroindustrie (E) und Stahlindustrie (ST). Industrien, die lediglich in einem der 54 Modelle betrachtet werden, werden in der Kategorie sonstige Industrien (S) zusammengefasst.

#### 3.3.2.3 Analyse der identifizierten Modelle

Abbildung 3.4 zeigt die zeitliche Entwicklung der Anzahl relevanter Modelle sowie den Verlauf des Anteils an Ansätzen mit unbegrenzten Produktionsschritten, dem Betrachtungsumfang PD und deterministischer, einperiodiger und nationaler Modellierung.

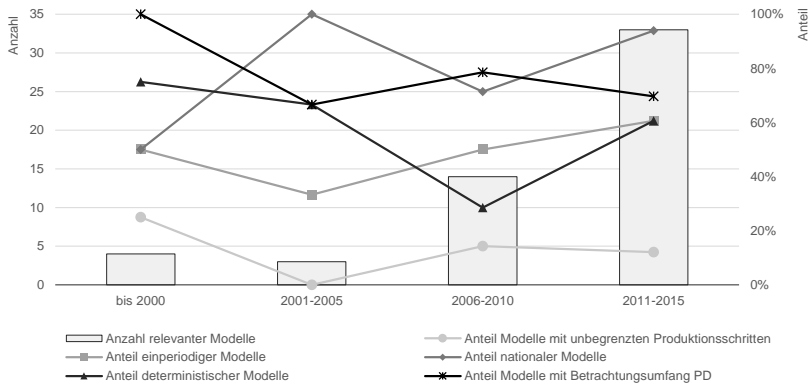


Abbildung 3.4: Zeitliche Entwicklung der Veröffentlichung relevanter Modelle

Die Anzahl veröffentlichter multikriterieller Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN hat in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen. Die Zuwachsraten zeugen von einer hohen Eignung dieses Verfahrens für den Einsatz zur Netzwerkkonfiguration. Wie die Analyse zeigt, finden internationale Aspekte über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg nur selten Berücksichtigung. Ebenso wird in durchschnittlich ca. 50% der Ansätze auf die Modellierung der zeitlichen Entwicklung relevanter Größen verzichtet. Der Anteil deterministischer Optimierungsmodelle hat bis zur Zeitkategorie 2006-2010 zunächst deutlich abgenommen, ist in der Zeitspanne 2011-2015 jedoch wie-



Tabelle 3.3: Klassifizierung multikriterieller Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN

Modell	Planungshorizont	Informationsgrad	Internationale Aspekte	Bearbeitungsumfang	Bearbeitungstiefe	Anz. Produktionsschritte	Gliederung Produktportfolio	Zieleßen	Entscheidungsvariablen	Technische Restriktionen	Lösungsmethode	Anwendungsbereich
AALAEI & DAVOUDPOUR (2015)	M	S	N	P	L	1	-	K,S	A, K, ST	R	K	A
ARNTZEN et al. (1995)	M	D	I	PD	ST, TE	U	-	K, Z	A, ST, T, TE	-	A	E
AZARON et al. (2008)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, R, S	K, ST	-	A	-
BOGASCHEWSKY & KOHLER (2010)	M	D	I	P	ST, L	U	-	N, S, Z	L, ST, T	-	k.A.	-
BOJARSKI et al. (2009)	M	D	N	P	ST, TE	1	-	KW, N	K, ST, TE	R	K	C
BOUZEMBRAK et al. (2011)	S	D	N	PD	ST	1	-	K, N	K, ST, TE	-	K	-
CHAAABANE et al. (2011)	S	D	N	P	ST, TE	U	-	K, N	ST, T, TE	-	K	-
CHEN & ANDRESEN (2014)	S	D	N	P	ST, TE	1	-	K, N, S	A, ST, TE, T	-	K	ST
DEMIRLI & YIMER (2006)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, R, S	T, TE	-	K	ST
DING et al. (2009)	M	S	I	PD	ST	1	-	K, R, S	ST	-	H	S
ESPUNA et al. (2003)	S	D	N	PD	ST	1	-	CSL, K	ST	-	H	A
FRANCA et al. (2010)	M	S	N	PD	ST	1	-	K, Z	ST	-	H	-
FUJITA et al. (2012)	S	D	N	P	ST	1	-	P, Q	K, ST	-	k.A.	-
GOETSCHALCKX et al. (2013)	S	D	N	P	ST	2	M	P, Q, Z	A	-	H	A
GUILLEN et al. (2005)	M	S	N	PD	ST	1	-	P, R	ST	-	K	S
GUILLÉN-GOSÁLBEZ & GROSSMANN (2010)	M	S	N	PD	ST	1	-	LZ, KW, R	K, ST	-	K	C
HAFEZALKOTOB & TEIMOURY (2008)	S	D	I	PD	ST, TE	1	-	KW, N	K, ST, TE	R	K	C
HUGO & PISTIKOPOULOS (2005)	M	D	N	P	ST	2	-	K, Z	K, ST, T	-	k.A.	A
	M	D	N	P	ST, TE	1	-	KW, N	K, ST, TE	R	k.A.	C

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle 3.3: Klassifizierung multikriterieller Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN (Fortsetzung)

Modell	Planungshorizont	Informationsgrad	Internationale Aspekte	Betrachtungsumfang	Betrachtungsstufe	Anz. Produktionsschritte	Gliederung Produktportfolio	Zielgrößen	Entscheidungsvariablen	Technische Restriktionen	Lösungsmethode	Anwendungsbereich
JAMSHIDI et al. (2012)	S	D	N	PD	ST	1	-	K, N	ST	-	H	-
JAVANSHIR et al. (2012)	S	D	N	PD	ST	1	-	LZ, K	ST	-	H	-
KANANI NEZHAD et al. (2013)	S	S	N	PD	ST	1	-	I, LZ, K	K, ST	-	K	-
KHAOULA et al. (2013)	M	D	N	PD	ST	1	-	K, N	ST	-	k, A.	-
LANZA & R. MOSER (2014)	M	D	I	P	ST, TE	U	-	CSL, F, K, Q, S, Z	ST, TE	-	K	S
LATHA SHANKAR et al. (2013)	S	D	N	PD	ST	1	-	CSL, K	ST	-	H	S
LEE et al. (1981)	S	D	N	PD	ST	1	-	CSL, K, N, S	ST	-	K	-
LIU & PAPAGEORGIOU (2013)	M	D	I	P	ST	2	F	K, S, Z	A, K	K	K	C
LU et al. (2010)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, R	ST	-	k, A.	-
MASTROCIQUE et al. (2013)	S	D	N	P	L	U	-	K, Z	A	-	H	S
MELACHRINOUDIS & MIN (2000)	M	D	I	PD	ST	1	-	P, S, Z	ST	K	K	S
MITRA et al. (2009)	M	S	N	P	ST, A	U	F	LZ, K	A	-	K	-
MOATTAR HUSSEINI et al. (2015)	M	D	N	PD	ST	1	-	K, Q	A	-	K, H	-
MONCAYO-MARTÍNEZ & RECIO (2014)	S	D	N	P	L	U	-	K, Z	A	-	H	E
NAGAR et al. (2012)	M	S	N	PD	ST, L	U	-	CSL, P, R	L, T	-	k, A.	E
A. NAGURNEY & L. S. NAGURNEY (2010)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, N	K, ST, T	-	A	-
NICKEL et al. (2012)	M	S	N	PD	ST	1	-	LZ, P, R	ST	-	K	-
PASANDIDEH et al. (2015)	M	S	N	PD	ST	1	-	K, R	A	-	H	-

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle 3.3: Klassifizierung multikriterieller Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN (Fortsetzung)

Modell	Planungshorizont	Informationsgrad	Internationale Aspekte	Berachtungsumfang	Berachtungsebene	Anz. Produktionsschritte	Gliederung Produktportfolio	Zieleßen	Entscheidungsvariablen	Technische Restriktionen	Lösungsmethode	Anwendungsbereich
PINTO-VARELA et al. (2011)	S	S	N	PD	ST, TE	1	-	N, P	K, ST, TE	R	K	S
PISHVAEE et al. (2012)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, N	ST, TE	-	K	S
POURROUSTA et al. (2012)	M	S	N	PD	ST	1	-	K, Z	A	-	H	-
RUIZ-FEMENIA et al. (2013)	M	S	N	PD	ST, TE	1	-	KW, N	K, ST, TE	-	K	C
SABOONCHI & ZHANG (2010)	M	S	I	PD	ST	1	-	K, LZ	K, T	-	K	-
SABRI & BEAMON (2000)	S	S	N	PD	ST	1	-	CSL, F, K	ST	-	K	-
SADIADY & DAVOUDPOUR (2012)	S	D	N	PD	ST	1	-	K, Z	K, ST, T	-	H	-
SADRINA et al. (2013)	S	D	N	PD	ST	1	-	K, N	ST, T	-	H	A
SAFAEI (2014)	M	D	N	PD	ST	1	-	CSL, K, S	A	-	K	-
SAHRAEIAN (2013)	S	D	N	P	ST	1	-	K, N	ST	-	K, H	-
SARRAFHA et al. (2015)	M	D	N	PD	ST, A	1	-	CSL, K	A	-	H	-
SELIM & OZKARAHAN (2008)	S	D	N	PD	ST	1	-	CSL, I, K	K, ST	-	K	-
SMITH et al. (2015)	S	D	N	PD	ST	1	-	N, P	ST, T	-	K	S
VARTHANAN et al. (2012)	M	S	N	P	ST, A	1	-	K, S	K	-	H	A
VENKATADRI et al. (2012)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, R, S	K, ST	R	K, H	-
F. WANG et al. (2011)	S	D	N	PD	ST	1	-	K, N	ST	-	K	E
J. WANG & SHU (2007)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, Z	ST	-	H	E
YANG et al. (2015)	S	S	N	PD	ST	1	-	K, R	ST	-	K, H	S

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

der um mehr als 30% angestiegen. Eine mögliche Erklärung dieser Entwicklung ist in der zunehmenden Effizienz von Algorithmen sowie der ansteigenden Rechenleistungen zu sehen, die eine Modellierung von Unsicherheiten erst ermöglicht hat. Die folgende Abkehr von stochastischen Optimierungsmodellen ist möglicherweise auf die damit einhergehende hohe Komplexität zurückzuführen. Der niedrige Anteil an Modellen, die eine Abbildung einer unbegrenzten Anzahl an Produktionsschritten erlauben sowie der hohe Anteil an Ansätzen die neben dem Produktions- auch das Distributionsnetzwerk abbilden, zeigt, dass bestehende Ansätze eher auf die unternehmensübergreifende Supply Chain Optimierung denn auf die umfassende Konfiguration des Produktionsnetzwerks eines fokalen Unternehmens ausgerichtet sind. Die vorherrschende Betrachtungstiefe auf Ebene von Produktionsstandorten sowie die in lediglich drei Modellen vorzufindende Gliederung des Produktportfolios stützt diese These ebenso wie die in Abbildung 3.5 dargestellte Berücksichtigung verschiedener Entscheidungsvariablen. Die Errichtung und Schließung von Standorten dominiert die modellierten Entscheidungsaspekte.

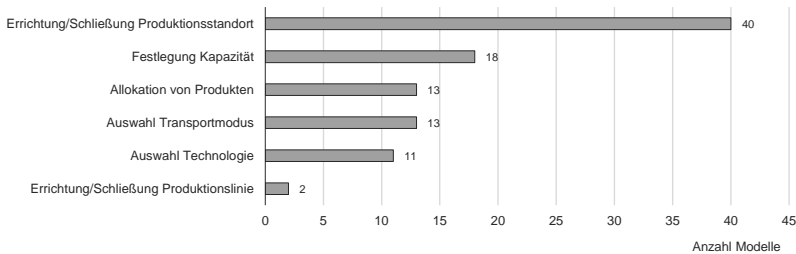


Abbildung 3.5: Betrachtete Entscheidungen zur Netzwerkconfiguration

Wie aus Abbildung 3.6 hervorgeht, kommt der Betrachtung finanzieller Zielgrößen (K, KW, P, I) die mit Abstand größte Bedeutung zu. Ferner spielen Ziele aus den Bereichen Nachhaltigkeit, Durchlauf- bzw. Lieferzeit und Risiko eine wesentliche Rolle ebenso wie die Kategorien *Customer Service Level* und Lieferzuverlässigkeit, die in der Literatur nicht trennscharf unterschieden werden und daher gemeinsam zu betrachten sind. Die Kriterien Qualität und Flexibilität werden nur selten herangezogen.

Zur Lösung der Optimierungsmodelle werden in 26 der 54 Modelle kommerzielle Standardsolver und in 15 Modellen Heuristiken eingesetzt. In weiteren vier Modellen kommen sowohl Heuristiken als auch kommerzielle Standardsolver zur Anwendung. Fallspezifische Algorithmen werden in zwei Modellen zur Lösung herangezogen und

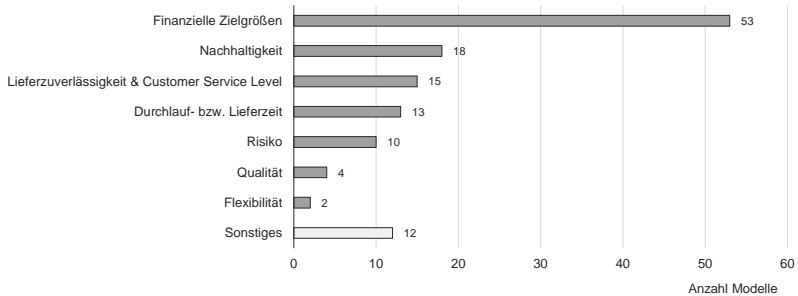


Abbildung 3.6: Eingesetzte Zielgrößen zur Netzwerkkonfiguration

spielen damit eine untergeordnete Rolle. Die Dominanz kommerzieller Standardsolver zeugt von deren Eignung zur Lösung der formulierten Optimierungsmodelle.

Hinsichtlich des Tests bzw. der Validierung relevanter Optimierungsmodelle ist festzustellen, dass lediglich ca. die Hälfte der Ansätze einer praxisnahen Anwendung unterzogen wird. Produktionsnetzwerke aus der Automobil- und Chemieindustrie sind mit jeweils sechs Praxisbeispielen am häufigsten Gegenstand der Untersuchung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Einsatz multikriterieller Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN deutlich zunimmt. Der Schwerpunkt bestehender Modelle liegt auf dem unternehmensübergreifenden Supply Chain Design. Eine umfassende und realitätsnahe Modellierung von Produktionsnetzwerken inkl. der im Rahmen der Netzwerkkonfiguration zu treffenden Entscheidungen stellt die Ausnahme dar. Aufgrund der vielfach unterlassenen praxisnahen Anwendung sind Defizite hinsichtlich der Praxistauglichkeit der Modelle zu vermuten. Im Folgenden werden fünf der 54 Ansätze einer detaillierten Bewertung hinsichtlich der in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen unterzogen. Die Modelle wurden so ausgewählt, dass sie möglichst repräsentativ für die Gesamtmenge der Ansätze stehen und innovative Aspekte beinhalten.

#### 3.3.2.4 Review ausgewählter Modelle

**Multikriterielles Optimierungsmodell nach ARNTZEN et al. (1995)** Auf ARNTZEN et al. (1995) geht das älteste umfangreiche multikriterielle Optimierungsmodell zur Netzwerkkonfiguration zurück. Das Modell wurde über mehrere Jahre hinweg zur Gestaltung des Produktionsnetzwerks der *Digital Equipment Corporation* entwickelt.

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

Das mehrperiodige, deterministische Modell erlaubt die Abbildung einer allgemeinen Stücklistenstruktur und damit die Modellierung einer unbegrenzten Anzahl an Produktionsschritten. Darüber hinaus werden umfangreiche internationale Aspekte wie *Local Content Anforderungen*, Zölle und Zollrückerstattungen betrachtet. Unter den Zielgrößen der Kosten- und Durchlaufzeitminimierung wird über die Aktivität von Produktionsstandorten sowie die an den Standorten eingesetzten Produktionstechnologien, die Zuweisung von Produkten zu Produktionsstandorten sowie die Auswahl von Transportmodi entschieden. Die beiden Zielgrößen werden unter Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren summiert und das multikriterielle Modell so in ein monokriterielles Ersatzproblem überführt.

Das Modell von ARNTZEN et al. (1995) ist vielen aktuelleren multikriteriellen Optimierungsmodellen hinsichtlich der Netzwerkmodellierung, dem Umfang der implementierten Entscheidungen und berücksichtigten Einflussfaktoren überlegen. Mit vier Entscheidungsvariablen zur Netzwerkgestaltung zählt der Ansatz zu der Gruppe an Modellen, welche die meisten Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration abdecken. Der analytischen Leistungsfähigkeit des Modells stehen prozessuale Unzulänglichkeiten gegenüber. So ist das Modell nicht für die Generierung multipler Handlungsalternativen geeignet, ist nicht in einen mehrstufigen Entscheidungsprozess eingebunden und die Ableitung der Zielgrößen wird nicht thematisiert.

#### **Multikriterielles Optimierungsmodell nach BOGASCHEWSKY & KOHLER (2010)**

Die detaillierte Abbildung internationaler Aspekte der Netzwerkkonfiguration bildet einen Schwerpunkt der Arbeit von BOGASCHEWSKY & KOHLER (2010). Im Einzelnen werden auf Basis der Ausführungen von KOHLER (2008) Wechselkurse, Zölle inkl. Zollrückerstattungen, *Local Content Anforderungen*, Steuern und Transferpreise modelliert. Durch die Anwendung der  $\epsilon$ -constraint Methode wird das multikriterielle Modell zur gleichzeitigen Optimierung des *Free Cash Flow to the Firm*, der Durchlaufzeit sowie der  $CO_2$ -Emissionen in ein monokriterielles Ersatzproblem überführt. Die Erfassung der Eingangsdaten wird als eine der größten Herausforderungen bei der Anwendung multikriterieller Optimierungsmodelle in der unternehmerischen Praxis bezeichnet. Als Konsequenz werden die Notwendigkeit eines hohen Aggregationsniveaus bei der Netzwerkmodellierung sowie der Einsatz von Datenbanksystemen angeführt.

Das Optimierungsmodell von BOGASCHEWSKY & KOHLER (2010) setzt neue Maßstäbe zur Berücksichtigung internationaler Aspekte. Zudem ist die Erzeugung multipler

Handlungsalternativen vorgesehen. Die Datenerfassung wird als erfolgskritischer Aspekt zum Praxiseinsatz von Optimierungsmodellen erkannt. Dieser Herausforderung wird jedoch nicht durch eine Optimierung des Datenbeschaffungsprozesses sondern durch ein höheres Aggregationsniveau bei der Netzwerkmodellierung und damit einer sinkenden Abbildungsgenauigkeit des Entscheidungsproblems begegnet.

**Multikriterielles Optimierungsmodell nach KHAOULA et al. (2013)** Der Ansatz von KHAOULA et al. (2013) sieht eine zweistufige Vorgehensweise zur Netzwerkkonfiguration vor. In der ersten Phase werden die erforderlichen Wertschöpfungsschritte ermittelt und die Freiheitsgrade in Form von potentiellen Zulieferern, Produzenten und Vertriebshändlern mittels eines erweiterten AHP-Verfahrens<sup>3</sup> unter Berücksichtigung des Produktlebenszyklus bewertet. Für jede Produktlebenszyklusphase wird für jeden Freiheitsgrad ein Effizienzwert ermittelt, der in Phase zwei als Nebenbedingung in das mehrperiodige, deterministische, multikriterielle Optimierungsmodell eingeht. Die beiden Zielgrößen zur Minimierung der Gesamtkosten sowie der  $CO_2$ -Emissionen werden durch die gewichtete Summe in eine Zielfunktion überführt.

KHAOULA et al. (2013) gehen von der Annahme aus, dass die Wettbewerbskriterien entscheidend von der Produktlebenszyklusphase abhängen. Die Berücksichtigung dieser Abhängigkeit stellt einen innovativen Aspekt des Optimierungsmodells dar. Auf eine Herleitung der eingesetzten Zielgrößen verzichten die Autoren. Der Einsatz des Modells zur Erzeugung multipler Handlungsalternativen ist nicht vorgesehen. Mit der Festlegung, welche Produktionsstandorte geöffnet bzw. geschlossen werden sollen, deckt das Modell nur eine Entscheidungsdimension der Konfiguration GPN ab.

**Multikriterielles Optimierungsmodell nach LIU & PAPAGEORGIU (2013)** LIU & PAPAGEORGIU (2013) stellen ein multikriterielles Optimierungsmodell zur Netzwerkkonfiguration vor, in dem sowohl eine Gliederung des Produktportfolios vorgenommen wird, als auch technische Restriktionen berücksichtigt werden. Die Menge aller Produkte wird in Produktgruppen eingeteilt. Bei der Allokation von Produkten zu Standorten wird sichergestellt, dass Standorte nur Produkte aus bestimmten

---

<sup>3</sup>Bei dem von SAATY (1977) entwickelten Analytischen Hierarchieprozess (AHP) handelt es sich um ein fünfstufiges multikriterielles Entscheidungsunterstützungsverfahren. Für eine detaillierte inhaltliche Beschreibung des Verfahrens sei auf die Fachliteratur verwiesen (z. B. SAATY (1990) und ZIMMERMANN & GUTSCHE (1991, S. 65-91))

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

Gruppen herstellen können. Durch technische Restriktionen bzgl. der realisierbaren Kapazitätssteigerungsrate wird die Festlegung der Standortkapazität limitiert. Die Berücksichtigung von Umbauzeiträumen sowie Kosten für Kapazitätserweiterungen und Produktallokationsentscheidungen wird explizit ausgeschlossen. Zur Lösung des Optimierungsmodells mit dem Ziel der gleichzeitigen Minimierung der Gesamtkosten, Durchlaufzeit und nicht realisierbaren Verkäufen werden das  $\epsilon$ -*constraint* Verfahren und die lexikographische Minimax-Methode angewendet.

Das Optimierungsmodell von LIU & PAPAGEORGIOU (2013) bietet durch technische Restriktionen und der Gliederung des Produktportfolios in Produktgruppen die Möglichkeit zur realitätsnahen Modellierung von Produktionsnetzwerken auf Ebene von Standorten. Mit der Vernachlässigung der finanziellen Aufwände für Kapazitätsanpassungen wird jedoch ein relevanter Einflussfaktor auf die Netzwerkkonfiguration vernachlässigt. Eine strategische Ableitung der drei verfolgten Zielsetzungen findet nicht statt. Mit den Festlegungen der Produktallokation sowie der Standortkapazitäten werden zwei Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration abgedeckt. Die Eröffnung bzw. Schließung von Standorten wird nicht betrachtet.

**Multikriterielles Optimierungsmodell nach LANZA & R. MOSER (2014)** Das multikriterielle Optimierungsmodell von LANZA & R. MOSER (2014) umfasst im Gegensatz zum Großteil anderer Modelle sowohl quantitative als auch qualitative Zielgrößen. Wie in der Arbeit von R. MOSER (2014) detailliert beschrieben, werden quantitative Größen ausgehend von einer Nominal- in eine Kardinalskala übersetzt und damit metrisch messbar gemacht. Zur Herstellung der Vergleichbarkeit der verschiedenen Kriterien wird jede Zielgröße in eine auf dem Intervall  $[0, 1]$  normierte Nutzenfunktion überführt. Zur Lösung des Modells kommt ein hybrider Ansatz aus Referenzpunktverfahren und  $\epsilon$ -*constraint* Methode zum Einsatz. Zur Berücksichtigung bestehender Unsicherheiten im Rahmen der Netzwerkkonfiguration werden konsistente Zukunftsszenarien ermittelt. Für jedes Szenario wird das Optimierungsmodell gelöst und so der Wandlungsbedarf und -zeitpunkt von Produktionsnetzwerken unter Berücksichtigung multidimensionaler Zukunftsunsicherheiten bestimmt.

Die umfangreiche Modellierung relevanter Kostensätze und die Berücksichtigung quantitativer Zielgrößen sowie multidimensionaler Unsicherheiten bilden zentrale Stärken des Ansatzes von LANZA & R. MOSER (2014). Die Abbildungsgenauigkeit kann durch die Untergliederung des betrachteten Produktportfolios sowie die Aufnahme technischer Restriktionen weiter verbessert werden.



### 3.3.2.5 Fazit zu multikriteriellen Optimierungsmodellen

Die deutliche Zunahme an relevanten Veröffentlichungen zu multikriteriellen Optimierungsmodellen zeigt die Eignung dieses Verfahrens zur Konfiguration GPN. Hinsichtlich der Erfüllung der in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen zeigt sich im Vergleich zu den erläuterten Prozessmodellen ein weitgehend entgegengesetztes Bild. Die implizite Definition und vollständige Durchsuchung des Lösungsraums zur Ermittlung konkreter Handlungsalternativen unter Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren sowie eines multikriteriellen Zielsystems bilden im Gegensatz zu Prozessmodellen die zentralen Stärken der Ansätze in dieser Kategorie. Dennoch deckt keines der analysierten Optimierungsmodelle die in Abschnitt 1.4.2.3 beschriebenen Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration vollständig ab. Weiterhin bietet die Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit durch die Berücksichtigung technischer Restriktionen wie bspw. Umbauzeiträume sowie eine Gliederung des betrachteten Produktportfolios Raum für Verbesserung. Den hohen Erfüllungsgraden analytischer Aspekte stehen mit Ausnahme des Kriteriums zum Einsatz eines multikriteriellen Zielsystems weitgehend vernachlässigte prozessuale Anforderungen gegenüber. So wird auf eine Einbettung der Netzwerkkonfiguration in die Unternehmensstrategie durch eine strategische Zielableitung größtenteils ebenso verzichtet wie auf die Erzeugung multipler Handlungsalternativen. Eine Integration der Optimierungsmodelle in ein Phasenmodell zur Netzwerkkonfiguration ist im Allgemeinen nicht vorgesehen. So werden für die Modellanwendung unerlässliche Schritte wie bspw. Datenerfassung kaum thematisiert.

Zusammenfassend stellt die multikriterielle Optimierung ein vielversprechendes Verfahren zur Ermittlung konkreter Netzwerkalternativen unter Erfüllung der analytischen Anforderungen dar. Neben der Behebung der prozessualen Schwächen sind bestehende Ansätze insbesondere hinsichtlich der berücksichtigten Entscheidungsdimensionen sowie der vorgesehenen Abbildungsgenauigkeit zu erweitern.

### 3.3.3 Kombinierte Ansätze zur Netzwerkkonfiguration

**Kombinierter Ansatz nach MEYER (2008a)** Die vier Phasen *Identifikation des Handlungsbedarfs und strategischer Ziele, Modellierung der bestehenden Produktion, Entwicklung des strategischen Netzwerkkonzepts* sowie *Implementierung und Management der Netzwerkanpassung* bilden den Kern des Prozessmodells von MEYER (2008a). Die Ausführungen gehen im Wesentlichen auf die Arbeit von MEYER (2006) zurück,

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

die für die Alternativenentwicklung ein monokriterielles Optimierungsmodell vorsieht. Für MEYER (2008a) bildet die Identifikation des Handlungsbedarfs den Ausgangspunkt der Netzwerkkonfiguration. Hierfür werden fünf Indikatoren angeführt. Die Phase zur Modellierung der bestehenden Produktion beinhaltet die Datenerhebung. Für die Entwicklung des strategischen Netzwerkkonzepts sieht MEYER (2008a) eine zweistufige Vorgehensweise vor. Zunächst wird mit einem Greenfield-Ansatz eine ideale Netzwerkalternative erarbeitet. Hierfür kommt eine iterative Vorgehensweise aus Definition von Netzwerkalternativen, deren Diskussion und erneuter Alternativenentwicklung zum Einsatz. Zur Bewältigung dieser Aufgabe kann das von MEYER (2006) formulierte Optimierungsmodell mit dem Ziel der Minimierung der *Total Landed Costs*<sup>4</sup> herangezogen werden. Im zweiten Schritt wird der Idealplan der Netzwerkstruktur im Rahmen der Migrationsplanung an bestehende Restriktionen angepasst.

Der kombinierte Ansatz von MEYER (2008a) sieht die Erarbeitung einer idealtypischen Netzwerkstruktur unter Vernachlässigung von Investitionsaufwänden vor. Es bleibt intransparent wie die Idealplanung anschließend in eine Realplanung überführt werden kann. Die Erzeugung multipler Handlungsalternativen unter Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen wird gefordert, jedoch nicht weiter ausgeführt. Durch die schrittweise Alternativenentwicklung unter Berücksichtigung neu gewonnener Erkenntnisse stellt MEYER (2008a) einen Ansatz zur Verfügung, der eine iterative Datenerhebung vorsieht, obgleich diese nicht explizit erwähnt und detailliert ausgearbeitet wird.

**Kombinierter Ansatz nach VARANDANI (2014)** VARANDANI (2014) stellt eine Vorgehensweise zur kostenoptimalen Konfiguration GPN unter Berücksichtigung der Managementkomplexität als Gestaltungsgröße vor. Die Datenerhebung bildet den Ausgangspunkt des kombinierten Ansatzes. Zur Ermittlung kostengerechter Netzwerkalternativen kommt die am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen entwickelte Software *OptiWo* zum Einsatz. Diese erlaubt die Optimierung der Netzwerkstruktur hinsichtlich der *Total Landed Costs* für einen Zielzeitraum. Zudem besteht die Option Nebenbedingungen zur Durchlaufzeit aufzunehmen. Durch eine Variation der Eingangsgrößen wie bspw. der Absatzzahlen werden mehrere kostenoptimale Szenarien erzeugt. Die erforderlichen Aufwände zur Migration des aktuellen Produktionsnetzwerks in

---

<sup>4</sup>Die *Total Landed Costs* beinhalten Fertigungs-, Material- und Logistikkosten sowie Zölle, die bis zur Übergabe des Produkts an den Kunden anfallen. (MEYER & JACOB 2008, S. 140)

die Zielstruktur fließen in die einperiodige Betrachtung nicht mit ein. Dies erfordert im dritten Schritt die Eingrenzung der kostenoptimalen Handlungsalternativen durch Betrachtung der Umsetzungskosten sowie Machbarkeit. In der vierten Phase erfolgt die Bewertung der Managementkomplexität der verbleibenden Optionen.

Mit der Wahl der Datenerhebung als Ausgangspunkt für das Gestaltungsmodell werden die vorgelagerten Phasen der Entscheidungsfindung *Identifikation des Handlungsbedarfs*, *Definition der Problemstellung* und *Präzisierung des Zielsystems* vernachlässigt. Die Einbettung der Netzwerkkonfiguration in die Unternehmensstrategie ist daher kein Bestandteil des Ansatzes. Mit der Zielgröße *Total Landed Costs*, einer Nebenbedingung zur Durchlaufzeit sowie dem Kriterium zur Bewertung der Managementkomplexität kommt ein multikriterielles Zielsystem zum Einsatz. Die erreichbare Lösungsqualität wird durch eine sequentielle Betrachtung der Zielgrößen eingeschränkt. Da die Managementkomplexität nicht als Zielgröße im mathematischen Modell berücksichtigt wird, werden mehrere Alternativen auf Basis unterschiedlicher Eingangsdaten erzeugt, deren Vergleichbarkeit kritisch zu hinterfragen ist. Bei der nachgelagerten Bewertung der Managementkomplexität besteht folglich die Gefahr, nicht die optimale Netzwerkalternative auszuwählen, sondern den Satz an Eingangsdaten für das Optimierungsmodell, der auf die Handlungsoption mit der geringsten Managementkomplexität führt.

**Kombinierter Ansatz nach HÜBNER (2007)** Der aus vier Schritten bestehende kombinierte Ansatz von HÜBNER (2007) deckt inhaltlich, mit Ausnahme der Realisierung, alle Phasen des Entscheidungsfindungsprozesses (vgl. Abschnitt 2.1.2) ab. Die Erläuterungen zur Phase der Problemdefinition beschränken sich auf Aufzählungen möglicher Gründe, die eine Netzwerkanpassung erfordern, potentielle Ziele der Netzwerkgestaltung und möglicher Typen von Projekten zur Netzwerkkonfiguration. Im Hinblick auf die Datenerhebung beschreibt HÜBNER (2007, S. 44) die Notwendigkeit einer iterativen Vorgehensweise. Zur Ermittlung von betriebswirtschaftlich optimalen Netzwerkalternativen wird ein umfangreiches monokriterielles, deterministisches lineares Optimierungsmodell formuliert. Das Modell leistet eine integrierte Bestimmung der Anzahl und Lage der Standorte, Kapazität und Technologie der Werke sowie die Zuweisung von Produkten und Märkten zu Werken. Betrachtungen auf der Ebene von Produktionslinien sind nicht vorgesehen. Mit der Evaluation der ermittelten betriebswirtschaftlich optimalen Netzwerkalternativen mittels Sensitivitäts- und Risikoanalysen sowie einer Kosten-Nutzen Bewertung wird die Vorbereitung der im letzten Schritt zu treffenden Entscheidung abgeschlossen. Ergibt sich bei der Optimierung des Produkti-

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

onsnetzwerks die Notwendigkeit der Eröffnung eines neuen Standortes, so schließt sich die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtete Standortauswahl an.

Der Ansatz von HÜBNER (2007) weist hohe Erfüllungsgrade sowohl bezüglich der analytischen als auch prozessualen Anforderungen auf. Das umfassende mathematische Optimierungsmodell dient zur vollständigen Durchsuchung des Lösungsraums sowie zur Definition konkreter Alternativen. Durch die Beschränkung auf eine finanzielle Zielfunktion erlaubt das Modell jedoch keine Berücksichtigung strategischer Zielgrößen. Ferner mündet die geforderte Entwicklung mehrerer Handlungsalternativen durch die Beschränkung auf eine finanzielle Zielgröße in artgleichen Szenarien. Die fehlende Ausarbeitung eines Konzepts für die von HÜBNER (2007) als notwendig erachtete iterative Datenerhebung bietet weiteres Verbesserungspotenzial.

**Kombinierter Ansatz nach ERNST (2012)** Mit seinem kombinierten Ansatz verfolgt ERNST (2012) die Zielsetzung, eine Methode zur Ermittlung von Standortstrukturalternativen auf Basis qualitativ vorliegender Faktoren und Zusammenhänge für Maschinenbauunternehmen zur Verfügung zu stellen. Da eine rein qualitative Modellierung der Entscheidungssituation erfolgen soll, greift ERNST (2012) auf das Konzept der *Fuzzy Cognitive Maps* (FCM) zurück. Diese erlauben die Ermittlung von Standortstrukturalternativen unter Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren bei Vorliegen einer qualitativen Beschreibung von Faktoren und Wirkzusammenhängen. Der Direktinvestitionsgrad pro Region, der Teilungsgrad pro Produktionsstufe und Produkt sowie der Teilungsgrad der Wertschöpfungskette pro Produkt bilden die Entscheidungsvariablen des Modells. Die Ermittlung der kausalen Wirkzusammenhänge zwischen Entscheidungsvariablen und Einflussfaktoren bzw. Zielgrößen führt auf das vollständige Wirkmodell. Die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren für die Zusammenhänge wird mit dem Argument einer notwendigen individuellen Abschätzung im Anwendungsfall nicht betrachtet. In der Optimierungsphase werden die optimalen Aktivierungsgrade der Variablen unter Einsatz genetischer Algorithmen ermittelt. Da eine Netzwerkalternative bei diesem Verfahren nicht durch die Ausprägungen der Variablen definiert ist, sind diese anschließend zu ermitteln. Im Allgemeinen ist laut ERNST (2012) anzunehmen, dass mehrere Alternativen die optimale Ausprägung der Variablen erreichen können.

Der Abgleich des kombinierten Ansatzes von ERNST (2012) mit dem allgemeinen Entscheidungsfindungsprozess (vgl. Abschnitt 2.1.2) zeigt die Abdeckung der Phasen von der *Definition der Aufgabenstellung* bis hin zur *Entwicklung von Handlungsalternativen*. Sowohl die Ableitung von Zielgrößen als auch zu berücksichtigender Einflussfaktoren

basieren auf umfangreichen Analysen. Ferner erfolgt die vollständige Durchsuchung des implizit definierten Lösungsraums der Netzwerkkonfiguration. Durch die Wahl einer rein qualitativen Modellierung der Entscheidungssituation hängt das Ergebnis der mathematischen Optimierung jedoch maßgeblich von der subjektiv geprägten Bestimmung der kausalen Zusammenhänge und deren Gewichtungsfaktoren ab. Die gewählte Modellierung führt darüber hinaus nicht auf konkrete Standortstrukturalternativen durch eine Festlegung der in Abschnitt 1.4.2.3 erläuterten Entscheidungsdimensionen. Eine Beschreibung, wie die Ermittlung dieser Netzwerkszenarien erfolgen soll ist nicht Teil der Ausführungen von ERNST (2012).

**Kombinierter Ansatz nach HOCHDÖRFFER (2018)** HOCHDÖRFFER (2018) stellt eine aus vier Hauptbestandteilen bestehende Methodik zur integrierten Bestimmung der Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken vor. Das erste Modul zielt auf die Clusterung des Produktportfolios ab, sodass Produkte für die nachfolgenden Schritte aggregiert betrachtet werden können. Das Optimierungsmodul besteht aus einem monokriteriellen, gemischt-ganzzahligen, linearen Optimierungsmodell zur Identifikation der gesamtkostenoptimalen Lösung. Das Optimierungsmodell zeichnet sich durch die Berücksichtigung zahlreicher betriebs- und migrationsrelevanter Restriktionen aus. Im Rahmen des Analysemoduls wird die identifizierte Lösung anwendergerecht visualisiert und mittels Methoden der postoptimalen Analyse weiter verbessert. Das vierte Modul besteht aus einem Vorgehensmodell zur Postoptimierung und dient zur Zusammenführung der Module zwei und drei.

Der Ansatz von HOCHDÖRFFER (2018) weist mit der fehlenden Betrachtung der Schritte vor der Lösungsfindung eine geringe Konformität zum allgemeinen Prozessmodell der Entscheidungsfindung auf. Auf die Erzeugung multipler Handlungsalternativen wird verzichtet. Die fehlende Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Alternativenentwicklung mittels Optimierungsmodellen wird jedoch vertieft thematisiert. Dem erkannten Defizit wird durch die Visualisierung der Ergebnisse sowie der postoptimalen Lösungsverbesserung begegnet. Entscheidungen zur Netzwerkkonfiguration werden aufgrund der hohen finanziellen und strategischen Bedeutung in der Regel auf sehr hohen Managementebenen getroffen. Da diese nicht aktiv in die postoptimale Analyse und Lösungsverbesserung eingebunden werden können, erscheint die Entwicklung und Vorlage multipler Entscheidungsvarianten vielversprechender. Das entwickelte Optimierungsmodell zeichnet sich durch eine hohe Detailtiefe der Netzwerkmodellierung, der Berücksichtigung der wesentlichen Entscheidungsdimensionen sowie durch eine

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

rechenzeitfokussierte Modellierung aus. Auf die Berücksichtigung eines modularen Produktportfolios sowie der daraus folgenden Interdependenz von Konfigurationsentscheidungen wird verzichtet. Die erforderliche Datenbeschaffung für die Parametrierung des Lösungsraumes wird nicht vertieft behandelt.

**Kombinierter Ansatz nach E. MOSER (2018)** E. MOSER (2018) verfolgt das Ziel robuste Migrationspfade und risiko-effiziente Wandlungsbefähiger für Produktionsnetzwerke im volatilen Unternehmensumfeld zu entwickeln. Hierfür wird ein aus drei Phasen bestehendes Vorgehensmodell vorgestellt. Die erste Phase, die als Konfigurationsphase bezeichnet wird, besteht aus der Formulierung der globalen Produktionsstrategie sowie der Modellierung von Netzwerkkonfigurationen. Ausgehend von der Priorisierung von Differenzierungsfaktoren werden strategische Netzwerk- und Standortfähigkeiten abgeleitet und mögliche Netzwerkressourcen zu deren Realisierung modelliert. In der Optimierungsphase wird anschließend die kostenoptimale Migrationsstrategie ermittelt und robuste Migrationspfade bestimmt. Hierfür wird ein stochastisches Optimierungsmodell zur Verfügung gestellt. Die Selektionsphase dient abschließend zur Selektion risiko-effizienter Wandlungsbefähiger mit dem Ziel das optimale Level an Wandlungsfähigkeit für die zu migrierenden Netzwerkressourcen zu gewährleisten.

Das Vorgehensmodell von E. MOSER (2018) weist nur eine eingeschränkte Konformität zum allgemeinen Prozessmodell der Entscheidungsfindung auf. Unter anderem wird die Phase der Datenerhebung weitestgehend vernachlässigt. Insbesondere vor dem Hintergrund des Einsatzes eines stochastischen Optimierungsmodells ist diese als erfolgskritisch sowie zeitintensiv einzuschätzen. Das Kriterium zur strategischen Zielableitung wird hingegen fast vollständig erfüllt. Ausgehend von einer Stärken-Schwächen-Analyse werden erforderliche Standort- und Netzwerkfähigkeiten abgeleitet. Die entwickelten Ziele werden jedoch nicht in Form von Metriken in das Optimierungsmodell überführt sondern dienen zur Auswahl vielversprechender zukünftiger Netzwerkressourcen. Im weiteren Vorgehen werden multiple Handlungsalternativen entwickelt. Dies geschieht nicht im Sinne der eingangs definierten globalen Produktionsstrategie sondern im Sinne der Identifikation aller risiko-effizienter Bündel der Wandlungsbefähiger. Das stochastische Optimierungsmodell beinhaltet zahlreiche wesentliche Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration und löst das Entscheidungsproblem bis auf die Ebene von Linien auf. Die Detailtiefe der Netzwerkmodellierung kann durch die Berücksichtigung von migrations- und betriebsrelevanten Restriktionen, wie bspw. durch HOCHDÖRFFER (2018) vorgestellt, weiter gesteigert werden.

**Fazit zu kombinierten Ansätzen** Kombinierte Ansätze erfüllen sowohl prozessuale als auch analytische Anforderungen. Durch die vollständige Durchsichtung des Lösungsraums einerseits und der Berücksichtigung relevanter Aspekte aus dem Entscheidungsfindungsprozess andererseits sind sie Prozessmodellen und multikriteriellen Optimierungsmodellen konzeptionell überlegen. Die Einbeziehung prozessualer Anforderungen manifestiert sich in den diesen Ansätzen in der Forderung nach der Erzeugung multipler Handlungsalternativen. Keiner der Autoren unternimmt den Versuch *die eine optimale Lösung* unmittelbar durch mathematische Verfahren zu ermitteln.

Im Hinblick auf analytische Gesichtspunkte besteht bei den erläuterten Ansätzen Verbesserungspotenzial hinsichtlich des Umfangs der berücksichtigten Entscheidungsdimensionen sowie der Detailtiefe der Netzwerkmodellierung. Während HÜBNER (2007) und ERNST (2012) auf eine Betrachtung auf Ebene von Produktionslinien verzichten, ist bei VARANDANI (2014) eine einzige Zeitperiode Gegenstand der Optimierung. Der kombinierte Ansatz von E. MOSER (2018) weist eine Modellierung auf Ebene von Produktionslinien auf, vernachlässigt jedoch bspw. die kapazitiven Auswirkungen der Anpassung von bestehenden Netzwerkressourcen. Das Modell von HOCHDÖRFFER (2018) hingegen weist eine weitgehend hohe Abbildungsgenauigkeit auf, berücksichtigt jedoch die erforderliche Betrachtung eines segmentierten modularen Produktportfolios nicht. Der Ansatz von MEYER (2008a) kann diesbezüglich nicht abschließend bewertet werden, da die Nebenbedingungen des Optimierungsmodells nicht offengelegt werden. Weitaus größeres Verbesserungspotenzial bieten die vier kombinierten Ansätze hinsichtlich des Zusammenspiels des mathematischen Optimierungsmodells mit dem multikriteriellen Zielsystem. MEYER (2008a), VARANDANI (2014), HOCHDÖRFFER (2018), E. MOSER (2018) und HÜBNER (2007) setzen ein monokriterielles Optimierungsmodell ein und ermitteln in einem ersten Schritt betriebswirtschaftlich optimale Netzwerkalternativen. Strategische Zielgrößen wie bspw. Flexibilität, Managementkomplexität, Risikoeffizienz oder eine managementgerechte Visualisierung und weitere Lösungsoptimierung werden erst nachgelagert berücksichtigt. Bei ERNST (2012) hingegen findet eine integrierte Betrachtung mehrerer Zielgrößen bei der Optimierung statt. Allerdings werden bei diesem Ansatz auch quantitative Ziele wie bspw. Kosten rein qualitativ betrachtet. Dieses Defizit der Modelle mündet in einer unzulänglichen Vorgehensweise zur Erzeugung multipler Handlungsalternativen. Hierzu ist bei MEYER (2008a), VARANDANI (2014) und HÜBNER (2007) eine Variation der Parameter des Optimierungsmodells wie bspw. Bedarfsmengen erforderlich. Der Ansatz von ERNST (2012) erfordert nach der Optimierung eine manuelle Alternativenermittlung. HOCH-

DÖRFFER (2018) verzichtet auf die Erzeugung mehrerer Handlungsalternativen und setzt auf die Visualisierung der identifizierten Lösung sowie deren postoptimale Verbesserung. Das stochastische Modell von E. MOSER (2018) setzt abschließend auf die Identifikation aller risiko-effizienter Bündel der Wandlungsbefähiger. Die Entscheidung für eine Alternative basiert auf der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers. Abschließend ist festzuhalten, dass die geforderte iterative Datenerhebung lediglich im kombinierten Ansatz von MEYER (2008a) implizit aufgegriffen wird. Eine ausgearbeitete Vorgehensweise hierzu stellt keiner der Autoren bereit.

#### 3.3.4 Bewertungsansätze im Rahmen der Netzwerkkonfiguration

**Bewertungsansatz nach MERCHIEERS (2008)** MERCHIEERS (2008) stellt eine Bewertungsunterstützung für die Gestaltung und Auswahl von Standortstrukturalternativen vor. Der Fokus liegt auf der quantitativen Bewertung von Handlungsalternativen in frühen Phasen der Standortstrukturplanung. Die Anwendung setzt im Vorfeld die Einschränkung des impliziten auf einen expliziten Lösungsraum voraus. Als Lösungsverfahren kommt die dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung zum Einsatz. Mit dem Ziel der verursachungsgemäßen Erfassung von Kosten und Zahlungen erfolgt eine Unterscheidung zwischen der Modulebene, der Standortebene und der Netzwerkebene.

Der Ansatz von MERCHIEERS (2008) bietet eine umfangreiche Übersicht zu den relevanten Kostengrößen der Netzwerkkonfiguration in verschiedenen Unternehmensbereichen aufgeteilt in die Ebenen Modul, Standort und Netzwerk. Der Ansatz bringt Transparenz in die komplexen Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Standort- und Kostenstruktur. Eine Betrachtung der Netzwerkkonfiguration auf Ebene von Produktionslinien ist nicht vorgesehen. Auf ergänzende Analysen zur Betrachtung bestehender Unsicherheiten wie bspw. Sensitivitäts- und Risikobetrachtungen verzichtet der Autor ebenso wie auf den Einsatz eines multikriteriellen Zielsystems.

**Bewertungsansatz nach KREBS (2012)** Die Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten bei der Bewertung vernetzter Produktionsstandorte bildet den Kern der Arbeit von KREBS (2012). Während quantitative Unsicherheiten mit dem Verfahren der Risikoanalyse abgebildet werden, kommt für die Modellierung qualitativer Unsicherheiten die *Fuzzy-Set-Theorie* zum Einsatz. Die entwickelte Vorgehensweise zur Bewertung von Standortalternativen besteht aus fünf, iterativ aufeinander aufbauenden Schritten. Es werden dabei ausschließlich monetäre Zielgrößen der Standortwahl



berücksichtigt. In einem entsprechenden Kalkulationsmodell sind alle relevanten Einflussfaktoren und Unsicherheiten sowie deren Abhängigkeiten abzubilden. Durch die Modellierung der einzelnen Unsicherheiten und deren Abhängigkeiten über die Wahrscheinlichkeitstheorie und das Fuzzy-Bewertungsnetz wird anschließend ein Unsicherheitsmodell aufgestellt. Die Verknüpfung des Kalkulations- und Unsicherheitsmodells erlaubt die Bestimmung des monetären Zielwerts für jede Alternative durch den Einsatz einer Monte-Carlo Simulation. Für die abschließende Phase der Bewertung werden verschiedene Verfahren zur Risikobewertung und Sensitivitätsanalyse vorgestellt.

Der Ansatz von KREBS (2012) erlaubt die detaillierte monetäre Bewertung von Standortalternativen unter Berücksichtigung vorhandener quantitativer und qualitativer Unsicherheiten. Das Bewertungsverfahren ermöglicht die unternehmensspezifische Auswahl finanzieller Zielgrößen. Mit dem Fokus der Standortwahl wird lediglich ein Aspekt der im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Netzwerkkonfiguration detailliert untersucht. Die entwickelten Verfahren zur Risikoanalyse und *Fuzzy-Set-Theorie* erscheinen für die Bewertung von Standortstrukturalternativen vielversprechend.

**Bewertungsansatz nach UDE (2010)** Der Fokus der Arbeit von UDE (2010) liegt auf der Alternativenbewertung globaler Wertschöpfungsnetzwerke unter Berücksichtigung eines multikriteriellen Zielsystems, Dynamik und Unsicherheit. Die Bewertung quantitativer und qualitativer Kriterien wird in zwei separaten Schritten vorgenommen. Im Hinblick auf quantitative Größen kommt ein dynamisches Simulationsmodell zum Einsatz. Für die Bewertung qualitativer Zielgrößen wurde das Verfahren PROMETHEE<sup>5</sup> um die dynamische Betrachtung und Berücksichtigung unsicherer Eingangsdaten erweitert. Die vielversprechendsten Alternativen werden einer umfangreichen Robustheitsuntersuchung bestehend aus Sensitivitätsanalysen, Unsicherheitsbetrachtungen und Szenarioanalysen unterzogen.

Der Ansatz von UDE (2010) stellt ein umfassendes Verfahren zur Bewertung und Analyse von Netzwerkalternativen dar. Die gewählte Zweiteilung der Bewertungsmethode stellt eine besondere Stärke dar. Sie erlaubt den separaten Einsatz von geeigneten Methoden, die auf die Charakteristika quantitativer und qualitativer Zielgrößen zugeschnitten sind. Der Einsatz eines Simulationsmodells erlaubt eine realitätsnahe Modellierung

---

<sup>5</sup>Bei PROMETHEE handelt es sich um ein multikriterielles Entscheidungsunterstützungsverfahren, das den sog. Outranking-Verfahren angehört. Für eine detaillierte inhaltliche Beschreibung des Verfahrens sei auf die Fachliteratur verwiesen (z. B. BRANS & VINCKE (1985) und GÖTZE (2014, S. 229-242))

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

von Produktionsnetzwerken. Mit umfänglichen Robustheitsuntersuchungen wird der mit der Netzwerkkonfiguration verbundenen Unsicherheit Rechnung getragen. Einzig die Durchführung von Sensitivitätsanalysen auf Basis des Simulationsmodells bietet Verbesserungspotenzial: ohne ergänzendes Optimierungsverfahren kann bei einer Simulation der Betriebspunkt einer Handlungsalternative nicht auf veränderte Parameter wie bspw. Transportkosten angepasst werden.

**Fazit zu Bewertungsansätzen** Die vorgestellten Bewertungsansätze sind auf die Auswahl einer Handlungsalternative aus einem expliziten Lösungsraum fokussiert. Sie setzen individuelle Schwerpunkte und eignen sich daher für verschiedene Einsatzzeitpunkte bei der Konfiguration GPN. Die Arbeit von MERCHERS (2008) ist auf die Anwendung zur quantitativen Bewertung in frühen Phasen der Netzwerkkonfiguration zugeschnitten. UDE (2010) behandelt die Alternativenbewertung gesamthaft und nimmt umfangreiche Robustheitsuntersuchungen vor. Mit einem geeigneten MODM-Verfahren ist im Vorfeld eine Eingrenzung des impliziten auf einen expliziten Lösungsraum erforderlich. Es ist festzuhalten, dass das Bewertungsverfahren von UDE (2010) Unternehmen zur Auswahl einer Handlungsalternative aus wenigen definierten Netzwerkszenarien umfassend befähigt. Der Bewertungsansatz von KREBS (2012) eignet sich für die anschließend ggf. erforderliche Auswahl eines Produktionsstandorts.

### 3.4 Forschungsdefizit

Im Anschluss an die Analyse relevanter Ansätze zur Konfiguration GPN in den Kategorien Prozessmodelle, multikriterielle Optimierungsmodelle, kombinierte Ansätze und Bewertungsansätze dient dieser Abschnitt zur Identifikation des bestehenden Forschungsdefizits. In Tabelle 3.4 ist der Abgleich der vorgestellten Ansätze mit den in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen zusammenfassend dargestellt.

Ausgehend von einer übergeordneten Betrachtungsweise kann festgehalten werden, dass es in der bestehenden Literatur an einem Ansatz mangelt, der sowohl den Anforderungen aus prozessualer als auch analytischer Sicht gerecht wird. Prozessmodelle erfüllen die definierten prozessualen Kriterien mit Ausnahme der iterativen Datenbeschaffung weitreichend, sind jedoch aufgrund analytischer Schwächen nicht für die Ermittlung konkreter Handlungsalternativen geeignet. Multikriterielle Optimierungsmodelle hingegen weisen ausgeprägte analytische Stärken auf, die jedoch aufgrund der Vernachlässigung relevanter Prozessschritte in der unternehmerischen Praxis nicht

Tabelle 3.4: Abgleich bestehender Ansätze zur Konfiguration GPN mit den definierten Anforderungen

Modell	Prozessuale Kriterien					Analytische Kriterien		
	Konformität zu Prozessmodell	Erzeugung multipler Alternativen	Iterative Datenbeschaffung	Multikriterielles Zielsystem	Strategische Zielausleitung	Implizite Lösungsraumdefinition	Berücksichtigte Entscheidungsdim.	Detailliertheit der Netzwerkmod.
<i>Prozessmodelle</i>								
CHRISTODOULOU et al. (2007)	●	●		●	●			
KAMPKER et al. (2010)	●	●		●	●			
LIEBECK (2009)	●	●		●	●		●	●
HERM (2006)	●	●		●	●			●
JUSTUS (2009)	●	●		●	●			●
<i>Multikriterielle Optimierungsmodelle</i>								
ARNTZEN et al. (1995)				●		●	●	●
BOGASCHEWSKY & KOHLER (2010)	●	●		●		●	●	●
KHAOULA et al. (2013)				●		●	●	●
LIU & PAPAGEORGIU (2013)		●		●		●	●	●
LANZA & R. MOSER (2014)		●		●	●	●	●	●
<i>Kombinierte Ansätze</i>								
MEYER (2008a)	●	●	●	●		●	●	●
VARANDANI (2014)	●	●		●		●	●	●
HÜBNER (2007)	●	●	●	●	●	●	●	●
ERNST (2012)	●	●		●	●	●	●	●
HOCHDÖRFFER (2018)	●		●	●		●	●	●
E. MOSER (2018)	●	●		●	●	●	●	●
<i>Bewertungsansätze</i>								
MERCHIERS (2008)	■	■	■		●	■	■	●
KREBS (2012)	■	■	■	●	●	■	■	●
UDE (2010)	■	■	■	●	●	■	■	●

Anforderung an eine Methode zur Konfiguration GPN wird...

nicht erfüllt. ● ansatzweise erfüllt. ● teilweise erfüllt. ● annähernd erfüllt. ● vollständig erfüllt.

■ Anforderung an eine Methode zur Konfiguration GPN ist für den Ansatz nicht relevant.

### 3 Stand der Erkenntnisse

---

realisiert werden können. Die Autoren der kombinierten Ansätze unternehmen den Versuch die prozessualen Stärken der Prozessmodelle mit den analytischen Vorzügen mathematischer Optimierungsmodelle zu vereinigen. Die resultierenden Ansätze weisen hohe Erfüllungsgrade hinsichtlich der Anforderungen aus beiden Kategorien auf. Neben den in Abschnitt 3.3.3 angeführten individuellen Unzulänglichkeiten der Modelle bestehen Defizite hinsichtlich der Integration von Optimierungsmodellen in Prozessmodelle. Da die Autoren MEYER (2008a), VARANDANI (2014), HOCHDÖRFER (2018), E. MOSER (2018) und HÜBNER (2007) auf den Einsatz multikriterieller Optimierungsmodelle verzichten, mangelt es ihnen nicht nur an einer strategischen Zielfunktionsableitung sondern sie sind darüber hinaus nur eingeschränkt zur Ermittlung multipler Handlungsalternativen geeignet. Im Gegensatz dazu berücksichtigt ERNST (2012) ein multikriterielles Zielsystem, bestehend aus qualitativen und quantitativen Zielgrößen. Aufgrund der Überführung quantitativer Kriterien in qualitative hängt die erreichbare Ergebnisqualität jedoch stark von subjektiven Einschätzungen ab.

Neben diesem aus einer übergeordneten Betrachtungsweise stammenden Defizit bestehen in der Literatur zur Netzwerkkonfiguration weiterhin zwei inhaltliche Unzulänglichkeiten. Erstens erlauben die analysierten Optimierungsmodelle keine ausreichende Abbildungsgenauigkeit des Entscheidungsproblems der Netzwerkkonfiguration. Die aus Kundensicht gewünschte individuelle Konfigurierbarkeit von Produkten resultiert in einer zunehmend modularen Struktur von Produktportfolios im Sinne einer Gliederung in Produktgenerationen und -familien. Dies führt zu einer Interdependenz von Maßnahmen zur Netzwerkanpassung und ist daher im Rahmen der Netzwerkkonfiguration zu berücksichtigen. Zweitens findet in keinem der analysierten Ansätze eine vertiefte Betrachtung der von BOGASCHEWSKY & KOHLER (2010, S. 27-28) als erfolgskritisch bezeichneten Phase der Datenerhebung statt. Eine iterative Vorgehensweise zur Datenbeschaffung fordern lediglich MEYER (2008a) und HÜBNER (2007), ohne jedoch ein entsprechendes Vorgehensmodell zur Verfügung zu stellen. Zusammenfassend bestehen hinsichtlich der Konfiguration GPN insbesondere die folgenden drei Defizite:

1. Keiner der analysierten Ansätze wird den Anforderungen aus der prozessualen und analytischen Komplexität der Netzwerkkonfiguration gleichermaßen gerecht.
2. Den analysierten Optimierungsmodellen zur Netzwerkkonfiguration mangelt es an einer ausreichenden Abbildungsgenauigkeit des Entscheidungsproblems.
3. Die mit erheblichem Aufwand verbundene und daher iterativ durchzuführende Datenbeschaffung wird weitestgehend vernachlässigt.

## 4 Konzeption der Methode

Dieses Kapitel legt den Grundstein zur Beantwortung der formulierten handlungsleitenden Fragestellung, wie eine Methode zur Konfiguration GPN zu konzipieren und gestalten ist, die sowohl die Anforderungen aus analytischer als auch prozessualer Komplexität erfüllt. Im Folgenden wird zunächst der Lösungsansatz präsentiert. Dieser leitet sich unmittelbar aus dem identifizierten übergeordneten Forschungsdefizit ab. Im zweiten Teil wird der Lösungsansatz zu einem Lösungskonzept ausgearbeitet.

### 4.1 Lösungsansatz

Die Erfüllung der in Abschnitt 1.3 formulierten Zielsetzung erfordert gemäß dem identifizierten Forschungsdefizit die Entwicklung eines kombinierten Ansatzes zur Netzwerkkonfiguration, in welchem die Vorteile bestehender Prozessmodelle mit den Vorzügen multikriterieller Optimierungsmodelle vereinigt werden. Aus Gründen der prozessualen Komplexität der Aufgabenstellung müssen die Phasen der Entscheidungsfindung die Grundlage für das zugehörige Prozessmodell bilden. In dieses ist ein multikriterielles Optimierungsmodell zu integrieren, da der Einsatz von Optimierungsalgorithmen zur Erfüllung der analytischen Anforderungen alternativlos ist (MEYER 2008a, S. 123; JUSTUS 2009, S. 92; KOHLER 2008, S. 3).

Der schlichte Ersatz der Phase zur Entwicklung von Handlungsalternativen in vorhandenen Prozessmodellen durch ein bestehendes multikriterielles Optimierungsmodell zur Netzwerkkonfiguration greift dabei aus folgenden drei Gründen zu kurz:

1. Das integrierte Optimierungsmodell ist derart zu gestalten, dass Ergebnisse aus vorgelagerten Phasen der Entscheidungsfindung in der Anwendung des Optimierungsmodells berücksichtigt werden können.
2. Analog zu den vorgestellten kombinierten Ansätzen darf der Einsatzzweck des Optimierungsmodells nicht in der Berechnung *der einen optimalen Lösung* bestehen. Ein solches Optimum ist nicht entscheidungsfähig, da es der Berech-

## 4 Konzeption der Methode

---

nung an Transparenz mangelt. Es widerspricht der Forderung eines detaillierten Alternativenvergleichs. Das Optimierungsmodell ist daher als Assistenzsystem aufzufassen, das den Netzwerkplaner bei der Alternativenentwicklung unterstützt.

3. Die Integration eines Optimierungsmodells in ein Prozessmodell erfordert dessen Anpassung. Mit dem Einsatz eines Optimierungsmodells geht unvermeidbar ein erheblicher Aufwand zur Datenerhebung einher. Dieser ist in bestehenden Ablaufmodellen zur Netzwerkkonfiguration insbesondere im Hinblick auf den Umgang mit einem initial nicht perfekt beschreibbaren Lösungsraum nicht berücksichtigt.

Der Lösungsansatz besteht daher in der Konzeption eines Prozessmodells mit einem eingebetteten multikriteriellen Optimierungsmodell. Gemäß der in Abschnitt 3.2 eingeführten Klassifizierung handelt es sich daher um einen kombinierten Ansatz zur Netzwerkkonfiguration. Das Optimierungsmodell wird dabei als Assistenzsystem zur systematischen Generierung von Handlungsalternativen verstanden.

### 4.2 Lösungskonzept

Dieser Abschnitt dient zur Ausarbeitung des Lösungsansatzes zu einem Lösungskonzept. Dessen Vorstellung erfolgt anhand der Einzelkonzepte für das multikriterielle Optimierungsmodell und das Prozessmodell.

#### 4.2.1 Spezifikation des multikriteriellen Optimierungsmodells

Die Spezifikation des Optimierungsmodells besteht in der Einordnung des Modells in das in Abschnitt 2.2.1.1 vorgestellte Klassifizierungsschema sowie in der Auswahl eines geeigneten Lösungsverfahrens zur Berücksichtigung von Artenpräferenzrelationen.

##### 4.2.1.1 Klassifizierung des Optimierungsmodells

Gemäß den definierten Anforderungen ist ein aus mehreren Größen bestehendes Zielsystem zu berücksichtigen und daher ein multikriterielles Optimierungsmodell zu erarbeiten. Die Forderung nach der Berücksichtigung der wesentlichen Entscheidungsdimensionen schließt neben reellwertigen auch binäre Entscheidungen mit ein. Daraus resultiert der Bedarf an einem gemischt-ganzzahligen Modell. Während nichtlineare gemischt-ganzzahlige Modelle zu den am schwierigsten lösbaren Optimierungsproblemen zählen,

stehen für lineare gemischt-ganzzahlige Modelle effiziente *Branch and Bound*-Verfahren zur Verfügung (KALLRATH 2013, S. 116). Um für die Anwendung in der unternehmerischen Praxis vertretbare Rechenzeiten gewährleisten zu können, wird das Modell linear formuliert. Da abzubildende Entscheidungen abhängig vom Parameter Zeit sind, ist ein dynamisches Modell zu entwickeln. Abschließend ist zwischen deterministischer und stochastischer Modellierung auszuwählen. Da es sich bei der Konfiguration GPN um eine strategische und damit langfristige Entscheidung handelt, sind zahlreiche relevante Parameter mit großen Unsicherheiten behaftet. Die für eine stochastische Modellierung erforderliche Festlegung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die einzelnen Parameter ist jedoch für sich genommen bereits eine hoch komplexe Aufgabe, die mit enormem Datenerhebungsaufwand einhergeht (POPP 1983, S. 45). Die der Optimierung unter Unsicherheit zugrunde liegenden Konzepte sind den Entscheidungsträgern zudem nur schwer zu kommunizieren (HÜBNER 2007, S. 65). Gemäß den Ausführungen von MEYER (2008a, S. 123) führt eine stochastische Modellierung daher häufig zum Scheitern von Optimierungsmodellen in der betrieblichen Praxis. Es erfolgt daher eine deterministische Modellierung des Entscheidungsproblems. Die Auswirkung der bestehenden Unsicherheiten bzgl. der Parameter sind bspw. im Rahmen von Sensitivitätsanalysen im Anschluss an die Optimierung zu untersuchen. Abbildung 4.1 zeigt zusammenfassend die Einordnung des Modells in das Klassifizierungsschema aus Abschnitt 2.2.1.1.

<b>Anzahl Zielgrößen</b>	monokriteriell		<b>multikriteriell</b>
<b>Typus Zielfunktion und Nebenbedingungen</b>	<b>linear</b>		nichtlinear
<b>Art der Entscheidungsvariablen</b>	kontinuierlich	ganzzahlig	<b>gemischt-ganzzahlig</b>
	statisch		<b>dynamisch</b>
<b>Informationsgrad</b>	<b>deterministisch</b>		stochastisch

*Abbildung 4.1: Einordnung des multikriteriellen Optimierungsmodells*

### 4.2.1.2 Auswahl eines Lösungsverfahrens

Da die im Rahmen der Netzwerkkonfiguration verfolgten Zielsetzungen im Allgemeinen nicht vollständig komplementär oder neutral sind, erfordert die Lösung des

## 4 Konzeption der Methode

---

multikriteriellen Optimierungsmodells die Angabe einer Artenpräferenzrelation. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 2.2.2 kann der Entscheider diese Information vor, während oder nach der Anwendung des Optimierungsmodells in den Prozess einfließen lassen. Da Entscheidungen zur Netzwerkconfiguration i. d. R. nicht von einzelnen Personen, sondern von einem hochrangig besetzten Entscheidungsgremium getroffen werden, kann eine interaktive Ermittlung von Handlungsalternativen unter Einbindung der Entscheidungsträger ausgeschlossen werden. Gemäß dem allgemeinen Ablauf von Entscheidungsprozessen (vgl. Abschnitt 2.1.2) findet die Zielklärung vor der Ermittlung von Handlungsalternativen statt. Es bietet sich daher an, die Festlegung der Artenpräferenzrelation in diesem Zusammenhang *a priori* zu erarbeiten.

Eine wesentliche Anforderung an das Verfahren besteht in der Flexibilität, die es zur Berücksichtigung von Ergebnissen aus dem Schritt der Zieldefinition bietet. Bei der lexikographischen Optimierung und dem Zielgewichtungmodell kann lediglich eine Priorisierung bzw. Gewichtung der Zielgrößen vorgenommen werden. Dagegen bringt die  $\epsilon$ -constraint Methode durch die Möglichkeit zur Angabe von oberen bzw. unteren Schranken je Zielgröße mehr Freiheitsgrade bei der Modellierung des Zielsystems mit sich. Das Verfahren der Zielprogrammierung weist mit den Angaben zu Soll-Werten je Zielgröße sowie Gewichtungsfaktoren für Abweichungen von diesem Zielwert die meisten beeinflussbaren Parameter auf. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird daher auf dieses Verfahren zurückgegriffen. Um eine zu große Abweichung von einzelnen Zielwerten zu vermeiden, wird die Zielprogrammierung um den aus der  $\epsilon$ -constraint Methode bekannten Ansatz zur Angabe von Anspruchsniveaus ergänzt.

### 4.2.2 Herleitung des Aufbaus des Prozessmodells

Mit der Spezifikation des Optimierungsmodells liegen die zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen für die Ausgestaltung des Prozessmodells vor. Zur Sicherstellung der geforderten Prozesskonformität wird das in Abschnitt 2.1.2 vorgestellte allgemeine Ablaufmodell von Entscheidungsprozessen als Grundlage herangezogen. Im Hinblick auf die Netzwerkconfiguration ist der Schritt der Realisierung einer Entscheidung Gegenstand eigener Forschungsrichtungen wie bspw. der Fabrikplanung. Der Betrachtungsumfang dieser Arbeit beschränkt sich daher auf die Auswahl einer Handlungsalternative.

Die *Identifikation des Handlungsbedarfs* bildet den Ausgangspunkt des Prozessmodells. Nach der Erkenntnis der Notwendigkeit zur Anpassung eines Netzwerks besteht die



Aufgabe zur *Definition der Aufgabenstellung*. Diese ist derart zu formulieren, dass die Entwicklung von Handlungsalternativen für das in Abschnitt 4.2.1 spezifizierte mathematische Verfahren zugänglich wird. Aufgrund initial fehlender Informationen zum Lösungsraum kann die finale *Präzisierung des Zielsystems* im Gegensatz zum allgemeinen Phasenmodell der Entscheidungsfindung nicht im Anschluss an die Definition der Aufgabenstellung erfolgen. Erst die *Entwicklung von Handlungsalternativen* durch Einsatz des Optimierungsmodells kann das initial bestehende Informationsdefizit beheben, setzt ihrerseits wiederum jedoch ein bestehendes Zielsystem voraus. Es ist daher ein zyklisches Vorgehen zur Bearbeitung der Schritte *Entwicklung von Handlungsalternativen* und *Präzisierung des Zielsystems* vorzusehen. Im Allgemeinen ist anzunehmen, dass bei der *Präzisierung des Zielsystems* mehrere Zielsysteme erzeugt werden, um artverschiedene, im Hinblick auf das jeweilige Zielsystem optimale Lösungsalternativen zu generieren. Vor der *Entwicklung von Handlungsalternativen* muss im Rahmen der *Datenerhebung* die Parametrierung des Lösungsraums erfolgen. Da die Aufnahme aller Optionen zur Netzwerkanpassung und deren genaue Bewertung als Vorbereitung der Alternativenentwicklung nicht möglich ist, ist ein iterativer Prozess vorzusehen. Das zyklische Vorgehen aus *Entwicklung von Handlungsalternativen* und *Präzisierung des Zielsystems* ist daher um die Phase der *Datenerhebung* zu erweitern. Dieser aus drei Phasen bestehende Zyklus ist für jedes definierte Zielsystem separat zu durchlaufen, da jedes Zielsystem schrittweise präzisiert werden muss. Mit Abschluss des iterativen Prozesses für jedes einzelne Zielsystem ist die Einschränkung des anfänglich implizit definierten Lösungsraums auf einen expliziten Lösungsraum abgeschlossen. Die detaillierte *Bewertung* der verbleibenden diskreten Netzwerkzenarien, die jeweils optimal in Bezug auf das zugehörige Zielsystem sind, bildet die Grundlage für die abschließende *Auswahl* einer Handlungsalternative durch das Management.

Die zyklische Bearbeitung der Phasen *Datenerhebung*, *Entwicklung von Handlungsalternativen* und *Präzisierung des Zielsystems* für jedes Zielsystem verlangt nach einer detaillierten Vorgehensbeschreibung. Insbesondere erfordern iterative Prozesse die Definition von Abbruchbedingungen. Ausgehend von der initial nicht exakt möglichen Erfassung und Parametrierung des Lösungsraums ist ein Verfahren für die schrittweise Einschränkung des kontinuierlichen auf einen diskreten Lösungsraum mit inkrementeller Verbesserung der Datenbasis bereitzustellen. Das Verfahren dient zur Operationalisierung der Vorgehensweise und stellt eine Erweiterung des Prozessmodells dar.

Im Sinne der eindeutigen und durchgängigen Verwendung von Begrifflichkeiten werden Ablaufbeschreibungen zur Netzwerkkonfiguration mit dem Fokus auf der inhaltlichen

## 4 Konzeption der Methode

Erläuterung einzelner Prozessschritte, ohne die Interdependenzen zwischen den Konfigurationsphasen zu thematisieren, im Folgenden weiterhin als Prozessmodell bezeichnet. Die Kombination aus einem Prozessmodell und einem Verfahren zur Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen einzelnen Phasen wie in Abbildung 4.2 dargestellt, wird im Weiteren als Methode zur Netzwerkkonfiguration bezeichnet.

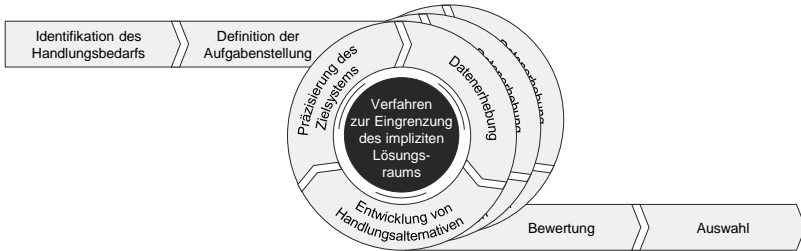


Abbildung 4.2: Methode zur Konfiguration GPN

### 4.3 Fazit

Das entwickelte Lösungskonzept bildet die Grundlage für das Erreichen der formulierten Zielsetzung, den Prozessablauf der Netzwerkkonfiguration bei gleichzeitiger Erhöhung der erreichbaren Lösungsqualität zu optimieren. Die drei in Abschnitt 3.4 erläuterten Forschungsdefizite werden zusammenfassend wie folgt adressiert:

1. Mit dem Ziel gleichermaßen den Anforderungen aus der prozessualen und analytischen Komplexität gerecht zu werden, werden die prozessualen Stärken von Prozessmodellen mit der analytischen Überlegenheit multikriterieller Optimierungsmodelle kombiniert.
2. Die fehlende Abbildungsgenauigkeit bestehender Modelle ist im Rahmen der Modellbildung in Kapitel 5 insbesondere durch die Berücksichtigung eines in Produktgenerationen und -familien gegliederten Produktportfolios sowie technischer Restriktionen zu beheben.
3. Die bisher weitestgehend vernachlässigte iterativ durchzuführende Datenbeschaffung wird durch eine Erweiterung des Prozessmodells um ein Verfahren zur schrittweisen Einschränkung des initial kontinuierlichen auf einen diskreten Lösungsraum berücksichtigt.

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 4 ist ein deterministisches, gemischt-ganzzahliges, lineares, mehrperiodiges, internationales Vektoroptimierungsmodell für die Konfiguration GPN zu formulieren. Die nachfolgenden Abschnitte dienen zur Vorstellung der zugehörigen Modellbildung sowie der mathematischen Formulierung.

### 5.1 Modellbildung

Im Rahmen der Modellbildung wird das reale Entscheidungsproblem der Netzwerk-  
konfiguration in einem konzeptionellen Modell abgebildet. Die bei der Spezifizierung  
des Untersuchungsbereichs eingangs getroffenen Festlegungen bilden die hierfür we-  
sentlichen Prämissen (vgl. Abschnitt 1.4). Die Abbildung des Entscheidungsproblems  
lässt sich in vier Elemente gliedern. Zunächst wird mit der Festlegung der Netzwerk-  
struktur der Betrachtungsgegenstand modelliert. Das zweite Element beinhaltet die  
abzubildenden Anforderungen aus der Überführung des bestehenden Netzwerks in den  
Soll-Zustand, der sog. Netzwerkmigration. Die zu berücksichtigenden Anforderungen  
aus dem Betrieb des Produktionsnetzwerks stellen das dritte Element dar. Gemeinsam  
bilden die ersten drei Elemente die funktionalen Nebenbedingungen des mathematischen  
Modells. Das vierte Element Zielsystem beschreibt, was mit der Netzwerkanpassung  
erreicht werden soll. In folgender Abbildung 5.1 ist die Gliederung der Modellbildung  
sowie der mathematischen Formulierung des Optimierungsmodells zusammenfassend  
dargestellt.

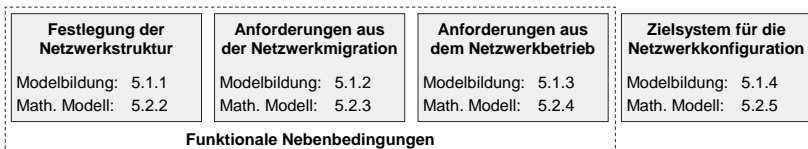


Abbildung 5.1: Gliederung der Modellbildung und der mathematischen Formulierung

### 5.1.1 Festlegung der Netzwerkstruktur

Produktionsnetzwerke beschreiben allgemein den Transformationsprozess von Rohteilen über Zwischenprodukte hin zu fertigen Produkten. Die Struktur derartiger Netzwerke kann gemeingültig durch Knoten abgebildet werden, die durch Kanten miteinander in Beziehung stehen. Während den Netzwerkknoten einzelne Wertschöpfungsaktivitäten zur Erzeugung von Zwischen- oder Endprodukten zugewiesen werden können, beschreiben die Netzwerkkanten die Materialflussbeziehungen zwischen den Knoten. Weitere Beziehungen wie bspw. Informationsflüsse befinden sich nicht im Betrachtungsfokus dieser Arbeit. Zur vollständigen Beschreibung der Netzwerkstruktur inkl. des Materialflusses sind den Knoten und Kanten daher Rohteile bzw. Zwischen- und Endprodukte zuzuordnen. Die Modellierung der Netzwerkobjekte Knoten und Kanten sowie des Produktportfolios ist daher eng miteinander verbunden. Im Folgenden werden daher zunächst die Netzwerkobjekte sowie das Produktportfolio modelliert. Die Modellierung der Netzwerkstruktur erfolgt im abschließenden Schritt durch deren Verknüpfung.

#### 5.1.1.1 Netzwerkobjekte

Es lassen sich allgemein drei Arten von Knoten unterscheiden. *Startknoten* weisen ausschließlich ausgehende Kanten auf, *Zwischenknoten* eingehende und ausgehende Kanten und *Endknoten* nur eingehende Kanten. Wie in Abschnitt 1.4.1 ausgeführt, bildet die Netzwerkkonfiguration eines unternehmensinternen Netzwerks bestehend aus mehreren Standorten den Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit und damit die Systemgrenze. Gemäß der Festlegung der Betrachtungstiefe (vgl. Abschnitt 1.4.2.2) werden Produktionsstandorte weiter untergliedert in Segmente und diese wiederum in Produktionslinien. Diese werden als nicht weiter unterteilbare Produktionseinheiten betrachtet und bilden damit die Letztelemente und damit Knoten des Netzwerks. Da Produktionslinien eingehende und ausgehende Materialflüsse aufweisen, stellen diese *Zwischenknoten* dar. Das Produktionsnetzwerk eines Unternehmens steht mit dessen Umwelt in Form von Materialflüssen in Beziehung. Rohmaterialien und Zwischenprodukte werden auf Beschaffungsmärkten bezogen und Fertigprodukte werden an Absatzmärkte geliefert. Beschaffungsmärkte bilden damit die *Startknoten* und Absatzmärkte die *Endknoten* eines Produktionsnetzwerks. Diese werden in der vorliegenden Arbeit als nicht beeinflussbar und damit als Rahmenbedingungen betrachtet. Während Beschaffungsmärkte Rohmaterialien und Zwischenprodukte zu bestimmten Preisen und

Mengen anbieten, fragen Absatzmärkte Endprodukte in bestimmten Mengen zu Marktpreisen nach. Diese allgemein gehaltene Modellierung erlaubt die endgültige Festlegung der Modellierungstiefe von Beschaffungs- und Absatzmärkten im Einzelfall.

### 5.1.1.2 Produktportfolio

Nach KOHLER (2008, S. 115-118) ist für die Netzwerkkonfiguration im Allgemeinen die Modellierung mehrstufiger Produktionsprozesse vorzunehmen. Dies erlaubt im Gegensatz zur einstufigen Modellierung die Aufteilung der für die Herstellung eines Endprodukts erforderlichen Wertschöpfungsschritte auf verschiedene Standorte und damit die Nutzung von Standort- und Skalenvorteilen. Folglich ist eine vertikale Gliederung des Produktportfolios vorzunehmen. Aus Gründen der Allgemeingültigkeit ist eine beliebige Anzahl an Fertigungsstufen abzubilden. Analog zu R. MOSER (2014) und KOHLER (2008) wird ein zyklenfreier Materialfluss zugrunde gelegt.

Ergänzend ist nach MEYER & JACOB (2008, S. 154) eine horizontale Segmentierung des Produktportfolios vorzunehmen. Dies ist auf den zunehmenden Einsatz von Produktbaukästen zurückzuführen. Im Wesentlichen werden hierbei aus wenigen Grundprodukten durch geringfügige Anpassungen eine Vielzahl an Endproduktvarianten erzeugt. Produktallokationsentscheidungen können daher nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Der Aufwand zur Befähigung einer Linie für ein Endprodukt ist abhängig davon, ob ein anderes Endprodukt, das auf dem gleichen Grundprodukt basiert, bereits auf der Produktionslinie befähigt ist. Aus Gründen der Modellkomplexität wird die Anzahl der horizontalen Stufen auf drei festgelegt. Im Folgenden werden diese als Produktgenerationen, Produktfamilien und Endprodukte bezeichnet.

### 5.1.1.3 Verknüpfung Netzwerkobjekte und Produktportfolio

Die Netzwerkstruktur ergibt sich aus der Verknüpfung und Synchronisation der Netzwerkobjekte mit dem Produktportfolio. Mit der horizontalen Segmentierung des Produktportfolios ist die Anzahl der Produktionsstufen und damit die Aggregation von Produktionsanlagen zu Linien vorgegeben. Jede Produktionslinie ist genau einer Produktionsstufe zuzuordnen und zu jeder Stufe muss mindestens eine Linie im Netzwerk existieren. Die Menge der Linien einer Produktionsstufe an einem Standort bildet ein Segment (vgl. Abschnitt 1.4.2.2). Da die Produktionslinien einer Stufe technologisch ähnliche Fertigungsaufgaben durchführen, wird im Folgenden statt Segment der Begriff

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

Technologie verwendet. Die einzelnen Zwischen- und Endprodukte aus dem Produktportfolio sind mindestens einer Produktionslinie zuzuweisen. Aufgrund der horizontalen Segmentierung des Produktportfolios erfordert die Befähigung einer Linie für ein Produkt zugleich deren Befähigung für die zugehörige Produktfamilie und -generation. Mit der Beschreibung der Linienkapazität als die Anzahl an Einheiten eines bestimmten Produktes, die in einer Zeitperiode hergestellt werden können, ist die Synchronisation der Netzwerkobjekte mit dem Produktportfolio abgeschlossen. Abbildung 5.2 zeigt zusammenfassend die Gliederung der Modellierung der Netzwerkstruktur inkl. Verweis auf den zugehörigen Abschnitt der mathematischen Modellformulierung.

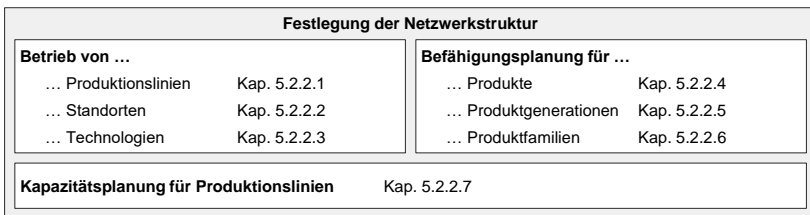


Abbildung 5.2: Gliederung der Modellierung der Netzwerkstruktur

### 5.1.2 Anforderungen aus der Netzwerkmigration

Um die Realisierbarkeit der generierten Handlungsalternativen sicherzustellen, ist der zur Verfügung stehende Lösungsraum durch die Abbildung entsprechender Anforderungen einzugrenzen. Im Einzelnen sind bei der Anpassung der vorhandenen Netzwerkstruktur, d. h. der Netzwerkmigration, die folgenden Restriktionen zu berücksichtigen:

**NM.1 Berücksichtigung des Ist-Zustands des Produktionsnetzwerks:** Bei der Ermittlung des optimalen Pfades der Netzwerkmigration muss der Ist-Zustand des Produktionsnetzwerks als Ausgangspunkt berücksichtigt werden. Das heißt insbesondere, dass sich vorhandene Produktionsstandorte, Technologien und Produktionslinien zu Beginn des Betrachtungszeitraums in Betrieb befinden müssen.

**NM.2 Berücksichtigung des zeitlichen Vorlaufs von Migrationsmaßnahmen:** Eine Netzwerkanpassung erfordert einen mitunter mehrere Jahre umfassenden

zeitlichen Vorlauf. Der Zeitversatz zwischen der Umsetzung einer Maßnahme und deren Wirksamkeit ist daher im Optimierungsmodell zu berücksichtigen.

### **NM.3 Berücksichtigung erforderlicher Maßnahmen zur Netzwerkanpassung:**

Für ein Produktionsnetzwerk können bspw. aufgrund der Alterung von Produktionsanlagen sowie Änderungen am geltenden Recht Maßnahmen bestehen, die es unabhängig vom bestehenden Zielsystem umzusetzen gilt. Dies kann sowohl Auswirkungen auf den Betrieb von Produktionslinien, Standorten und Technologien haben als auch die zugehörige Befähigungsplanung.

### **NM.4 Keine Wiederinbetriebnahme von Netzwerkelementen:**

Unterliegt der Produktbedarf erheblichen zeitlichen Schwankungen, so kann es aus finanzieller Sicht theoretisch lukrativ sein, einzelne Produktionslinien, Standorte, Technologien oder Produktbefähigungen zur Vermeidung von Fixkosten kurzzeitig stillzulegen. In der Realität ist dies aus Gründen einer kontinuierlichen Beschäftigung von Mitarbeitern sowie mehrfachen Produktanläufen auszuschließen.

### **NM.5 Berücksichtigung der techn. Fähigkeiten von Netzwerkelementen:**

Im Rahmen der Befähigungsplanung für Produktionslinien sind deren technische Fähigkeiten zu berücksichtigen. Diese begrenzen die maximale Anzahl an parallel befähigten Produkten, Produktfamilien und Produktgenerationen. Derartige Restriktionen können zum einen aus einer limitierten Variantenkapazität von Produktionsanlagen resultieren und zum anderen aus peripheren Bereichen wie bspw. der Logistik.

### **NM.6 Berücksichtigung von migrationsbedingten Kapazitätsverlusten:**

Jede Maßnahme zur Anpassung eines Produktionsnetzwerks, die Eingriffe in bestehende Netzwerkelemente erfordert, geht mit Kapazitätsverlusten einher. Diese lassen sich in Stillstandszeiten für den Umbau von Produktionsanlagen und in Hochlaufverluste bei der Inbetriebnahme der angepassten Anlagen aufteilen. Eingriffe in bestehende Netzwerkelemente können durch Anpassungen der Befähigungsplanung sowie der Kapazität von Produktionslinien erforderlich werden.

### **NM.7 Berücksichtigung der Interdependenz von Migrationsmaßnahmen:**

Maßnahmen zur Netzwerkanpassung können sich gegenseitig beeinflussen. Explizit modellierte Zusammenhänge wie bspw. zeitlich synchrone Kapazitätsverluste bei gleichzeitigem Umbau von Produktionslinien finden unmittelbar im Optimierungsmodell Berücksichtigung. Greift die Realisierung von Netzwerkmaßnahmen auf Ressourcen

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

zurück, die nicht im Modell abgebildet sind, sind entsprechende Restriktionen einzuführen. Dies ist in der gewählten Abbildungsgenauigkeit des Modells in Bezug auf Gebäudeflächen der Fall. Mit dem Ziel zu vermeiden, dass der Kapazitätsausbau mehrerer örtlich aneinander grenzender Produktionslinien zur mehrfachen Belegung vorhandener Freiflächen führt, ist eine entsprechende Ausbaubeschränkung im Optimierungsmodell zu berücksichtigen.

Gemäß den Ausführungen zu den Anforderungen sind nicht alle Restriktionen für jeden Bestandteil der Netzwerkstruktur relevant. Tabelle 5.1 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der Gliederung der Netzwerkstruktur (vgl. Abbildung 5.2) mit den Anforderungen aus der Netzwerkmigration. Die Anforderungen NM.1 bis NM.3 sind für einige Elemente der Netzwerkstruktur direkt umzusetzen und für andere nur implizit. Die Funktionsweise dieser impliziten Abbildung von Anforderungen sei am Beispiel der Restriktion NM.1 für Standorte erläutert. Für den Betrieb von Produktionsstandorten ist der Betrieb von mindestens einer Produktionslinie an diesem Standort erforderlich. Mit der Sicherstellung des Ist-Zustands für den Linienbetrieb wird damit implizit auch der Standortbetrieb gemäß des Ist-Netzwerkzustands abgebildet.

*Tabelle 5.1: Relevante Anforderungen aus der Netzwerkmigration für die Elemente der Netzwerkstruktur*

Entscheidung	NM.1: Berücksichtigung des Ist-Zustands	NM.2: Berücksichtigung des zeitlichen Maßnahmenvorlaufs	NM.3: Berücksichtigung erforderlicher Maßnahmen	NM.4: Keine Wiederinbetriebnahme von Netzwerkelementen	NM.5: Berücksichtigung technischer Fähigkeiten	NM.6: Berücksichtigung von Kapazitätsverlusten	NM.7: Berücksichtigung der Maßnahmeninterdependenz
Betrieb von ...							
... Produktionslinien	✓	✓	✓	✓	n. r.	n. r.	n. r.
... Standorten	imp.	✓	imp.	✓	n. r.	n. r.	n. r.
... Technologien	imp.	✓	imp.	✓	n. r.	n. r.	n. r.
Befähigungsplanung für ...							
... Produkte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	n. r.
... Produktgenerationen	imp.	imp.	imp.	n. r.	✓	✓	n. r.
... Produktfamilien	imp.	imp.	imp.	n. r.	✓	✓	n. r.
Kapazitätsplanung	imp.	✓	n. r.	n. r.	n. r.	✓	✓

n. r.: nicht relevant imp.: implizit



### 5.1.3 Anforderungen aus dem Netzworkebetrieb

Neben der Realisierbarkeit der Netzwerkalternativen ist deren Betriebbarkeit sicherzustellen. Aus Sicht des Netzworkebetriebs sind folgende Restriktionen zu berücksichtigen:

**NB.1 Einhaltung der maximalen Kapazität:** Bei der Zuweisung von Produktionsbedarfen ist auf die Einhaltung der maximalen Kapazität je Produktionslinie und Zeitperiode zu achten. KERN (1962, S. 27) definiert Kapazität als das Leistungsvermögen einer wirtschaftlichen und/oder technischen Einheit beliebiger Art, Struktur und Größe innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts. Die Systemkapazität wird gemäß der Literatur durch die drei Determinanten Leistungsdauer, Intensität und Kapazitätsquerschnitt bestimmt (vgl. bspw. BUNDSCHUH (2008, S. 35-36)). Die Leistungsdauer beschreibt die nutzbare Zeit zur Leistungserbringung innerhalb einer Zeitspanne, der Kapazitätsquerschnitt die Anzahl der leistungserbringenden Einheiten im System und die Intensität die Geschwindigkeit der Leistungserstellung der einzelnen Elemente des Systems. Die Systemkapazität resultiert aus der Multiplikation dieser drei Größen. Ausgehend von der theoretisch möglichen Anlagenlaufzeit von 24 Stunden an 365 Tagen pro Jahr hat BUNDSCHUH (2008, S. 69-71) in Anlehnung an WEIGERT (2004, S. 26-30) das in Abbildung 5.3 visualisierte Schema zur Ermittlung der Nettoproduktivzeit, d. h. der Zeit je Betriebsmittel, die für die Gutteileherstellung zur Verfügung steht, entwickelt.

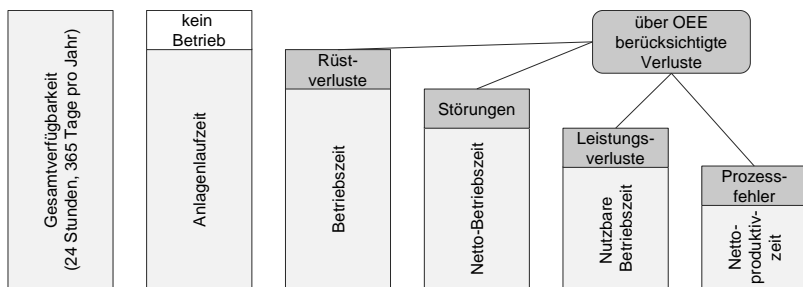


Abbildung 5.3: Verlustzeiten des Anlagenbetriebs (Quelle: in Anlehnung an BUNDSCHUH (2008, S. 70))

Die *Anlagenlaufzeit* resultiert aus der Wahl des Schichtmodells und ergibt sich aus der in einer Zeitperiode verfügbaren Zeit abzüglich der Zeiten, in welchen kein Betrieb vorgesehen ist (z. B. Feiertage) sowie geplanter Standzeiten (z. B. für Pausen). Für die

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

folgenden Ausführungen wird dieses Schema um eine weitere begriffliche Unterscheidung ergänzt. Ausgehend von der in einer Zeitperiode verfügbaren Zeit ergibt sich durch die Berücksichtigung der im Rahmen des Schichtmodells vorgesehenen Stillstandszeiten sowie Feiertagen zunächst die *theoretische Anlagenlaufzeit*. Durch die Berücksichtigung von Produktionsunterbrechungen (PUs) zur Wartung, zum Umbau von Produktionsanlagen sowie zur Betriebsruhe resultiert die *Anlagenlaufzeit*. Die *Nettoproduktivzeit* ergibt sich daraus durch die Berücksichtigung der sog. OEE (*Overall Equipment Effectiveness*<sup>1</sup>) (WEIGERT 2004, S. 52). Zwischen der *theoretischen Anlagenlaufzeit* und der *Nettoproduktivzeit* besteht daher folgender Zusammenhang:

$$\text{Nettoproduktivzeit} = (\text{theoret. Anlagenlaufzeit} - \text{PUs}) \cdot \text{OEE} \quad (5.1)$$

Die Determinanten Kapazitätsquerschnitt sowie Intensität einer Produktionslinie werden in der Taktzeit einer Produktionslinie zusammengefasst. Zum Ausgleich von Kapazitätsschwankungen zwischen verschiedenen Zeitperioden und Produktionslinien ist die Lagerung von Zwischen- und Endprodukten zu ermöglichen. Die Lagerzu- und -abflüsse sind im Rahmen der Materialflusserhaltung zu berücksichtigen.

### **NB.2 Einhaltung des minimalen Betriebspunkts von Netzwerkelementen:**

Der Betrieb von Netzwerkelementen erfordert in der Realität die Einhaltung eines minimalen Betriebspunktes. So ist in Bezug auf Produktionslinien sicherzustellen, dass eine minimale Auslastung gewährleistet wird, um Mitarbeiter kontinuierlich beschäftigen und Verträge mit Lieferanten einhalten zu können. Diese minimale Belegung ist ungeachtet der Auswirkungen auf das formulierte Zielsystem einzuhalten.

**NB.3 Sicherstellung der Materialflusserhaltung:** In jeder Zeitperiode ist zu gewährleisten, dass die eingehenden und ausgehenden Materialflüsse aufeinanderfolgender Produktionslinien korrespondieren, d. h. die Materialflusserhaltung gewährleistet ist.

**NB.4 Modellierung der Lagerhaltung:** Kurzfristige Kapazitätsunterschiede in verschiedenen Wertschöpfungsstufen werden im Netzwerkbetrieb durch den gezielten Auf- und Abbau von Lagerbeständen ausgeglichen. Dies ist in die Modellierung der Materialflusserhaltung mit einzubeziehen. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass vorhandene

---

<sup>1</sup>Mit der Overall Equipment Effectiveness (dt. Gesamtanlageneffektivität) wird die Verfügbarkeit einer Maschine oder Anlage definiert. Die OEE besteht aus den Komponenten Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad und umfasst u. a. Störungen, Rüstzeiten und verringerte Taktgeschwindigkeiten. (STRUNZ 2012, S. 630)

Bestände zu Beginn des Betrachtungszeitraums berücksichtigt werden und maximale Lagerbestände eingehalten werden.

**NB.5 Vermeidung einer Marktüberbelieferung:** Um eine Verbesserung des Kapitalwerts einer Netzwerkalternative durch den Verkauf von Produkten zu vermeiden, die über den prognostizierten Marktbedarf hinaus gehen, ist sicherzustellen, dass Märkte maximal mit den prognostizierten Produktbedarfen versorgt werden.

**NB.6 Einhaltung der geforderten Kernmitarbeiterquote:** Mit dem Ziel die Lohnkosten bei rückläufigen Produktionsbedarfen reduzieren zu können, greifen viele Unternehmen auf den Einsatz sog. Zeitarbeitskräfte zurück. Diese können zeitlich flexibel und damit bedarfsgerecht eingesetzt werden. In vielen Firmen existieren Vereinbarungen mit dem Sozialpartner bzgl. einer verbindlich einzuhaltenden Kernmitarbeiterquote. Diese wirkt sich unmittelbar auf evtl. auftretende Kosten für nicht vollständig ausgelastete Mitarbeiter aus und ist in der Konsequenz im Optimierungsmodell zu berücksichtigen.

**NB.7 Einhaltung zeitlicher Restriktionen bei der Anpassung der Kernmitarbeiteranzahl:** Im Gegensatz zur Einstellung von Mitarbeitern ist es aufgrund von Kündigungsschutzbestimmungen im Allgemeinen nicht möglich, die Anzahl der beschäftigten Kernmitarbeiter kurzfristig nach unten anzupassen. Eine Reduzierung der Belegschaft kann daher nur schrittweise über einen längeren Zeitraum hinweg erfolgen. Aufgrund der resultierenden Auswirkungen auf die Mitarbeiterauslastung und damit verbundene Kosten muss dieser Aspekt in die Modellformulierung einfließen.

### 5.1.4 Zielsystem für die Netzwerkkonfiguration

Gemäß Abschnitt 4.2.1.2 wird für die Lösung des multikriteriellen Zielsystems auf das Verfahren der Zielprogrammierung in Kombination mit der  $\epsilon$ -constraint Methode zurückgegriffen. Dementsprechend erfordert die Modellierung des Zielsystems die in Abbildung 5.4 dargestellten Schritte (vgl. Abschnitte 2.2.2.3 und 2.2.2.4). Mit Ausnahme des ersten Schrittes *Formulierung der Zielgrößen* basiert die mathematische Formulierung der Bestandteile des Zielsystems ausschließlich auf den in den Abschnitten 2.2.2.3 und 2.2.2.4 in allgemeingültiger Weise vorgestellten Formelzusammenhängen. Die folgenden Ausführungen zur Modellbildung des Zielsystems beschränken sich daher auf die Modellierung der Zielgrößen.

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

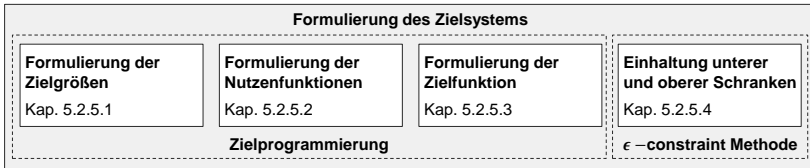


Abbildung 5.4: Elemente des Zielsystems

Die Wahl der zu modellierenden Zielgrößen spielt eine wesentliche Rolle für die Einbettung des Optimierungsmodells in den Entscheidungsprozess der Netzwerkkonfiguration. Wie in Abschnitt 4.1 ausgeführt, müssen Ergebnisse aus vorgelagerten Phasen der Entscheidungsfindung, insbesondere aus dem Schritt *Definition der Aufgabenstellung*, in der Anwendung des Optimierungsmodells berücksichtigt werden können. Im Modell ist in Konsequenz kein vollständig definiertes Zielsystem vorzusehen, sondern eine Sammlung von Zielgrößen, die es erlaubt, im Einzelfall eine Teilmenge der implementierten Zielgrößen auszuwählen und zu gewichten. Im Sinne der Allgemeingültigkeit des Modells ist eine unternehmensstrategische Ableitung der Zielgrößen geboten. Im Folgenden wird zunächst die in SAGER et al. (2016) in ähnlicher Form vorgestellte Identifikation der relevanten Größen erläutert gefolgt von deren Spezifizierung.

### 5.1.4.1 Identifikation strategischer Zielgrößen der Netzwerkkonfiguration

Die Ableitung der zu implementierenden Zielgrößen der Netzwerkkonfiguration basiert auf folgendem Axiom: *Produzierende Unternehmen streben nach einer nachhaltigen Maximierung des Profits aus dem Verkauf von Produkten an Kunden*. Aus diesem Postulat kann geschlussfolgert werden, dass neben finanziellen Aspekten die beiden Elemente Produkt und Kunde bei der Festlegung der Ziele zu berücksichtigen sind.

**Finanzielle Aspekte** Wie aus Abbildung 3.6 hervorgeht, dominieren finanzielle Aspekte die Zielsysteme multikriterieller Optimierungsmodelle zur Netzwerkkonfiguration. Die eingesetzten Zielgrößen lassen sich hierarchisch gliedern. Die ausschließliche Berücksichtigung von Investitionskosten, bzw. allgemein formuliert einmalig anfallender Aufwände, stellt die einfachste monetäre Zielgröße dar. Im Folgenden werden unter Einmalaufwand (EAW) alle im Rahmen einer Investition anfallenden Kosten, d. h. bspw. inklusive Planungskosten verstanden. Im Gegensatz dazu bezieht sich der Begriff Investition ausschließlich auf die Beschaffung materieller Anlagegüter (vgl. hierzu auch

GÖTZE (2014, S. 5)). Der EAW wird in umfangreicheren Ansätzen um alle zusätzlich als relevant erachteten Kosten wie bspw. Lohnkosten ergänzt. Die Erweiterung der Kostensicht um erzielte Umsätze führt auf die Zielgröße Profit. Im Kapitalwert, der elaboriertesten finanziellen Zielgröße multikriterieller Modelle, werden die zu unterschiedlichen Zeitperioden anfallenden Zahlungsströme vergleichbar gemacht.

Aufgrund der in Abschnitt 4.1 geforderten Berücksichtigung einer evtl. eingeschränkten Datenverfügbarkeit in der industriellen Praxis ist die bloße Berücksichtigung des *Kapitalwerts* nicht ausreichend. Die separate Implementierung der Zielgrößen *EAW* und *laufende Aufwände* (LAW) erlaubt die Anpassung der ausgewählten finanziellen Größen in Abhängigkeit der Datenverfügbarkeit. Auf die Implementierung der Zielgröße Profit wird verzichtet, da diese eine Sonderform des Kapitalwerts mit Zinssatz 0% darstellt.

**Produkt** In Abhängigkeit der Technologielebenszyklusphase der ein Produkt angehört, resultieren verschiedene Herausforderungen an das GPN. In Abbildung 5.5 ist das Technologielebenszyklusmodell nach SAAD et al. (1991, S. 66) dargestellt.

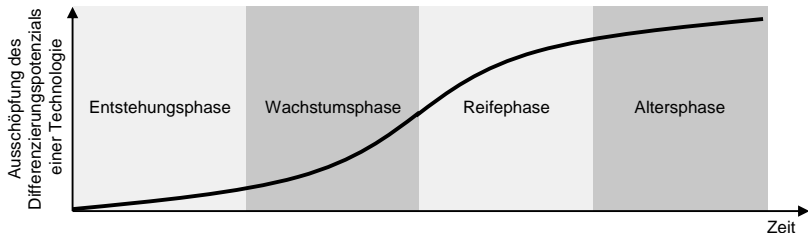


Abbildung 5.5: Technologielebenszyklusmodell nach SAAD et al. (1991, S. 66)

Die erste Phase wird von Forschung und Entwicklung dominiert und ist gemäß der Spezifizierung des Untersuchungsbereichs nicht Teil des Betrachtungsumfangs (vgl. Abschnitt 1.4). Mit Beginn der zweiten Lebenszyklusphase kann die Produktnachfrage sprunghaft ansteigen. Produktionsnetzwerke für die Herstellung derartiger Produkte müssen reaktionsfähig hinsichtlich dieses Nachfrageanstiegs sein. Bei Produkten der dritten Lebenszyklusphase sind keine Nachfragesprünge zu erwarten. Aufgrund der Dynamik des Umfelds gilt es jedoch, auf kurzfristige Bedarfsschwankungen reagieren zu können (REINHART et al. 2007, S. 211). Für Produkte die der letzten Phase angehören, ist von einem Rückgang der Produktnachfrage auszugehen. Die Herausforderung für das Produktionsnetzwerk besteht in diesem Zusammenhang in der wirtschaftlichen Produktion bei sinkendem Produktionsvolumen, also der Vermeidung von Remanenz-

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

kosten. Hinsichtlich des Produkts resultieren zusammenfassend die beiden Zielgrößen *Bestellmengenflexibilität* und *Remanenzrisiko* für die Netzwerkkonfiguration.

**Kunde** In Bezug auf das dritte axiomatisch abgeleitete Element zur Identifikation relevanter Zielgrößen der Netzwerkkonfiguration ist zu elaborieren, welchen Beitrag ein Produktionsnetzwerk zur Erfüllung von Kundenbedürfnissen leisten kann. THOMAS (2013, S. 52-55) stellt die in Tabelle 5.2 zusammengefasste Synthese aus dem Stand der Forschung zu Differenzierungsfaktoren aus Marktsicht zur Verfügung.

*Tabelle 5.2: Differenzierungsfaktoren aus Marktsicht nach THOMAS (2013, S. 55)*

Differenzierungsfaktoren aus Marktsicht	Definition
<i>Preis</i>	Produkte und Dienstleistungen erfüllen oder übertreffen den vom Kunden erwarteten Preis.
<i>Qualität</i>	
Spezifikationstreue	Produkte und Dienstleistungen erfüllen oder übertreffen die Spezifikation des Kunden.
Produktqualität	Produkte erfüllen einen gleichbleibenden Qualitätsstandard.
<i>Lieferung</i>	
Liefergeschwindigkeit	Produkte erfüllen oder übertreffen die vom Kunden erwartete Lieferzeit (von der Bestellung bis zur Lieferung).
Lieferzuverlässigkeit	Produkte werden zuverlässig zeit- und mengentreu geliefert.
<i>Flexibilität</i>	
Produktbandbreite & Designflexibilität	Dem Kunden wird eine breite Produktpalette oder die Möglichkeit kundenindividueller Designs angeboten.
Bestellmengenflexibilität	Bestellmengen oder Lieferzeiten werden flexibel kundengerecht angepasst.
<i>Innovation</i>	Dem Kunden werden innovative Lösungen (Produkte und Prozesse) angeboten.
<i>Service</i>	Dem Kunden werden zusätzlich produktbezogene Dienstleistungen angeboten.

Im Rahmen der Netzwerkkonfiguration ist es nicht möglich, alle Kundenbedürfnisse gleichermaßen positiv zu beeinflussen. So sind Preise als marktbestimmt anzunehmen, da es sich bei Märkten heutzutage i. d. R. um Käufermärkte handelt. Der realisierbare Preis unter Berücksichtigung der Produktionskosten kann bei der Konfiguration maßgeblich beeinflusst werden und ist Bestandteil der erläuterten finanziellen Aspekte. Die Faktoren Innovation sowie Produktbandbreite und Designflexibilität sind übergeordnete Unternehmensvorgaben, die das Produktionsnetzwerk zu erfüllen hat. Der angebotene Service im Sinne produktbezogener Dienstleistungen ist weitestgehend unabhängig davon, an welchem Ort die Wertschöpfung stattfindet. Der Differenzierungsfaktor Qualität wird in vier der 54 identifizierten multikriteriellen Modelle zur Netzwerkkonfiguration als Zielgröße

eingesetzt (vgl. Abbildung 3.6). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Prämisse gesetzt, dass es Anspruch produzierender Unternehmen ist, ausschließlich fehlerfreie Produkte an Kunden auszuliefern. Insofern sind bei Qualitätsnachteilen von Lieferanten, Standorten oder Fertigungsverfahren entsprechende Maßnahmen zur Qualitätsprüfung und -überwachung zu ergreifen. Diese führen in Konsequenz zu Zusatzkosten, die im Rahmen der finanziellen Aspekte zu berücksichtigen sind. Der Aspekt Qualität wird daher nicht explizit im Modell abgebildet sondern implizit über resultierende Kosten zur Sicherstellung des geforderten Qualitätsniveaus. Die verbleibenden Differenzierungsfaktoren aus Marktsicht *Bestellmengenflexibilität*, *Lieferzeit* und *Lieferzuverlässigkeit* können im Rahmen der Netzwerkkonfiguration u. a. durch die Kapazitätsauslegung und geographische Verteilung von Wertschöpfungsprozessen maßgeblich beeinflusst werden und sind daher als Zielgrößen abzubilden. In Abbildung 5.6 sind die axiomatisch abgeleiteten sieben Zielgrößen der Netzwerkkonfiguration abschließend zusammengefasst.

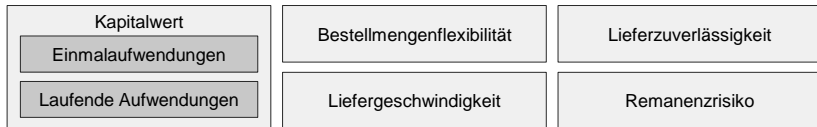


Abbildung 5.6: Zielgrößen der Netzwerkkonfiguration

### 5.1.4.2 Spezifizierung der Zielgrößen

**Einmalaufwand** Die von GÖTZE (2014) in Anlehnung an KERN (1974, S. 14) vorgenommene Unterscheidung von Investitionsarten wird zur Gliederung des EAW herangezogen. In Abbildung 5.7 ist die Klassifizierung von Investitionsarten nach dem Kriterium des Investitionsanlasses visualisiert.

Mit *Errichtungsinvestitionen* beginnt die Tätigkeit eines Unternehmens an einem Standort. Gemäß der Festlegung der Betrachtungstiefe (vgl. Abschnitt 1.4.2.2) werden diese weiter untergliedert in Errichtungsinvestitionen für Standorte, Technologien und Produktionslinien. Diese Aufteilung erlaubt die Berücksichtigung der Abhängigkeiten von Investitionsentscheidungen. Da die Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration auch das Schließen von Produktionslinien, Technologien und Standorten beinhalten, sind bei der Modellformulierung analog zu den Errichtungsinvestitionen Demontagekosten auf den Ebenen Produktionslinie, Technologie und Standort zu berücksichtigen.

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

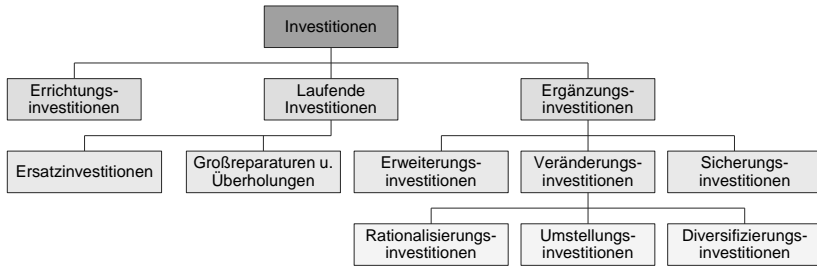


Abbildung 5.7: Gliederung der Investitionsarten nach dem Investitionsanlass (Quelle: in Anlehnung an GÖTZE (2014, S. 10))

*Laufende Investitionen* in Form von Ersatzinvestitionen sowie Großreparaturen und Überholungen bilden die zweite Investitionsart nach GÖTZE (2014, S. 9). Im Rahmen der Netzwerkconfiguration ist die Tatsache abzubilden, dass der Betrieb einer Produktionslinie nach einem bestimmten Zeitpunkt nur durch die Tätigung eines gewissen EAW möglich ist. Dabei ist es unbedeutend, ob bestehende Anlagen überholt werden oder durch neue ersetzt werden. In der Folge werden die beiden Unterarten der laufenden Investitionen im Modell in Ersatzinvestitionen zusammengefasst.

Die dritte Investitionsart *Erganzungsinvestitionen* unterteilt GÖTZE (2014, S. 9) in Erweiterungsinvestitionen, Veranderungsinvestitionen und Sicherungsinvestitionen. Erstere dienen zur Anpassung der Kapazität und werden im Modell in Form von Einmalaufwanden zur Kapazitätserweiterung als auch zur Kapazitätsreduzierung einer Produktionslinie abgebildet. Veranderungsinvestitionen dienen zur Modifikation bestehender Produktionsressourcen. Umstellungs- und Diversifizierungsinvestitionen sind zur Anpassung an ein verändertes Absatzprogramm für bisherige bzw. neue Produkte erforderlich. Deren Modellierung erfolgt durch die Berücksichtigung von Einmalaufwanden für die Befähigung einer Produktionslinie für Produktgenerationen, Produktfamilien sowie Produkte. Analog zu den Errichtungsinvestitionen erlaubt die mehrstufige Gliederung des EAW die Abbildung der Abhängigkeiten von Investitionsentscheidungen. Darüber hinaus werden Kosten für den Rückbau einer Produktbefähigung einer Produktionslinie in das Modell aufgenommen. Rationalisierungsinvestitionen mit dem Ziel der Kostenreduzierung stellen die dritte Unterart von Veranderungsinvestitionen dar. Diese Art der Investition führt im Wesentlichen zu keinen netzwerkrelevanten Veränderungen von Produktionslinien, da sowohl die Kapazität als auch die Befähigungen der Produktionslinien unberührt bleiben. Die Tätigung von Rationalisierungsinvestitionen kann in der Folge unabhängig



von der Netzwerkkonfiguration linienspezifisch betrachtet und auf Basis einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung entschieden werden. Es besteht daher keine Notwendigkeit, Rationalisierungsinvestitionen in ein Modell zur Netzwerkkonfiguration aufzunehmen. Mit Sicherungsinvestitionen werden nach GÖTZE (2014, S. 9) Gefahrenquellen für das Unternehmen adressiert, bspw. durch die Beteiligung an einem Rohstoffbetrieb. Derartige Entscheidungen sind nicht Bestandteil der Netzwerkkonfiguration und finden daher keine Berücksichtigung in der Modellformulierung.

**Laufende Aufwendungen** Die LAWs werden analog zu BUNDSCHUH (2008, S. 232) in *fixe* bzw. *variable Sachkosten* und *Personalkosten* unterteilt. *Fixe Sachkosten* werden durch den Betrieb von Standorten, Technologien und Linien verursacht und sind unabhängig von der Produktionsmenge (vgl. BUNDSCHUH (2008, S. 238)). Sie fallen in jeder Zeitperiode an und sind als über die Zeit veränderlich zu modellieren.

*Variable Sachkosten* verhalten sich linear zur Produktionsmenge in einer Zeitperiode. Sie setzen sich aus Kosten für Kaufteile, proportionalen Fertigungskosten, proportionalen Lohnkosten, Kosten für Lagerung, Transportkosten für die Inbound-, Interwerks- und Outboundlogistik sowie Zoll- bzw. Transaktionskosten zusammen. Die Kosten für Kaufteile sind als beschaffungsmarkt- und periodenspezifisch zu modellieren. Die proportionalen Fertigungskosten beinhalten alle Kosten zur Herstellung einer Einheit eines Produkts auf einer Produktionslinie exklusive der proportionalen Lohnkosten. Diese können je nach Standort wesentlich davon abhängen, ob werktags oder sonntags produziert wird und ob es sich um eine Früh-, Spät- oder Nachtschicht handelt. Die proportionalen Lohnkosten sind daher linien- und schichtspezifisch zu modellieren. Die gesamten proportionalen Fertigungskosten und Lohnkosten für ein Endprodukt ergeben sich aus der entsprechenden Summe für die einzelnen Komponenten. Die Transportkosten sind als produkt- und kantenspezifische Größe zu berücksichtigen. Für den Austausch von Kaufteilen, Komponenten und Endprodukten zwischen Zollregionen sind Zollkosten sowie weitere internationale Transaktionskosten im Modell abzubilden. Sie werden analog zu den Transportkosten als produkt- und kantenspezifische Größe modelliert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei aus Gründen der Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis um eine vereinfachte Modellierung von Zollkosten handelt. Eine exakte Abbildung der länderspezifischen Zollvereinbarungen würde seitens des Modellanwenders ein stark erweitertes Wissen bezüglich einer kaum überschaubaren und dynamischen Zollgesetzgebung voraussetzen. Bei Bedarf kann das Modell mit den von HÜBNER (2007) und KOHLER (2008) vorgestellten Ansätzen um eine detailliertere

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

Abbildung von Zollkosten erweitert werden. In GPN fallen im Allgemeinen Ein- und Auszahlungsströme in verschiedenen Währungen an. Der Erfolg global produzierender Unternehmen hängt in der Folge von der Wechselkursentwicklung ab (vgl. u. a. HÜBNER (2007, S. 80-83)). Eine explizite Berücksichtigung unsicherer Wechselkursentwicklungen erfordert eine stochastische Modellierung des Entscheidungsproblems, was der Modellspezifikation aus Abschnitt 4.2.1.1 widerspricht. Zur Analyse der Auswirkung verschiedener Wechselkurse finden diese dennoch häufig Berücksichtigung in der Formulierung deterministischer Optimierungsmodelle zur Netzwerkkonfiguration (HÜBNER 2007; KOHLER 2008; BUNDSCHUH 2008). Da die Umrechnung zwischen verschiedenen Währungen für derartige Analysen vor der Anwendung des Optimierungsmodells erfolgen kann, werden Wechselkurse zur Reduzierung der Modellkomplexität nicht in die Modellformulierung aufgenommen.

*Personalkosten* bilden das dritte Element der LAWs. Kosten für indirekte Mitarbeiter werden als Bestandteil der fixen Sachkosten berücksichtigt und die im Rahmen der Produktion anfallenden Lohnkosten werden den variablen Sachkosten zugeschlagen. Insbesondere bei sinkendem Marktbedarf kann der Fall eintreten, dass direkte Mitarbeiter nicht vollständig ausgelastet werden können. Da auch nicht ausgelastete Mitarbeiter vollständig zu bezahlen sind, sind diese Kosten explizit zu berücksichtigen.

**Kapitalwert** Der Kapitalwert ist definiert als die Differenz der barwertigen Ein- und Auszahlungen eines Investitionsobjektes (POGGENSEE 2015, S. 105). Die Summe der auf die erste Periode abgezinsten EAWs und LAWs bilden die barwertigen Auszahlungen. Die in analoger Form abgezinsten markt- und periodenspezifischen Umsätze aus dem Verkauf von Produkten repräsentieren die barwertigen Einzahlungen.

Die korrekte Bewertung von Investitionen in späten Perioden des Planungshorizonts stellt eine besondere Herausforderung beim Einsatz des Kapitalwerts als Zielgröße dar. Reichen die verbleibenden Zeitperioden nicht aus, die eingesetzten Mittel zurückzugewinnen, so unterbleiben Investitionen am Ende des Betrachtungszeitraums. HÜBNER (2007, S. 69-72) diskutiert die in der Literatur vorhandenen Ansätze zur Abbildung dieses sog. *End-of-Horizon* Effekts. Neben dem Ausschluss von Investitionen in späten Planungsperioden stellt die Berücksichtigung des auf die erste Periode abgezinsten Restwerts der Neuinvestitionen am Ende des Planungshorizonts einen in der Literatur etablierten und im Folgenden umgesetzten Ansatz dar. Für einen Überblick zu den Möglichkeiten der Restwertbestimmung sei auf KOLLER et al. (2015) verwiesen. Abbildung 5.8 fasst die berücksichtigten finanziellen Größen abschließend zusammen.

Einmalaufwand		Laufende Aufwendungen	
Errichtungs- investitionen	<b>Errichtungsinvestitionen</b> Standorte <i>IKS</i> Technologien <i>IKE</i> Produktionslinien <i>IKL</i> <b>Demontagekosten</b> Standorte <i>DKS</i> Technologien <i>DKE</i> Produktionslinien <i>DKL</i>	<b>Fixkosten</b> Standorte <i>FKS</i> Technologien <i>FKE</i> Produktionslinien <i>FKL</i>	<b>Fixe Sachkosten</b>
	<b>Laufende Investitionen</b> Ersatzinvestitionen Produktionslinien <i>IKA</i>	<b>Kosten für Kaufteile</b> <i>KTk</i> <b>Prop. Fertigungskosten</b> <i>PFK</i> <b>Prop. Lohnkosten</b> <i>LOK</i> <b>Kosten für Lagerung</b> <i>LAK</i>	
Ergänzungs- investitionen	<b>Befähigungsinvestitionen</b> Produktgenerationen <i>IKG</i> Produktfamilien <i>IKF</i> Produkte <i>IKP</i> <b>Demontagekosten</b> Produktbefähigungen <i>DKP</i> <b>Anpassungsinvestitionen</b> Kapazitätsausbau <i>IKV + PAE</i> Kapazitätsrückbau <i>IKR + PAR</i>	<b>Transportkosten</b> Inboundlogistik <i>TKB</i> Interwerkslogistik <i>TKW</i> Outboundlogistik <i>TKM</i> <b>Zoll-/Transaktionskosten</b> <i>ZOK</i>	<b>Personal- kosten</b>
		<b>Kosten für nicht ausgelastetes direktes Personal</b> <i>UAK</i>	
Umsätze $UMS^{ab}$ Restwert der Neuinvestitionen $REW^{ab}$ <b>Kapitalwert</b>			

Abbildung 5.8: Modellierung der finanziellen Zielgrößen der Netzwerkconfiguration

**Bestellmengenflexibilität** Als Maß für die Bestellmengenflexibilität eines Produktionsnetzwerks hat sich in der Literatur die Menge der über den prognostizierten Bedarf hinaus herstellbaren Produkte etabliert. Dies entspricht der freien Produktionskapazität der Produktionslinien. In bestehenden Modellen wird die Gesamtflexibilität i. d. R. als Mittelwert über alle Zeitperioden ermittelt (vgl. u. a. R. MOSER (2014, S. 68-70)). Dies hat zur Konsequenz, dass sich Perioden mit unerwünscht hoher und niedriger Flexibilität ausgleichen. Die Flexibilität ist daher als periodenspezifischer Wert zu modellieren.

Im Allgemeinen ist anzunehmen, dass in einem Produktionsnetzwerk zeitgleich Produkte hergestellt werden, die sich in verschiedenen Produktlebenszyklusphasen befinden. Für Produkte, die bereits in naher Zukunft durch ein Nachfolgeprodukt ersetzt werden, steht aufgrund des rückläufigen Bedarfs i. d. R. eine hohe Bestellmengenflexibilität zur Verfügung. Im Gegensatz dazu steht bei Produkten, die sich in der Lebenszyklusphase mit dem höchsten Bedarf befinden, tendenziell eine geringere freie Kapazität zur Verfügung. Dies hat zur Folge, dass die Flexibilität nicht als Mittelwert der freien Kapazität der einzelnen Produkte bestimmt werden kann. Die naheliegende Lösung, die Bestellmengenflexibilität produktspezifisch zu bewerten ist auszuschließen, da Produktionslinien im allgemeinen mehrere Produkte parallel produzieren können und so keine

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

eindeutige Zuordnung von Produkten und Produktionsressourcen vorgenommen werden kann. Aus diesem Grund wird als Metrik für die Bestellmengenflexibilität der Faktor herangezogen, um den die Marktversorgung für alle Produkte mit einem Bedarf größer 0 in einer Zeitperiode erhöht werden kann. Die Ausbringung eines Produktionsnetzwerks wird somit bei konstantem Produktmix erhöht. Dies hat zur Folge, dass der erste Engpass für ein Produkt im Produktionsnetzwerk die Höhe der Flexibilität begrenzt.

**Liefargeschwindigkeit** Die Lieferzeit ist nach WILDEMAN (1996, S. 15/81) als die Zeit zwischen der Auftragserteilung durch den Kunden und dem Zeitpunkt der Verfügbarkeit der Ware beim Kunden definiert. Sie hängt daher maßgeblich von der gewählten Produktionsstrategie und der sich daraus ergebenden Positionierung des Kundenentkopplungspunktes in der Wertschöpfungskette ab. Im Rahmen der Modellbildung soll diesbezüglich aus Gründen der Allgemeingültigkeit keine Einschränkung vorgenommen werden. Daher muss die Metrik für die Liefargeschwindigkeit aus der Durchlaufzeit abgeleitet werden. Diese setzt sich im Allgemeinen aus der Produktions- und Beschaffungsdurchlaufzeit zusammen. Während erstere die Auftragsdurchlaufzeit als Zeitspanne zwischen Auftragsfreigabe und Bearbeitungsende beschreibt, umfasst letztere die gesamte für einen Beschaffungsvorgang erforderliche Zeit (H.-H. WIENDAHL 2012, S. 119-120).

Für die Ermittlung der Durchlaufzeit komplexer Leistungsketten ist die Aufteilung in einzelne Wertschöpfungselemente erforderlich. Die Gesamtdurchlaufzeit entspricht der Summe der Durchlaufzeiten derjenigen Elemente, die auf dem zeitkritischen Pfad liegen (GUDEHUS 2010, S. 219). Die aktivitätsbezogene Durchlaufzeit eines Elements kann nach H.-H. WIENDAHL (2012, S. 111-112) in die Ablaufschritte *Liegen nach Bearbeiten*, *Transportieren*, *Liegen vor Bearbeiten*, *Rüsten* und *Bearbeiten* gegliedert werden. Im Rahmen der Netzwerkkonfiguration kann durch die geographische Verteilung von Wertschöpfungsaktivitäten lediglich Einfluss auf die Transportzeit genommen werden, indem aufeinander folgende Wertschöpfungsschritte in lokaler Nähe vorgesehen werden. Die Liege- und Rüstzeiten werden maßgeblich von der Produktionsplanung und -steuerung beeinflusst und sind weitestgehend unabhängig von der Netzwerkstruktur. Die Bearbeitungszeit wird im Wesentlichen von der Fertigungstechnologie determiniert, deren Auswahl nicht im Rahmen der Netzwerkkonfiguration erfolgt (vgl. Abschnitt 1.4.2.3).

Als Metrik für die Liefargeschwindigkeit wird in Konsequenz der im Rahmen der Netzwerkkonfiguration beeinflussbare Anteil der Durchlaufzeit, die durchschnittlichen Transporttage je Produkt, herangezogen. Diese ergeben sich aus den erforderlichen

Transporttagen für die Anlieferung von Kaufteilen, für den Austausch von Komponenten zwischen Produktionsstandorten sowie für die Belieferung der Endkunden. Durch die Minimierung dieser Zielgröße wird der Anteil der Durchlaufzeit minimiert, der im Zuge der Netzwerkkonfiguration festgelegt wird.

**Lieferzuverlässigkeit** Eine Metrik für die Lieferzuverlässigkeit muss die Wahrscheinlichkeit ausdrücken, dass Produkte zeit- und mengengetreu geliefert werden können. Diese hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab. Erstens von der Wahrscheinlichkeit, dass die Ausbringung einer Produktionslinie kurzfristig ungeplant zurückgeht. Dieses Risiko ist im Zeitraum der Inbetriebnahme sowie nach Umbaumaßnahmen erhöht. Katastrophenfälle wie bspw. Feuer oder Überschwemmungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Zweitens hängt die Lieferzuverlässigkeit maßgeblich davon ab, wie viele Produktionslinien dazu befähigt sind, ein Produkt herzustellen. Je höher die Anzahl der redundanten Linienbefähigungen, desto höher ist die Lieferzuverlässigkeit. Drittens ist die Höhe des Lagerbestands zu berücksichtigen. Je höher der Bestand eines Produktes, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Bestellungen zeit- und mengengetreu erfüllt werden können. Da sowohl der Lagerbestand als auch die Anzahl der Produktionslinien, die ein Produkt herstellen können, produktabhängig sind, muss die Metrik für die Lieferzuverlässigkeit produktspezifisch sein. Analog zur Flexibilität muss die Zielgröße zudem periodenspezifisch bestimmt werden.

Die Lieferzuverlässigkeit eines Produkts wird in einer Zeitperiode mit 1 bewertet, wenn die zeit- und mengengetreue Erfüllung von Bestellungen als sicher zu erachten ist, ohne dabei jedoch redundant abgesichert zu sein. Dies ist zum einen der Fall, wenn der Lagerbestand für ein Produkt in der Vorperiode dem Bedarf in der relevanten Periode entspricht und zum anderen, wenn das Produkt in der Periode auf einer Produktionslinie hergestellt werden kann, die sich im normalen Produktionsbetrieb befindet, d. h. weder im Hochlauf ist noch umgebaut wird. Nimmt die Lieferzuverlässigkeit Werte kleiner 1 an, so besteht erhöhtes Risiko einer fehlenden Lieferfähigkeit. Übersteigt sie hingegen den Wert 1, so besteht eine redundante Absicherung der Versorgungssicherheit.

Der Zusammenhang des Beitrags einer Linienbefähigung für die Lieferzuverlässigkeit eines Produkts mit der Höhe der erwarteten Kapazitätsverluste auf einer Produktionslinie wird linear modelliert. Die Verluste werden als Anteil ausgedrückt, um den die Ausbringung einer Produktionslinie in einer Periode reduziert ist. Dies führt auf die folgende Beschreibung der Lieferzuverlässigkeit für das Produkt  $p$  in der Zeitperiode  $t$ , das beispielhaft auf den Produktionslinien 1 und 2 hergestellt werden kann:

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

$$\text{Lieferzuverlässigkeit für } p \text{ in } t = \frac{\text{Lagerbestand für } p \text{ in } t-1}{\text{Bedarf von } p \text{ in } t} +$$

$$(1 - \text{Kapazitätsverluste Linie 1 in } t) + (1 - \text{Kapazitätsverluste Linie 2 in } t) \quad (5.2)$$

**Remanenzrisiko** Der Begriff Remanenzkosten geht auf BRASCH (1927, S. 67) zurück und beschreibt das Phänomen, „*dass die Kosten bei einem Mengen- bzw. Absatzrückgang nicht im gleichen Maß zurückgehen, wie sie zuvor bei einer Mengen- bzw. Absatzsteigerung gleichen Ausmaßes zugenommen haben*“ (MAHLENDORF 2009, S. 193). HEINEN (1975, S. 147-153) führt u. a. die fehlende Möglichkeit zur kurzfristigen Anpassung von Fixkosten auf sinkende Nachfrage sowie die eingeschränkten Optionen zur Reduzierung der beschäftigten Mitarbeiter als Gründe für das Entstehen von Remanenzkosten an. Die Abbildung des Phänomens der Remanenzkosten erfordert in der Folge die Berücksichtigung der Limitationen zur Anpassung der Beschäftigungssituation. Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Kosten für nicht ausgelastete Mitarbeiter und fließt damit in die Berechnung der LAWs sowie des Kapitalwerts ein.

Als Metrik für das Remanenzrisiko wird der Anteil herangezogen, um den der Marktbedarf zurückgehen kann, ohne dass eine vorgegebene Höhe der Kosten pro Einheit überschritten wird. Analog zur Berechnung der Bestellmengenflexibilität erfolgt die Reduzierung des Marktbedarfs bei konstantem Produktmix. Je weiter der Marktbedarf rückläufig sein kann ohne den vorgegebenen Wert für die Kosten pro Einheit zu überschreiten, desto geringer ist das Remanenzrisiko. In der Grenzbetrachtung kann der Marktbedarf bei ausschließlich variablen Produktionskosten auf null zurückgehen.

## 5.2 Mathematisches Modell zur Netzwerkkonfiguration

Die Vorstellung des mathematischen Modells erfolgt analog zur Gliederung der Modellbildung. Vorab werden allgemeine Techniken der Modellformulierung erläutert. Die Beschreibung der Formelzeichen findet sich im Abschnitt Modellnotation.

### 5.2.1 Allgemeine Techniken der Modellformulierung

Eine wiederholt eingesetzte Vorgehensweise zur Transformation nichtlinearer Terme bildet den ersten Teil dieses Abschnitts. Der zweite besteht aus einer simultanen Bewertung einer Netzwerkalternative bei verschiedenen Betriebspunkten, die zur Abbildung der formulierten Metriken der einzelnen Zielgrößen erforderlich ist.

### 5.2.1.1 Transformation nichtlinearer Terme

Die nichtlinearen Terme *Produkte von Binärvariablen* sowie *Produkte binärer und einer kontinuierlichen/ganzzahligen Variablen* können als gemischt-ganzzahlige Ausdrücke dargestellt werden (KALLRATH 2013, S. 146-147). Die Binärpotenz

$$p = \prod_{k=1}^K \delta_k \quad , \quad \delta_k \in \{0, 1\} \quad , \quad K \in \mathbb{N} \quad (5.3)$$

kann mit Hilfe der folgenden Ungleichungen als gemischt ganzzahliger Ausdruck formuliert werden:

$$p \leq \delta_k \quad \forall k \quad , \quad -p + \sum_{k=1}^K \delta_k \leq K - 1 \quad (5.4)$$

Die Multiplikation von  $K$  Binärvariablen und einer kontinuierlichen oder ganzzahligen nichtnegativen Variablen  $x$ , d. h. Produkte der Form

$$y = x \prod_{k=1}^K \delta_k \quad , \quad \delta_k \in \{0, 1\} \quad , \quad K \in \mathbb{N} \quad (5.5)$$

lassen sich durch die folgenden Ungleichungen unter Zuhilfenahme der oberen Schranke  $X^+$  von  $x$  in lineare Ausdrücke transformieren:

$$y \leq X^+ \delta_k \quad \forall k \quad , \quad y \leq x \quad , \quad y \geq x - X^+ \left( K - \sum_{k=1}^K \delta_k \right) \quad (5.6)$$

Im Rahmen der nachfolgenden mathematischen Formulierung des Optimierungsmodells wird zugunsten der Nachvollziehbarkeit auf die Transformation entsprechender Produkte durch die Ausdrücke aus den Formeln 5.4 und 5.6 verzichtet.

### 5.2.1.2 Vorüberlegungen zur Formulierung der Zielgrößen

Die Bewertung von Netzwerkalternativen basiert auf der Ausprägung der Entscheidungsvariablen. Diese lassen sich in zwei Kategorien gliedern. Erstere beschreiben die eigentliche Ausgestaltung des Produktionsnetzwerks und letztere den prognostizierten Netzwerkbetrieb. In Abbildung 5.9 ist die Aufteilung der wesentlichen Entscheidungsvariablen des mathematischen Modells in diese Kategorien dargestellt.

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

Gestaltbeschreibende Entscheidungsvariablen		
Periodenspezifische Beschreibung des Betriebs von ... ... Standorten ... Technologien ... Produktionslinien	Periodenspez. Beschreibung der Linienbefähigungen für ... ... Produktgenerationen ... Produktfamilien ... Produkte	Periodenspezifische Beschreibung der Kapazität je Produktionslinie
Betriebsbeschreibende Entscheidungsvariablen		
Produktionsvolumen je Produkt, Produktionslinie und Periode	Transportvolumen zwischen ... ... Beschaffungsmärkten ... Produktionslinien ... Absatzmärkten und ... Zollregionen je Produkt und Periode	Erforderliches Schichtmodell je Produktionslinie und Periode
Lagerbestand je Produkt, Produktionslinie und Periode		Anzahl erforderlicher Mitarbeiter je Produktionslinie und Periode
Erforderliche Arbeitszeit je Produktionslinie und Periode		

Abbildung 5.9: Kategorisierung der Entscheidungsvariablen

Während der EAW ausschließlich durch die Ausgestaltung des Produktionsnetzwerks bestimmt wird, sind die anderen Zielgrößen abhängig von der Höhe der Produktionsbedarfe und damit vom Betriebspunkt des Produktionsnetzwerks. Die Bewertung einer Netzwerkalternative hinsichtlich der definierten Zielgrößen erfordert daher die Betrachtung einer Netzwerkausgestaltung in verschiedenen Betriebspunkten. Die Bewertung der finanziellen Zielgrößen LAW und Kapitalwert sowie der Liefergeschwindigkeit und -zuverlässigkeit erfolgt im Betriebspunkt zur Herstellung der prognostizierten Produktbedarfe. Zur Ermittlung des Remanenzrisikos ist die Bestimmung des Betriebspunkts erforderlich, in dem die Kosten pro Einheit trotz gesunkener Nachfrage eine vorgegebene Höhe nicht überschreiten. Die Bewertung der Zielgröße Flexibilität erfolgt im Betriebspunkt bei maximal möglicher Ausbringung. Eine Netzwerkalternative ist im Rahmen der multikriteriellen Optimierung daher zeitgleich in drei Betriebspunkten zu bewerten. Das Optimierungsmodell muss die Entscheidungsvariablen zur Beschreibung des Netzwerkbetriebs daher in dreifacher Ausführung beinhalten.

### 5.2.2 Festlegung der Netzwerkstruktur

Die folgenden Abschnitte dienen der mathematischen Formulierung der funktionalen Nebenbedingungen für die Festlegung der Netzwerkstruktur. Die Gliederung der Ausführungen folgt der in Abbildung 5.2 zusammengefassten Struktur.



### 5.2.2.1 Betrieb von Produktionslinien

Gemäß der Modellbildung aus Abschnitt 5.1 bilden Produktionslinien die wesentlichen gestaltbestimmenden Elemente eines Produktionsnetzwerks. Eine zentrale Entscheidung besteht daher in der Festlegung, welche Produktionslinien sich in den einzelnen Zeitperioden in Betrieb befinden, d. h. zur Herstellung von Produkten eingesetzt werden. Formal lässt sich dieser Zusammenhang derart ausdrücken, dass die Produktionsvolumina in den drei Betriebspunkten  $fPV$ ,  $fBPV + fFLPV$  und  $fRPV$  in der Periode  $t$  auf der Produktionslinie  $l$  nur dann einen Wert größer 0 annehmen können, wenn sich die Produktionslinie  $l$  in der Periode  $t$  in Betrieb befindet, d. h. die Booleanvariable  $bLIT_{lt}$  den Wert 1 annimmt (vgl. Ungleichung 5.7).

$$\sum_{(l,p,f,g) \in BEP} fPV_{lpfgt} + fFLPV_{lpfgt} + fBPV_{lpfgt} + fRPV_{lpfgt} \leq BigM \cdot bLIT_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.7)$$

Die Zeitpunkte der In- und Außerbetriebnahme von Produktionslinien fließen in die Berechnung des Kapitalwerts ein. Es gilt daher zu gewährleisten, dass die Booleanvariable  $bLI_{ln_t}^{sop}$  für eine potentielle Linie  $l^n$  in der Periode  $t$  genau dann den Wert 1 annimmt, wenn die Produktionslinie in Betrieb genommen wird. Ungleichung 5.8 stellt zunächst sicher, dass die Booleanvariable für die Liniennutzung  $bLIT_{ln_t}$  nur dann den Wert 1 annehmen kann, wenn die zugehörige Linie  $l^n$  einen SOP hat, d. h.  $bLI_{ln_t}^{sop} = 1$  gilt.

$$\sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bLIT_{ln_t} \leq \sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bLI_{ln_t}^{sop} \cdot BigM \quad \forall l^n \in LN, tt \in T \quad (5.8)$$

Mit Ungleichung 5.9 wird sichergestellt, dass die Booleanvariable  $bLI_{ln_t}^{sop}$ , die den SOP einer potentiellen Produktionslinie anzeigt, für eine Linie nur einmal den Wert 1 annehmen kann.

$$\sum_{t \in T} bLI_{ln_t}^{sop} \leq 1 \quad \forall l^n \in LN \quad (5.9)$$

Durch die in Formel 5.10 abgebildete Forderung, dass der Wert der Booleanvariable  $bLI_{ln_t}^{sop}$  für jede potentielle Produktionslinie  $l^n$  in jeder Zeitperiode  $t$  kleiner oder gleich der Booleanvariable  $bLIT_{ln_t}$  sein muss, wird sichergestellt, dass sich eine Produktionslinie in der SOP-Periode in Betrieb befindet.

$$bLI_{ln_t}^{sop} \leq bLIT_{ln_t} \quad \forall l^n \in LN, t \in T \quad (5.10)$$

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

Analog zu Produktionslinien wird mit den Ungleichungen 5.11 bis 5.13 sichergestellt, dass die Booleanvariable  $bLI_{lt}^{eop}$  für eine Produktionslinie  $l$  in der Periode  $t$  genau dann den Wert 1 annimmt, wenn die Linie in dieser Zeitperiode außer Betrieb genommen wird.

$$bLIT_{l,t-1} - bLIT_{lt} \leq bLI_{l,t-1}^{eop} \quad \forall l \in L, t \in \{T \mid t \geq 2\} \quad (5.11)$$

$$bLIT_{l,t+1} + bLI_{lt}^{eop} \leq 1 \quad \forall l \in L, t \in \{T \mid t < t^{max}\} \quad (5.12)$$

$$\sum_{t \in T} bLI_{lt}^{eop} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (5.13)$$

### 5.2.2.2 Betrieb von Produktionsstandorten

Produktionsstandorte stellen gemäß der Modellbildung keine eigenständigen Knoten eines Produktionsnetzwerks, sondern Eigenschaften von Produktionslinien dar. Der Betrieb von Produktionsstandorten bildet jedoch die Voraussetzung für den Betrieb von Produktionslinien und damit der Herstellung von Produkten. Dementsprechend darf eine Produktionslinie  $l$  in einer Periode  $t$  wie in Formel 5.14 dargestellt nur dann betrieben werden, wenn sich der zugehörige Standort  $s$  in dieser Periode in Betrieb befindet.

$$\sum_{(s,e,l) \in PNS} bLIT_{lt} \leq bSTT_{st} \cdot BigM \quad \forall s \in S, t \in T \quad (5.14)$$

Gleichzeitig darf sich ein Produktionsstandort  $s$  in einer Periode  $t$  nur dann in Betrieb befinden, wenn an diesem mindestens eine Linie  $l$  aktiviert ist (vgl. Formel 5.15).

$$bSTT_{st} \leq \sum_{(s,e,l) \in PNS} bLIT_{lt} \quad \forall s \in S, t \in T \quad (5.15)$$

Die Zeitpunkte der In- und Außerbetriebnahme von Produktionsstandorten bilden in gleicher Weise wie für Produktionslinien wesentliche Eingangsgrößen für die Berechnung des Kapitalwerts. Die Modellierung dieser Zeitpunkte erfolgt analog zu Produktionslinien. Die zugehörigen Formeln befinden sich im Anhang A.1.1.

### 5.2.2.3 Betrieb von Technologien

Die Modellierung des Betriebs von Technologien erfolgt analog zu Standorten. Die zugehörigen Nebenbedingungen können im Anhang A.1.2 nachgeschlagen werden.

5.2.2.4 Befähigungsplanung für Produkte

Für die Herstellung eines Produkts  $p$  auf einer Produktionslinie  $l$  in der Zeitperiode  $t$  in einem der drei Betriebspunkte muss diese für das entsprechende Produkt befähigt sein, d. h. die Booleanvariable  $bBEP_{lpfgt}$  den Wert 1 annehmen (vgl. Formel 5.16).

$$fPV_{lpfgt} + fFLPV_{lpfgt} + fBPV_{lpfgt} + fRPV_{lpfgt} \leq bBEP_{lpfgt} \cdot BigM \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in T \quad (5.16)$$

Der Betrieb einer Produktionslinie  $l$  in Periode  $t$  bildet die Voraussetzung für die Befähigung dieser Linie für ein Produkt  $p$  in dieser Periode. Gemäß Ungleichung 5.17 darf die Zustandsvariable  $bLIT_{lt}$  daher für alle Befähigungen und Perioden keinen kleineren Wert annehmen als die Variable  $bBEP_{lpfgt}$ .

$$bLIT_{lt} \geq bBEP_{lpfgt} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in T \quad (5.17)$$

Die Zeitpunkte der In- und Außerbetriebnahme von Linienbefähigungen fließen in die Berechnung des Kapitalwerts ein. Durch die Formeln 5.18 bis 5.20 wird analog zu Produktionslinien sichergestellt, dass die Variable  $bBEP_{lpfgt}^{sop}$  in der SOP-Periode den Wert 1 annimmt.

$$\sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bBEP_{lpfgt} \leq \sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bBEP_{lpfgt}^{sop} \cdot BigM \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^n, tt \in T \quad (5.18)$$

$$\sum_{t \in T} bBEP_{lpfgt}^{sop} \leq 1 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^n \quad (5.19)$$

$$bBEP_{lpfgt}^{sop} \leq bBEP_{lpfgt} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^n, t \in T \quad (5.20)$$

Mit den Nebenbedingungen 5.21 bis 5.24 wird gewährleistet, dass die Booleanvariable  $bBEP_{lpfgt}^{eop}$  in der Periode der Außerbetriebnahme einer Produktbefähigung den Wert 1 annimmt.

$$bBEP_{lpfgt-1} - bBEP_{lpfgt} \leq bBEP_{lpfgt-1}^{eop} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in \{T | t \geq 2\} \quad (5.21)$$

$$bBEP_{lpfgt+1} + bBEP_{lpfgt}^{eop} \leq 1 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in \{T | t < t^{max}\} \quad (5.22)$$

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

---

$$bBEP_{lpfgt} \geq bBEP_{lpfgt}^{op} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in \{T \mid t < t^{max}\} \quad (5.23)$$

$$\sum_{t \in T} bBEP_{lpfgt}^{op} \leq 1 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP \quad (5.24)$$

### 5.2.2.5 Befähigungsplanung für Produktgenerationen

Die Befähigung einer Produktionslinie für ein Produkt setzt die Befähigung für die zugehörige Produktgeneration voraus. Formal lässt sich dieser Zusammenhang derart ausdrücken, dass die Booleanvariable  $bBEP_{lpfgt}$ , die eine Befähigung einer Produktionslinie  $l$  für das Produkt  $p$  aus der Produktfamilie  $f$  und der Generation  $g$  anzeigt, nur dann den Wert 1 annehmen kann, wenn die Befähigung für die zugehörige Produktgeneration  $g$  in Periode  $t$  vorhanden ist. Dies wird durch den Wert 1 der Booleanvariable  $bBEG_{lgt}$  angezeigt (vgl. Formel 5.25).

$$bBEP_{lpfgt} \leq bBEG_{lgt} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in T \quad (5.25)$$

Analog zu Produktbefähigungen bildet der Betrieb einer Produktionslinie die Voraussetzung für deren Befähigung für eine Produktgeneration. Folglich darf die Booleanvariable  $bBEG_{lgt}$  für die Befähigung einer Produktionslinie  $l$  für die Produktgeneration  $g$  nur dann den Wert 1 annehmen, wenn sich die zugehörige Produktionslinie  $l$  in Periode  $t$  in Betrieb befindet, d. h. die Booleanvariable  $bLIT_{lt}$  den Wert 1 annimmt (vgl. Nebenbedingung 5.26).

$$bBEG_{lgt} \leq bLIT_{lt} \quad \forall (l, g) \in BEG, t \in T \quad (5.26)$$

Die Modellierung des SOP von Linienbefähigungen für Produktgenerationen erfolgt in gleicher Weise wie für Produktbefähigungen. Die zugehörigen Formeln finden sich im Anhang A.1.3. Der EOP von Linienbefähigungen für Produktgenerationen fließt gemäß Abschnitt 5.1.4.2 nicht in den Kapitalwert ein.

### 5.2.2.6 Befähigungsplanung für Produktfamilien

Die Modellierung der Befähigungsplanung für Produktfamilien erfolgt in analoger Weise zu Produktgenerationen. Die zugehörigen Formeln finden sich im Anhang A.1.4.

### 5.2.2.7 Kapazitätsplanung für Produktionslinien

Die Kapazität einer Linie kann durch Veränderung der Taktzeit oder der Betriebszeit angepasst werden. Die Variation der Betriebszeit stellt eine organisatorische Maßnahme dar und wird im Rahmen der Modellierung des Netzwerkbetriebs erläutert. Gegenstand dieses Abschnitts ist die Kapazitätsplanung auf Basis der Veränderung von Taktzeiten und damit technischer Anpassungen. In diesem Zusammenhang ist sicherzustellen, dass in jeder Periode genau eine Kapazitätsstufe je Linie aktiviert ist (vgl. Formel 5.27).

$$\sum_{(l,k) \in LK} bCYT_{lkt} \equiv 1 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.27)$$

In die Berechnung des EAW für Kapazitätserweiterungen fließt die Variable  $bCYTIN_{lk_1k_2t}$  ein. Formel 5.28 stellt sicher, dass diese genau dann den Wert 1 annimmt, wenn die Linie  $l$  in Periode  $t$  von der Kapazitätsstufe  $k_1$  auf Stufe  $k_2$  ausgebaut wird.

$$bCYTIN_{lk_1k_2t} \equiv bCYT_{lk_2t} \cdot bCYT_{lk_1t-1} \quad \forall (l, k_1, k_2) \in LKIN, t \in \{T \mid t > 1\} \quad (5.28)$$

Für die richtige Kostenberechnung für Kapazitätserweiterungen muss für potentielle Linien in der Periode  $t^{min}$  die Ausbaustufe 1 aktiviert werden (vgl. Formel 5.29). Ansonsten könnte in Periode  $t^{min}$  bereits eine erhöhte Kapazitätsstufe aktiviert werden und so die damit verbundenen Auszahlungen fehlerhafterweise umgangen werden.

$$bCYT_{lkt} \equiv 1 \quad \forall l^n \in LN, k = 1, t = 1 \quad (5.29)$$

In analoger Weise zum Kapazitätsausbau fließt die Booleanvariable  $bCYTDE_{lk_1k_2t}$  in die Berechnung des EAW für den Rückbau der Kapazität einer Produktionslinie ein. Mit nachfolgender Formel 5.30 wird sichergestellt, dass die Variable  $bCYTDE_{lk_1k_2t}$  genau dann den Wert 1 annimmt, wenn die Produktionslinie  $l$  in Periode  $t$  von der Kapazitätsstufe  $k_1$  auf die Stufe  $k_2$  zurückgebaut wird.

$$bCYTDE_{lk_1k_2t} \equiv bCYT_{lk_2t} \cdot bCYT_{lk_1t-1} \quad \forall (l, k_1, k_2) \in LKDE, t \in \{T \mid t > 1\} \quad (5.30)$$

### 5.2.3 Anforderungen aus der Netzwerkmigration

Dieser Abschnitt dient der mathematischen Formulierung der in Tabelle 5.1 dargestellten Anforderungen aus der Netzwerkmigration für die Elemente der Netzwerkstruktur.

### 5.2.3.1 Betrieb von Produktionslinien

**NM.1: Berücksichtigung des Ist-Zustands des Produktionsnetzwerks** Zur Erfüllung dieser Anforderung nach der Berücksichtigung des Ist-Zustands ist sicherzustellen, dass sich alle derzeit im Produktionsnetzwerk vorhandenen Produktionslinien  $l^v$  in der ersten Periode des Betrachtungszeitraums  $t^{min}$  in Betrieb befinden. Mit Formel 5.31 wird daher gewährleistet, dass die Booleanvariable  $bLIT_{l^v,t}$ , die den Betrieb einer Produktionslinie anzeigt, für die entsprechenden Produktionslinien in Periode  $t^{min}$  den Wert 1 annimmt.

$$bLIT_{l^v,t^{min}} \equiv 1 \quad \forall l^v \in LV \quad (5.31)$$

### NM.2: Berücksichtigung des zeitlichen Vorlaufs von Migrationsmaßnahmen

Für potentielle Produktionslinien  $l^n$  ist der erforderliche zeitliche Vorlauf zur Installation, also die Einhaltung des frühest möglichen Linien SOP  $l^n^{SOP}$ , zu berücksichtigen. Die Variable  $bLIT_{l^n,t}$  muss in Konsequenz vor dem frühest möglichen Linien SOP den Wert 0 annehmen, wie in 5.32 formelmäßig dargestellt.

$$bLIT_{l^n,t} \equiv 0 \quad \forall l^n \in LN, t \in \{T \mid t < l^n^{SOP}\} \quad (5.32)$$

### NM.3: Berücksichtigung erforderlicher Maßnahmen zur Netzwerkanpassung

Für Produktionslinien sind Ersatzinvestitionen zu tätigen, falls diese nach einer erforderlichen technischen Überholung weiter betrieben werden sollen. Während der Zeitpunkt für das Tätigen von Ersatzinvestitionen für vorhandene Produktionslinien bekannt ist, hängt dieser für potentielle Linien von der Inbetriebnahmeperiode ab. Für potentielle Produktionslinien wird daher die Booleanvariable  $bRP_{l^n,t}$  eingeführt. Diese muss in einer Periode  $t$  genau dann den Wert 1 annehmen, falls für eine potentielle Linie  $l^n$  Ersatzinvestitionen zu tätigen sind. Formel 5.33 stellt daher sicher, dass die Variable  $bRP_{l^n,t}$  nach Ablauf der möglichen Produktionsperioden  $trp$  bis zur erforderlichen technischen Überholung einer Produktionslinie den Wert 1 annimmt, sofern sich die Linie zu diesem Zeitpunkt noch in Betrieb befindet.

$$bRP_{l^n,t+trp_{l^n}^n} \equiv bL_{l^n,t}^{SOP} \cdot bLIT_{l^n,t+trp_{l^n}^n} \quad \forall l^n \in LN, t \in \left\{T \mid t \leq t^{max} - trp_{l^n}^n\right\} \quad (5.33)$$

Zur Erfüllung der Anforderung NM.3 dürfen sich potentielle Linien  $l^n$  (Formel 5.34) und vorhandene Linien  $l^v$  (Formel 5.35) darüber hinaus nach dem spätest möglichen

EOP nicht mehr in Betrieb befinden. Die Booleanvariable  $bLIT_{lt}$ , die den Betrieb einer Produktionslinie anzeigt, muss in diesem Zeitraum folglich den Wert 0 annehmen.

$$bLIT_{ln_t} \equiv 0 \quad \forall l^n \in LN, t \in \{T \mid t > lin_{ln}^{EOP}\} \quad (5.34)$$

$$bLIT_{lv_t} \equiv 0 \quad \forall l^v \in LV, t \in \{T \mid t > liv_{lv}^{EOP}\} \quad (5.35)$$

**NM.4: Keine Wiederinbetriebnahme von Netzwerkelementen** Zur Vermeidung der Wiederinbetriebnahme vorhandener Produktionslinien  $l^v$  nach erstmaliger Stilllegung ist die Forderung ausreichend, dass die Variable  $bLIT_{lv_t}$  für eine Linie in der Periode  $t$  nicht größer als in der Periode  $t-1$  sein darf (vgl. Formel 5.36). In Bezug auf potentielle Produktionslinien  $l^n$  ist zu fordern, dass die Summe des Betrags aus der Differenz der Variable  $bLIT_{ln_t}$  zu den Zeitpunkten  $t+1$  und  $t$  über alle Perioden den Wert 2 nicht überschreitet (vgl. Formel 5.37).

$$bLIT_{lv_t} \leq bLIT_{lv_{t-1}} \quad \forall l^v \in LV, t \in \{T \mid t \geq 2\} \quad (5.36)$$

$$\sum_{t \in \{T \mid t < t^{max}\}} |bLIT_{ln_{t+1}} - bLIT_{ln_t}| \leq 2 \quad \forall l^n \in LN \quad (5.37)$$

### 5.2.3.2 Betrieb von Produktionsstandorten und Technologien

Für den Betrieb von Produktionsstandorten und Technologien sind die Anforderungen NM.2 und NM.4 zu implementieren. Dies erfolgt weitestgehend analog zu Produktionslinien und wird nicht weiter ausgeführt. Die zugehörigen Formeln für den Betrieb von Produktionsstandorten bzw. Technologien finden sich im Anhang A.2.1 bzw. A.2.2.

### 5.2.3.3 Befähigungsplanung für Produkte

**NM.1: Berücksichtigung des Ist-Zustands des Produktionsnetzwerks** Analog zu Linien ist für die Befähigungsplanung die Forderung nach einer Berücksichtigung des Ist-Zustands umzusetzen. In Bezug auf Produktionslinien wurde dies durch den Betrieb aller vorhandenen Linien in der Periode  $t^{min}$  erreicht. Im Gegensatz dazu besteht im Hinblick auf Produktbefähigungen die Möglichkeit, dass eine Linie technisch bereits für ein Produkt befähigt ist, bspw. aus Gründen der logistischen Anbindung jedoch nicht in Betrieb ist. Eine vorhandene Produktbefähigung kann daher einen in der Zukunft liegenden SOP  $beP_{lpfg}^{sop}$  aufweisen. Die Formeln 5.38 und 5.39 stellen

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

sicher, dass eine Produktbefähigung nicht vor, aber zu diesem SOP genutzt wird und die Booleanvariable  $bBEP_{lpfgt}$  in der SOP-Periode  $beP_{lpfg}^{vsop}$  den Wert 1 annimmt.

$$bBEP_{lpfgt} \equiv 0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^v, t \in \left\{ T \mid t < beP_{lpfg}^{vsop} \right\} \quad (5.38)$$

$$bBEP_{lpfgt} \equiv 1 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^v, t \in \left\{ T \mid t = beP_{lpfg}^{vsop} \right\} \quad (5.39)$$

### NM.2: Berücksichtigung des zeitlichen Vorlaufs von Migrationsmaßnahmen

Für potentielle Produktbefähigungen ist der zeitliche Vorlauf für die Implementierung zu berücksichtigen. In Konsequenz dürfen diese nicht vor dem frühest möglichen SOP  $beP_{lpfg}^{nsop}$  in Betrieb genommen werden (vgl. Formel 5.40).

$$bBEP_{lpfgt} \equiv 0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^n, t \in \left\{ T \mid t < beP_{lpfg}^{nsop} \right\} \quad (5.40)$$

### NM.3: Berücksichtigung erforderlicher Maßnahmen zur Netzwerkanpassung

In gleicher Weise wie für Produktionslinien können auch für Linienbefähigungen erforderliche Maßnahmen zur Netzwerkanpassung in Form von spätest möglichen EOPs bestehen. Sowohl bestehende als auch potentielle Befähigungen dürfen nach diesem Zeitpunkt nicht mehr betrieben werden. Mit den Formeln 5.41 und 5.42 wird daher gewährleistet, dass die Booleanvariable  $bBEP_{lpfgt}$ , welche die Nutzung einer Linienbefähigung anzeigt, nach dem spätesten EOP den Wert 0 annimmt.

$$bBEP_{lpfgt} \equiv 0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^v, t \in \left\{ T \mid t > beP_{lpfg}^{veop} \right\} \quad (5.41)$$

$$bBEP_{lpfgt} \equiv 0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^n, t \in \left\{ T \mid t > beP_{lpfg}^{neop} \right\} \quad (5.42)$$

**NM.4: Keine Wiederinbetriebnahme von Netzwerkelementen** Die Wiederinbetriebnahme von Linienbefähigungen nach erstmaliger Stilllegung wird analog zu Produktionsstandorten durch die folgenden Formeln 5.43 und 5.44 unterbunden.

$$bBEP_{lpfgt} \leq bBEP_{lpfgt-1} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^v, t \in \left\{ T \mid t > beP_{lpfg}^{vsop} \right\} \quad (5.43)$$

$$\sum_{t \in \{T \mid t < t^{max}\}} |bBEP_{lpfgt+1} - bBEP_{lpfgt}| \leq 2 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^n \quad (5.44)$$



**NM.5: Berücksichtigung der techn. Fähigkeiten von Netzwerkelementen** Im Zuge der Befähigungsplanung ist sicherzustellen, dass die maximale Anzahl an Produkten für die eine Produktionslinie in einer Periode maximal befähigt sein kann, nicht überschritten wird. Mit nachfolgender Ungleichung 5.45 wird die Anzahl der parallel in Betrieb befindlichen Befähigungen daher auf den linien- und periodenspezifischen Maximalwert  $beP_{lt}^{anz}$  begrenzt.

$$\sum_{(l,p,f,g) \in BEP} bBEP_{lpfgt} \leq beP_{lt}^{anz} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.45)$$

**NM.6: Berücksichtigung von migrationsbedingten Kapazitätsverlusten** Die Befähigung einer Produktionslinie  $l$  für ein Produkt  $p$  erfordert im Allgemeinen einen Linienumbau und eine damit verbundene Produktionsunterbrechung inkl. anschließender Hochlaufkurve für die Linienausbringung. Mit Formel 5.46 werden die Kapazitätsverluste  $fLOSS_{lpfgt^s}^p$  in den Perioden nach der Realisierung einer Produktbefähigung berücksichtigt.

$$fLOSS_{lpfgt-zvP_{lpfg}-1}^p \equiv \sum_{t^s \in \{T^G \mid t^s < t \wedge t-t^s \leq t^{max}\}} bBEP_{lpfgt-t^s}^{sop} \cdot loss_{lpfgt^s}^p$$

$$\forall (l, p, f, g) \in BEP^n, t \in \left\{ T^T \mid t > zvP_{lpfg} + 1 \wedge t \leq t^{max} + zvP_{lpfg} + 1 \right\} \quad (5.46)$$

### 5.2.3.4 Befähigungsplanung für Produktgenerationen und Produktfamilien

In gleicher Weise wie für Produktbefähigungen werden für Befähigungen für Produktgenerationen und Produktfamilien die Begrenzung der Anzahl der in einer Periode aktiven Befähigungen sowie die Kapazitätsverluste aus den Umbaumaßnahmen modelliert. Die zugehörigen Formeln finden sich im Anhang in den Abschnitten A.2.3 und A.2.4.

### 5.2.3.5 Kapazitätsplanung für Produktionslinien

#### NM.2: Berücksichtigung des zeitlichen Vorlaufs von Migrationsmaßnahmen

Analog zu Produktionslinien darf der Ausbau einer bestehenden bzw. potentiellen Produktionslinie  $l$  nicht vor dem frühesten SOP der Kapazitätserweiterung  $Ik_{lk}^{sop}$  erfolgen (vgl. Formeln 5.47 bzw. 5.48).

$$bCYT_{l^v kt} \equiv 0 \quad \forall l^v \in LV, (l, k) \in LK, t \in \{T \mid t < lk_{lk}^{sop}\} \quad (5.47)$$

$$bCYT_{l^p kt} \equiv 0 \quad \forall l^p \in LN, (l, k) \in \{LK \mid k \neq 1\}, t \in \{T \mid t < lk_{lk}^{sop}\} \quad (5.48)$$

**NM.6: Berücksichtigung von migrationsbedingten Kapazitätsverlusten** In gleicher Weise wie bei Befähigungen treten auch bei Kapazitätserweiterungen Ausbringerungsverluste auf. Durch Formel 5.49 wird sichergestellt, dass die Kapazitätsverluste  $loss_{lk_2 t^g}^{lk}$  für die Realisierung der Kapazitätsstufe  $k_2$  berücksichtigt werden.

$$fLOSS_{lk_1 k_2 t - zvlk_{k_2} - 1}^{lk} \equiv \sum_{t^g \in \{T^G \mid t^g < t \wedge t - t^g \leq t^{max}\}} bCYTIN_{lk_1 k_2 t - t^g} \cdot loss_{lk_2 t^g}^{lk} \\ \forall (l, k_1, k_2) \in LKIN, t \in \left\{ T^T \mid t > zvlk_{k_2} + 1 \wedge t \leq t^{max} + zvlk_{k_2} + 1 \right\} \quad (5.49)$$

### NM.7: Berücksichtigung der Interdependenz von Migrationsmaßnahmen

Im Allgemeinen geht der Kapazitätsausbau von Produktionslinien mit steigendem Flächenbedarf einher. Aufgrund von Flächenrestriktionen kann der Fall eintreten, dass örtlich benachbarte Produktionslinien Ausbaubeschränkungen unterliegen. Mit Formel 5.50 wird daher gewährleistet, dass die Summe der Ausbaustufen  $k_1$  und  $k_2$  zweier benachbarter Produktionslinien  $l_1$  und  $l_2$  einen vorgegebenen Wert  $k^{max}$  nicht unterschreitet.

$$\sum_{(l_1, k_1) \in LK} bCYT_{l_1 k_1 t} \cdot k_1 + \sum_{(l_2, k_2) \in LK} bCYT_{l_2 k_2 t} \cdot k_2 \geq k^{max} \quad \forall (l_1, l_2, k^{max}) \in LKMI, t \in T \quad (5.50)$$

## 5.2.4 Anforderungen aus dem Netzwerkbetrieb

Nach der Formulierung der Nebenbedingungen für die Netzwerkmigration gilt es, den Betrieb des Produktionsnetzwerks zu modellieren. Die entsprechenden Anforderungen sind für die drei Betriebspunkte *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf*, *Produktion gemäß Remanenzfall* und *Produktion bei maximaler Ausbringung* abzubilden. Der Großteil dieser Nebenbedingungen gilt in analoger Weise für alle drei Betriebspunkte. Zur Vermeidung der mehrfachen Vorstellung gleichartiger Zusammenhänge werden im Folgenden ausschließlich die Formeln für den Betriebspunkt *Produktion gemäß*

prognostiziertem Bedarf erläutert. Die Nebenbedingungen für die beiden anderen Betriebspunkte finden sich im Anhang A.3.

**NB.1: Einhaltung der maximalen Kapazität** Zur Modellierung des Netzwerkbetriebs muss sichergestellt werden, dass die für die Produktion erforderliche Zeit  $fAZH_{ldt}$  auf Produktionslinie  $l$  in Schichtstufe  $d$  in Periode  $t$  die maximal zur Verfügung stehende Zeit nicht überschreitet. Diese berechnet sich nachdem in Abbildung 5.3 vorgestellten Schema aus der Multiplikation der Anlagenlaufzeit  $cap_{ldt}^D$  mit der OEE  $oeel_t$  sowie der Verluste aus der Netzwerkmigration  $fLOSS_{lt}$ . Letzterer gibt an, welcher Zeitanteil einer Periode für die Realisierung von Migrationsmaßnahmen erforderlich ist. Da sich dieser auf die Gesamtverfügbarkeit innerhalb einer Periode bezieht (vgl. Abbildung 5.3) müssen die Verluste  $fLOSS_{lt}$  wie in Formel 5.51 implementiert, durch den in dieser Periode produktiv nutzbaren Zeitanteil  $tsh_{lt}$  dividiert werden.

$$fAZH_{ldt} \leq cap_{ldt}^D \cdot oeel_t \cdot \left(1 - \frac{fLOSS_{lt}}{tsh_{lt}}\right) \quad \forall (l,d) \in LIS, t \in T \quad (5.51)$$

Die in Formel 5.51 einfließenden migrationsbedingten Verluste  $fLOSS_{lt}$  ergeben sich aus der Summe der Verluste für die Befähigung von Produktionslinien für Produkte, Produktfamilien und Produktgenerationen sowie Kapazitätserweiterungen (vgl. Formel 5.52). Da die Maßnahmen zur Netzwerkmigration unabhängig vom Netzwerkbetrieb sind, gelten die Verluste in gleicher Weise in allen drei Betriebspunkten.

$$\begin{aligned} fLOSS_{lt} \equiv & \sum_{(l,p,f,g) \in BEP^n} fLOSS_{lpfgt}^p + \sum_{(l,f) \in BEF^n} fLOSS_{lft}^f \\ & + \sum_{(l,g) \in BEG^n} fLOSS_{lgt}^g + \sum_{(l,k_1,k_2) \in LKIN} fLOSS_{lk_1k_2t}^k \quad \forall l \in L, t \in T \end{aligned} \quad (5.52)$$

Für die Summe der Verluste aus Migrationsmaßnahmen wird durch Formel 5.53 sichergestellt, dass der zur Verfügung stehende Zeitanteil nicht überschritten wird.

$$fLOSS_{lt} \leq tsh_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.53)$$

Die für die Produktion erforderliche Zeit  $fAZH_{ldt}$  auf Produktionslinie  $l$  in Schichtstufe  $d$  und Periode  $t$  ergibt sich aus der Multiplikation des Produktionsvolumens  $fPV_{lpfgt}$  je Produktbefähigung mit der zugehörigen Taktzeit  $cyt_{lpfgt}$  sowie der in der jeweiligen Periode aktiven Kapazitätsstufe  $k$  (vgl. Formel 5.54).

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

$$\sum_{(l,d) \in LIS} fAZH_{ldt} \equiv \sum_{(l,p,f,g,k) \in BEPK} fPV_{lpfgt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot k \cdot cyt_{lpfgt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.54)$$

Die erforderliche Arbeitszeit  $fAZH_{ldt}$  weist einen Bezug zur Schichtstufe  $d$  auf und darf dementsprechend in der Periode  $t$  nur dann einen Wert größer 0 annehmen, wenn die zugehörige Schichtstufe aktiv ist, d. h.  $bLIS_{ldt}$  gleich 1 gilt (vgl. Ungleichung 5.55).

$$fAZH_{ldt} \leq bLIS_{ldt} \cdot BigM \quad \forall (l,d) \in LIS, t \in T \quad (5.55)$$

Um zu vermeiden, dass einzelne Schichten in einer Zeitperiode mehrfach genutzt werden, wird mit Nebenbedingung 5.56 sichergestellt, dass für jede Produktionslinie  $l$  in jeder Zeitperiode  $t$  maximal eine Schichtmodellstufe aktiviert ist.

$$\sum_{(l,d) \in LIS} bLIS_{ldt} \leq 1 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.56)$$

Mit Formel 5.57 wird die Nutzung von nicht in Betrieb befindlichen Linien unterbunden. Dementsprechend darf die Summe der Booleanvariable  $bLIS_{ldt}$  über alle Schichtstufen in Periode  $t$  für die Linie  $l$  nur dann einen Wert größer 0 annehmen, wenn Linie  $l$  in dieser Periode in Betrieb ist, die Booleanvariable  $bLIT_{lt}$  also den Wert 1 hat.

$$\sum_{(l,d) \in LIS} bLIS_{ldt} \leq bLIT_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.57)$$

### NB.2: Einhaltung des minimalen Betriebspunkts von Netzwerkelementen

Zur Einhaltung dieser Anforderung muss die Betriebszeit für alle aktiven Linien  $l$  in jeder Periode  $t$  den Minimalwert  $mincap_{lt}$  überschreiten (vgl. Formel 5.58).

$$\sum_{(l,p,f,g,k) \in BEPK} fPV_{lpfgt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot k \cdot cyt_{lpfgt} \geq mincap_{lt} \cdot bLIT_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.58)$$

**NB.3: Sicherstellung der Materialflusserhaltung** Für jede Linie muss in jeder Periode der Zufluss an Kaufteilen und Komponenten, deren Transformation in Komponenten bzw. Endprodukte sowie die Materialabflüsse korrespondieren. Wie in Nebenbedingung 5.59 formal dargestellt, muss die Summe der an Produktionslinie  $l_2$  angelieferten Einheiten von Komponente  $p_1$  in jeder Periode  $t$  dem Verbrauch der Komponente  $p_1$  auf  $l_2$  entsprechen. Dieser ergibt sich aus der Multiplikation des Pro-

## 5.2 Mathematisches Modell zur Netzwerkkonfiguration

duktionsvolumens  $fPV_{l_2 p_2 f g t}$  aller Produkte  $p_2$ , zu deren Herstellung die Komponente  $p_1$  benötigt wird, mit dem zugehörigen Materialbedarfskoeffizienten  $mbk_{p_2 p_1}^p$ .

$$\sum_{(l_1, l_2, p_1) \in ROU^f} fTV_{l_1 l_2, p_1 t}^f \equiv \sum_{(p_2, p_1) \in BOP} \sum_{(l_2, p_2, f, g) \in BEP} mbk_{p_2 p_1}^p \cdot fPV_{l_2 p_2 f g t} \quad \forall t \in T, l_2 \in L^{def}, p_1 \in P^c \quad (5.59)$$

Analog der Materialflusserhaltung für Komponenten 5.59 muss diese für Kaufteile formuliert werden (vgl. Formel 5.60). Die Menge der an Produktionslinie  $l$  in Periode  $t$  angelieferten Kaufteile  $p^k$  muss dem Verbrauch auf  $l$  in  $t$  zur Herstellung von Produkten  $p$  entsprechen. Da Kaufteile nicht als limitierende Größe in die Berechnung der Zielgröße Flexibilität einfließen, erübrigt sich die Formulierung dieser Restriktion für den Betriebspunkt *Produktion bei maximaler Ausbringung*.

$$\sum_{(b, l, p^k) \in ROU^b} fTV_{bl p^k t}^b \equiv \sum_{(p, p^k) \in BOM} \sum_{(l, p, f, g) \in BEP} mbk_{pp^k}^m \cdot fPV_{l p f g t} \quad \forall t \in T, l \in L, p^k \in P^k \quad (5.60)$$

Analog zur Übereinstimmung von Materialzuflüssen mit dem Verbrauch ist sicherzustellen, dass die Produktion auf den Produktionslinien mit den Materialabflüssen korrespondiert. Da Lager im Modell gedanklich nach den Produktionslinien angeordnet werden, ist in diesem Zusammenhang zusätzlich der Auf- und Abbau von Lagerbeständen zu berücksichtigen. Wie in Formel 5.61 dargestellt, muss die Summe aus dem Produktionsvolumen  $fPV_{l_1 p f g t}$  für Produkt  $p$  in Periode  $t$  und dem Lagerbestand für  $p$  zum Ende der Vorperiode  $t-1$  der Summe aus allen Materialabflüssen  $fTV_{l_1 l_2 p t}^f$  bzw.  $fTV_{l_1 m p t}^m$  von Produkt  $p$  in  $t$  und dem Lagerbestand am Ende der Periode  $t$  entsprechen.

$$fPV_{l_1 p f g t} + fINV_{l_1 p f g t-1} \equiv \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} fTV_{l_1 l_2 p t}^f + \sum_{(l_1, m, p) \in ROU^m} fTV_{l_1 m p t}^m + fINV_{l_1 p f g t} \quad \forall t \in T, (l_1, p, f, g) \in \{BEP \mid l_1 \in L^{ori}\} \quad (5.61)$$

Wird bei der Dateneingabe fehlerhafterweise eine ausgehende Transportkante von Produktionslinie  $l$  für Produkt  $p$  vorgesehen, jedoch keine zugehörige Linienbefähigung, kann ohne Verletzung der Restriktion 5.61 der Fall eintreten, dass eine gewisse Menge von Produkt  $p$  die Produktionslinie  $l$  ohne zugehöriges Produktionsvolumen verlässt.

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

Nachfolgende Formel 5.62 dient zur Vermeidung dieser Verletzung der Materialflusserhaltung. Sie stellt sicher, dass das Produktionsvolumen  $fPV_{lpfgt}$  für jedes Produkt  $p$  in jeder Periode  $t$  unter Berücksichtigung der Lagerbestandsveränderung dem ausgehenden Transportvolumen aller Produktionslinien  $fTV_{l_1l_2pt}^f$  bzw.  $fTV_{l_1bpt}^m$  von  $p$  in  $t$  entspricht.

$$\begin{aligned} & \sum_{(l,p,f,g) \in \{BEP \mid l \in L^{ori}\}} fPV_{lpfgt} + fINV_{lpfgt-1} - fINV_{lpfgt} \\ & \equiv \sum_{(l_1,l_2,p) \in ROU^f} fTV_{l_1l_2pt}^f + \sum_{(l_1,b,p) \in ROU^m} fTV_{l_1bpt}^m \quad \forall t \in T, p \in P \end{aligned} \quad (5.62)$$

**NB.4: Modellierung der Lagerhaltung** Die Modellierung der Lagerhaltung erfordert in Ergänzung zur Einbeziehung in den Restriktionen zur Materialflusserhaltung die korrekte Berücksichtigung der zu Beginn des Betrachtungszeitraums vorhandenen Lagerbestände sowie die Einhaltung der maximalen Lagerkapazität. Mit folgender Nebenbedingung 5.63 werden den Lagerbeständen der einzelnen Produkte  $fINV_{lpfgt^{min-1}}$  in der Periode  $t^{min} - 1$  die zugehörigen Anfangsbestände  $inv_{lpfg}^0$  zugewiesen.

$$fINV_{lpfgt^{min-1}} \equiv inv_{lpfg}^0 \quad \forall (l,p,f,g) \in BEP^v \quad (5.63)$$

Im Gegensatz zu vorhandenen Linienbefähigungen kann für potentielle Linienbefähigungen, wie in Formel 5.64 dargestellt, kein Anfangsbestand vorhanden sein.

$$fINV_{lpfgt^{min-1}} \equiv 0 \quad \forall (l,p,f,g) \in BEP^a \quad (5.64)$$

Der Lagerbestand  $fINV_{lpfgt}$  darf die Grenze  $maxinv_{lpfgt}$  gemäß folgender Nebenbedingung 5.65 in keiner Periode  $t$  überschreiten.

$$fINV_{lpfgt} \leq maxinv_{lpfgt} \quad \forall (l,p,f,g) \in BEP, t \in T \quad (5.65)$$

**NB.5: Vermeidung einer Marktüberbelieferung** Wie in Restriktion 5.66 ausgedrückt, darf das in den Markt  $m$  eingehende Transportvolumen  $fTV_{lmp^e t}^m$  von Produkt  $p^e$  im Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf* in keiner Periode  $t$  den zugehörigen Marktbedarf  $dem_{mp^e t}$  überschreiten.

$$\sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fTV_{lmp^e t}^m \leq dem_{mp^e t} \quad \forall m \in M, t \in T, p^e \in P^e \quad (5.66)$$

**NB.6: Einhaltung der geforderten Kernmitarbeiterquote** Zur Einhaltung einer ggf. mit dem Sozialpartner vereinbarten erforderlichen Kernmitarbeiterquote  $kqu_{st}$  ist sicherzustellen, dass die Anzahl der Kernmitarbeiter  $fMAK_{st}$  im Verhältnis zur Gesamtmitarbeiteranzahl an jedem Produktionsstandort  $s$  in jeder Periode  $t$  ausreichend hoch ist (vgl. Formel 5.67).

$$\sum_{(s,e,l) \in PNS} fMA_{lt} \leq \frac{fMAK_{st}}{kqu_{st}} \quad \forall s \in S, t \in T \quad (5.67)$$

Die in Formel 5.67 einfließende erforderliche Mitarbeiteranzahl  $fMA_{lt}$  für den Betrieb der Produktionslinie  $l$  in Periode  $t$  ist abhängig vom gewählten Schichtmodell  $d$  sowie von der für diese Linie aktivierten Kapazitätsstufe  $k$ . Wie aus Formel 5.68 hervorgeht, wird ein linearer Zusammenhang zwischen der schichtmodellabhängigen Mitarbeiteranzahl  $perl_{dt}$  und der aktivierten Kapazitätsstufe  $k$  unterstellt.

$$fMA_{lt} \equiv \sum_{ldk \in DE} perl_{dt} \cdot bLIS_{ldt} \cdot \frac{bCYT_{lkt}}{k} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.68)$$

**NB 7: Einhaltung zeitlicher Restriktionen bei der Anpassung der Kernmitarbeiteranzahl** Neben der Einhaltung der Kernmitarbeiterquote sind zeitliche Restriktionen bei der Anpassung der Belegschaft zu beachten. Dementsprechend wird durch die Nebenbedingung 5.69 gewährleistet, dass sich die Anzahl der Kernmitarbeiter  $fMAK_{st}$  von Periode  $t-1$  zu Periode  $t$  maximal um den standortspezifischen Faktor  $maxkqu_s$  reduziert. Auf diese Art und Weise kann die zeitliche Anpassung der Kernbelegschaft gesteuert werden.

$$fMAK_{st} \geq (1 - maxkqu_s) \cdot fMAK_{st-1} \quad \forall s \in S, t \in T \quad (5.69)$$

Im Zusammenhang mit der Einhaltung zeitlicher Restriktionen bei der Anpassung der Kernmitarbeiteranzahl ist sicherzustellen, dass die Anzahl der Kernmitarbeiter in Periode  $t^{min} - 1$  an vorhandenen Produktionsstandorten  $fMAK_{s^v, t^{min}-1}$  dem Ist-Wert entspricht (Formel 5.70). Da an potentiellen Standorten  $s^n$  zu Beginn des Betrachtungszeitraums keine Kernbelegschaft vorhanden ist, wird der entsprechende Wert  $fMAK_{s^n, t^{min}-1}$  durch Formel 5.71 auf 0 gesetzt.

$$fMAK_{s^v, t^{min}-1} \equiv mak0_{s^v} \quad \forall s^v \in S^v \quad (5.70)$$

$$fMAK_{s^n, t^{min}-1} \equiv 0 \quad \forall s^n \in S^n \quad (5.71)$$

### 5.2.5 Zielsystem für die Netzwerkkonfiguration

Das Zielsystem besteht nach Abschnitt 4.2.1.2 aus einer Kombination der Zielprogrammierung mit der  $\epsilon$ -constraint Methode. Gemäß der Modellbildung (vgl. Abbildung 5.4) wird erstere durch die Schritte Formulierung der Zielgrößen, Nutzenfunktionen sowie der Zielfunktion umgesetzt. Abschließend erfolgt für zweitere die Sicherstellung der Einhaltung von unteren und oberen Schranken je Zielgröße.

#### 5.2.5.1 Formulierung der Zielgrößen

**Einmalaufwand** Der EAW zur Realisierung einer Netzwerkalternative berechnet sich gemäß Formel 5.72 aus der Summe der in Abbildung 5.8 aufgeführten Kosten.

$$EAW = IKL + IKE + IKS + DKL + DKE + DKS + IKA + IKP + IKF \\ + IKG + DKP + IKV + IKR + PAE + PAR \quad (5.72)$$

Der EAW für Produktionslinien  $IKL$  ergibt sich aus der Summe des EAW für die im Betrachtungszeitraum vorgesehenen Linieninbetriebnahmen. Formal wird dies durch die Multiplikation des EAW  $cIVT_{ln}^l$  mit der Booleanvariable  $bLI_{ln}^{sop}$  erreicht. Diese Variable nimmt genau dann den Wert 1 an, wenn die Produktionslinie  $l^n$  in der Periode  $t$  in Betrieb genommen wird. Allen Kostenberechnungen gemein ist die Summierung der Kosten über alle Zeitperioden sowie relevanten Netzwerkelementen wie bspw. Produktionslinien. Zur besseren Lesbarkeit der nachfolgenden Ausführungen wird auf den expliziten Hinweis auf diese Summenbildungen verzichtet.

$$IKL = \sum_{l^n \in L^n} \sum_{t \in T} bLI_{ln}^{sop} \cdot cIVT_{ln}^l \quad (5.73)$$

Die Berechnung des EAW für die Inbetriebnahme von Technologien  $IKE$  und Standorten  $IKS$  erfolgt analog zu Produktionslinien (vgl. Formeln 5.74 und 5.75).

$$IKE = \sum_{(s,e) \in SE^n} \sum_{t \in T} bGET_{set}^{sop} \cdot cIVT_{se}^e \quad (5.74)$$

$$IKS = \sum_{s^n \in S^n} \sum_{t \in T} bSTT_{s^n t}^{sop} \cdot cIVT_{s^n}^s \quad (5.75)$$



## 5.2 Mathematisches Modell zur Netzwerkkonfiguration

Die Berechnung der Demontagekosten für Linien  $DKL$ , Technologien  $DKE$  und Standorte  $DKS$  erfolgt analog zur Ermittlung der EAWs für die Inbetriebnahme. Die Aufsummierung des Produkts aus der Booleanvariable, welche die Außerbetriebnahme einer Linie  $bLI_{lt}^{eop}$ , Technologie  $bGET_{et}^{eop}$  bzw. eines Standorts  $bSTT_{st}^{eop}$  anzeigt mit den Demontagekosten  $cDEM_l^l$ ,  $cDEM_e^e$  bzw.  $cDEM_s^s$  für Linien, Technologien und Standorte ergibt die jeweiligen Demontagekosten.

$$DKL = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} bLI_{lt}^{eop} \cdot cDEM_l^l \quad (5.76)$$

$$DKE = \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} bGET_{et}^{eop} \cdot cDEM_e^e \quad (5.77)$$

$$DKS = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} bSTT_{st}^{eop} \cdot cDEM_s^s \quad (5.78)$$

Die Ersatzinvestitionen  $IKA$  setzen sich aus den Kosten für erforderliche Maßnahmen für vorhandene und potentielle Linien zusammen. Ersatzinvestitionen für die vorhandene Linie  $l^v$  sind zu tätigen, falls sich diese in Periode  $t = trp_{l^v}^l$  in Betrieb befindet, d. h.  $bLIT_{l^v t}$  den Wert 1 hat. In Bezug auf die potentielle Linie  $l^n$  sind Ersatzinvestitionen zu berücksichtigen, falls die Booleanvariable  $bRP_{l^n t}$  in Periode  $t$  den Wert 1 annimmt. Die relevanten Kosten ergeben sich daher aus der Multiplikation der linienspezifischen Ersatzinvestitionen  $cLTC_{l^v}^{lv}$  bzw.  $cLTC_{l^n}^{ln}$  mit der jeweiligen Booleanvariable (vgl. Formel 5.79).

$$IKA = \sum_{l^v \in L^v} bLIT_{l^v trp_{l^v}^l} \cdot cLTC_{l^v}^{lv} + \sum_{l^n \in L^n} \sum_{t \in T} bRP_{l^n t} \cdot cLTC_{l^n}^{ln} \quad (5.79)$$

Die Booleanvariablen  $bBEP_{lpfgt}^{nsop}$ ,  $bBEF_{lft}^{sop}$  und  $bBEG_{lgt}^{sop}$  nehmen den Wert 1 an, wenn die Produktionslinie  $l$  in Periode  $t$  für das Produkt  $p$ , die Produktfamilie  $f$  bzw. die Produktgeneration  $g$  befähigt wird. Der EAW für die Befähigung von Linien ergibt sich dementsprechend aus der Aufsummierung des Produkts der jeweiligen Booleanvariable mit den zugehörigen EAWs  $cIVT_{lpfg}^{bep}$ ,  $cIVT_{lf}^{bef}$  bzw.  $cIVT_{lg}^{beg}$  über alle potentiellen Befähigungen über den gesamten Betrachtungszeitraum (vgl. Formeln 5.80 bis 5.82).

$$IKP = \sum_{(l,p,f,g) \in BEP^n} \sum_{t \in T} bBEP_{lpfgt}^{nsop} \cdot cIVT_{lpfg}^{bep} \quad (5.80)$$

$$IKG = \sum_{(l,g) \in BEG^n} \sum_{t \in T} bBEG_{lgt}^{sop} \cdot cIVT_{lg}^{beg} \quad (5.81)$$

$$IKF = \sum_{(l,f) \in BEF^n} \sum_{t \in T} bBEF_{lft}^{sop} \cdot cIVT_{lf}^{bef} \quad (5.82)$$

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

Die Demontagekosten für die Befähigung der Produktionslinie  $l$  für Produkt  $p$  ergeben sich analog zu den EAWs für Linienbefähigungen aus der Multiplikation der Booleanvariable  $bBEP_{lpfg}^{eop}$ , die den EOP der Befähigung anzeigt, mit den zugehörigen Demontagekosten für vorhandene Linienbefähigungen  $cDEM_{lpfg}^{bepv}$  bzw. potentielle Linienbefähigungen  $cDEM_{lpfg}^{bepn}$ .

$$DKP = \sum_{(l,p,f,g) \in BEP^n} \sum_{t \in T} bBEP_{lpfg}^{eop} \cdot cDEM_{lpfg}^{bepn} + \sum_{(l,p,f,g) \in BEP^v} \sum_{t \in T} bBEP_{lpfg}^{eop} \cdot cDEM_{lpfg}^{bepv} \quad (5.83)$$

Die Booleanvariable  $bCYTIN_{lk_1k_2t}$  nimmt den Wert 1 an, wenn die Kapazität der Produktionslinie  $l$  in Periode  $t$  von der Stufe  $k_1$  auf die Stufe  $k_2$  ausgebaut wird. Für Kapazitätserweiterungen stehen im Allgemeinen zahlreiche Stufen zur Verfügung. Um nicht für alle möglichen Kombinationen an Kapazitätsstufen Investitionskosten ermitteln zu müssen, werden den einzelnen Kapazitätsstufen  $k$  der Produktionslinien Investitionskosten  $cIVT_{lk}^{lk}$  zugewiesen. Die Gesamtinvestitionen für den Ausbau der Kapazität von Stufe  $k_1$  auf Stufe  $k_2$  ergeben sich aus der Summe der Investitionskosten für alle zwischen  $k_1$  und  $k_2$  liegenden Kapazitätsstufen, wie in Gleichung 5.84 dargestellt.

$$IKV = \sum_{(l,k_1,k_2) \in LKIN} \sum_{t \in T} bCYTIN_{lk_1k_2t} \cdot \sum_{(l,k) \in \{LK | k < k_1 \wedge k \geq k_2\}} cIVT_{lk}^{lk} \quad (5.84)$$

In analoger Weise zu Kapazitätserweiterungen werden mit Formel 5.85 die Kosten für den Rückbau von Kapazitäten ermittelt.

$$IKR = \sum_{(l,k_1,k_2) \in LKDE} \sum_{t \in T} bCYTDE_{lk_1k_2t} \cdot \sum_{(l,k) \in \{LK | k > k_1 \wedge k \leq k_2\}} cDEM_{lk}^{lk} \quad (5.85)$$

Im Allgemeinen sind für Maßnahmen, die mit Investitionskosten verbunden sind, Mittel für die Planung sowie die Inbetriebnahme erforderlich. Dieses sog. Planungs- und Anlaufbudget kann mit Ausnahme von Kapazitätserweiterungen und -reduzierungen unmittelbar den Investitionskosten zugeschlagen werden und findet als EAW Eingang in das Modell. Für Kapazitätsanpassungen werden die Investitionskosten verschiedener Kapazitätsstufen aufsummiert. Mit dem Ziel eine mehrfache Berücksichtigung von Planungs- und Anlaufkosten zu vermeiden, werden diese separat berücksichtigt. In gleicher Weise wie für Investitionskosten ergeben sich die Mittel für die Planung

## 5.2 Mathematisches Modell zur Netzwerkkonfiguration

und Inbetriebnahme der Kapazitätsstufe  $k_2$  auf Produktionslinie  $l$  gemäß den Formeln 5.86 und 5.87 durch die Multiplikation der entsprechenden Booleanvariablen mit den Kostentermen  $cPBAB_{lk_2}^{lkin}$  bzw.  $cPBAB_{lk_2}^{lkde}$ .

$$PAE = \sum_{(l,k_1,k_2) \in LKIN} \sum_{t \in T} bCYTIN_{lk_1k_2t} \cdot cPBAB_{lk_2}^{lkin} \quad (5.86)$$

$$PAR = \sum_{(l,k_1,k_2) > \in LKDE} \sum_{t \in T} bCYTDE_{lk_1k_2t} \cdot cPBAB_{lk_2}^{lkde} \quad (5.87)$$

Um zu vermeiden, dass der EAW für die Anpassung eines Produktionsnetzwerks oder andere Zielgrößen durch eine Reduzierung der Marktversorgung optimiert werden, wird mit Nebenbedingung 5.88 die Unterschreitung der Marktnachfrage  $fFV_{p^e t}^e$  begrenzt.

$$fFV_{p^e t}^e \leq \max f v_{p^e t} \quad \forall p^e \in P^e, t \in T \quad (5.88)$$

Die nicht erfüllte Marktnachfrage von Endprodukt  $p^e$  berechnet sich gemäß Formel 5.89 aus der Differenz der Nachfrage  $dem_{mp^e t}$  und der gelieferten Einheiten  $fTV_{lmp^e t}^m$ .

$$fFV_{p^e t}^e \equiv \sum_{m \in M} dem_{mp^e t} - \sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fTV_{lmp^e t}^m \quad \forall p^e \in P^e, t \in T \quad (5.89)$$

**Laufende Aufwendungen** Die LAWs aus dem Betrieb einer Produktionsnetzwerkalternative berechnen sich gemäß der nachfolgenden Formel 5.90. Die einzelnen Kostenelemente beziehen sich gemäß den Ausführungen aus Abschnitt 5.2.1.2 auf den Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf*.

$$\begin{aligned} LAW = & PFK + LOK + UAK + TKB + TKW + TKM + KTK \\ & + LAK + FKL + FKE + FKS + ZOK \quad (5.90) \end{aligned}$$

Die proportionalen Fertigungskosten ergeben sich aus der Multiplikation der Produktionsmenge  $fPV_{lpfgt}$  von Produkt  $p$  mit dem entsprechenden Kostensatz  $cPRO_{lpfgt}$  sowie der Aufsummierung über alle Produkte und Perioden.

$$PFK = \sum_{t \in T} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} cPRO_{lpfgt} \cdot fPV_{lpfgt} \quad (5.91)$$

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

In die Berechnung der Lohnkosten fließen neben der erforderlichen Arbeitszeit  $fAZH_{l dt}$  auf Produktionslinie  $l$  in Schichtmodell  $d$  und dem kapazitätsstufenabhängigen Liniestundensatz  $cLKH_{lkt}$  die Arbeitszeitmodellkosten  $cAZM_{l dt}$  ein. Die Lohnkosten ergeben sich als Produkt dieser drei Größen. Mit der zusätzlichen Berücksichtigung der Boolevariable  $bCYT_{lkt}$  in Formel 5.92 wird sichergestellt, dass Lohnkosten nur in der Kapazitätsstufe anfallen, die sich in Betrieb befindet.

$$LOK = \sum_{t \in T} \sum_{(l,d,k) \in DE} fAZH_{l dt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot cLKH_{lkt} \cdot cAZM_{l dt} \quad (5.92)$$

Die Kosten für nicht ausgelastete Mitarbeiter berechnen sich als Summe der relevanten standort- und periodenspezifischen Kosten  $fMARE_{st}$  (vgl. Formel 5.93).

$$UAK = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} fMARE_{st} \quad (5.93)$$

Die Berechnung der Variable  $fMARE_{st}$  erfolgt durch Nebenbedingung 5.94. Diese gewährleistet, dass die Summe der Kosten für nicht ausgelastete Kernmitarbeiter  $fMARE_{st}$  und die aufgrund der Produktion anfallenden Lohnkosten mindestens so hoch ist, wie die Personalkosten zur Bezahlung der Kernmitarbeiter.

$$\sum_{(s,e,l) \in PNS(l,d,k) \in DE} \sum_{t \in T} fAZH_{l dt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot cLKH_{lkt} + fMARE_{st} \geq fMAK_{st} \cdot cMA_{st} \quad \forall s \in S, t \in T \quad (5.94)$$

Für die Berechnung der Transportkosten für Kaufteile, Komponenten und Endprodukte wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Transportmenge und den anfallenden Kosten unterstellt. Dementsprechend resultieren die Transportkosten aus der Multiplikation der Transportmengen  $fTVB_{blp^k t}^b$ ,  $fTV_{l_1 l_2 pt}^f$  bzw.  $fTVM_{lmpt}^m$  mit den Transportkostensätzen  $cTVB_{blp^k t}$ ,  $cTVF_{l_1 l_2 pt}$  bzw.  $cTVM_{lmpt}$  (vgl. Formeln 5.95 bis 5.97).

$$TKK = \sum_{t \in T} \sum_{(b,l,p^k) \in ROU^b} cTVB_{blp^k t} \cdot fTV_{blp^k t}^b \quad (5.95)$$

$$TKW = \sum_{t \in T} \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} cTVF_{l_1 l_2 pt} \cdot fTV_{l_1 l_2 pt}^f \quad (5.96)$$

$$TKM = \sum_{t \in T} \sum_{(l,m,p) \in ROU^m} cTVM_{lmpt} \cdot fTVM_{lmpt}^m \quad (5.97)$$

## 5.2 Mathematisches Modell zur Netzwerkkonfiguration

In gleicher Weise wie für Transportkosten wird auch für Kaufteile ein linearer Zusammenhang zwischen den Kosten und der Bezugsmenge unterstellt. In Konsequenz ist die Abbildung von Skaleneffekten durch die Konzentrationen von Kaufteilen auf wenige Lieferanten im Modell nicht möglich. Dies ist der Entscheidung geschuldet, keine einzelnen Lieferanten, sondern lediglich Beschaffungsmärkte zu betrachten. Die Kosten für Kaufteile  $KTK$  ergeben sich folglich aus dem Produkt der beschaffungsmarktspezifischen Kosten  $cKT_{bp^kt}$  mit der Bezugsmenge  $fTV_{blp^kt}^b$  (vgl. Formel 5.98).

$$KTK = \sum_{t \in T} \sum_{(b,l,p^k) \in ROU^b} cKT_{bp^kt} \cdot fTV_{blp^kt}^b \quad (5.98)$$

Zum Ausgleich von zeitlich begrenzten Kapazitätsunterschieden zwischen einzelnen Wertschöpfungsstufen ist die Vorproduktion und Einlagerung von Produkten und Komponenten vorgesehen. Die mit der Lagerung einer Einheit von Produkt  $p$  nach Produktionslinie  $l$  für eine Zeitperiode einhergehenden Kosten, wie bspw. die Konservierung von Bauteilen und die erforderlichen Verpackungskosten, werden im Kostensatz  $cINV_{lpfgt}$  zusammengefasst. Die gesamten Lagerkosten resultieren aus der Multiplikation dieser Kosten mit der Lagermenge (vgl. Formel 5.99).

$$LAK = \sum_{t \in T} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} cINV_{lpfgt} \cdot fINV_{lpfgt} \quad (5.99)$$

Für jeden Standort, für jede Technologie und für jede Produktionslinie, die sich in einer Periode in Betrieb befindet, fallen Fixkosten an. Der Fixkostensatz für Standorte  $cFIX_{st}^s$  und Technologien  $cFIX_{set}^e$  wird für jede Periode fest vorgegeben. Die resultierenden Kosten ergeben sich gemäß den Formeln 5.101 und 5.102 aus der Multiplikation der entsprechenden Booleanvariable  $bSTT_{st}$  bzw.  $bGET_{set}$  mit dem zugehörigen Kostensatz. Im Gegensatz dazu hängen die Fixkosten für den Betrieb von Produktionslinien  $FKL$  von der gewählten Kapazitätsstufe ab. Dementsprechend erfolgt die Berechnung der Fixkosten durch die Multiplikation des periodenspezifischen Fixkostenfaktors  $fFIX_{lt}^l$  mit dem Fixkostensatz  $cFIX_{lt}^l$  (vgl. Formel 5.100).

$$FKL = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} fFIX_{lt}^l \cdot cFIX_{lt}^l \quad (5.100)$$

$$FKE = \sum_{(s,e) \in SE} \sum_{t \in T} bGET_{set} \cdot cFIX_{set}^e \quad (5.101)$$

$$FKS = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} bSTT_{st} \cdot cFIX_{st}^s \quad (5.102)$$

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

Die Berechnung des periodenspezifischen Fixkostenfaktors für Produktionslinien  $fFIX_{lt}^l$  erfolgt durch Formel 5.103. Hierdurch wird der Variable  $fFIX_{lt}^l$  in der Periode  $t$  der kapazitätsstufen- und linienspezifische Fixkostenfaktor  $cFIX_{lk}^{cyl}$  zugewiesen, wenn die Linie  $l$  in der Periode  $t$  in Betrieb ist und die Schichtstufe  $k$  aktiviert ist.

$$fFIX_{lt}^l \equiv \sum_{(l,k) \in LK} (bCYT_{lkt} \cdot cFIX_{lk}^{cyl}) \cdot bLIT_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.103)$$

Gemäß Abschnitt 5.1.4.2 beinhaltet das Modell eine vereinfachte Abbildung von Zollkosten. Für den Transport von Produkten  $p$  von der Zollregion  $z_1$  in die Zollregion  $z_2$  werden die anfallenden Zollkosten  $cTAR_{z_1 z_2 pt}$  berücksichtigt (vgl. Formel 5.104).

$$ZOK = \sum_{(z_1, z_2, p) \in ROU^z} \sum_{t \in T} cTAR_{z_1 z_2 pt} \cdot fTV_{z_1 z_2 pt}^z \quad (5.104)$$

Die Materialflüsse  $fTV_{z_1 z_2 pt}^z$  von Zollregion  $z_1$  in  $z_2$  für Kaufteile, Komponenten und Endprodukte ergeben sich gemäß Restriktion 5.105 durch die Aufsummierung des Transportvolumens auf allen zollregionüberschreitenden Transportkanten.

$$\begin{aligned} fTV_{z_1 z_2 pt}^z \equiv & \sum_{(l, m, p^e) \in \{ROU^m \mid (s, e, l, z_1) \in PNSZ \wedge (m, z_2) \in MZ\}} fTV_{lm p^e t}^m \\ & + \sum_{(l, m, p^e) \in \{ROU^f \mid (s_1, e_1, l_1, z_1) \in PNSZ \wedge (s_2, e_2, l_2, z_2) \in PNSZ\}} fTV_{l_1 l_2 p^e t}^f \\ & + \sum_{(l, m, p^k) \in \{ROU^b \mid (b, z_1) \in BZ \wedge (s, e, l, z_2) \in PNSZ\}} fTV_{bl p^k t}^b \\ & \forall (z_1, z_2, p) \in ROU^z, t \in T \end{aligned} \quad (5.105)$$

**Kapitalwert** Der Kapitalwert ergibt sich aus der Summe der erzielten Umsätze und des Restwerts der Produktionsanlagen am Ende des Betrachtungszeitraums abzüglich der Summe aus EAWs und LAWs (vgl. Abschnitt 5.1.4.2). Dabei sind alle Einzahlungs- und Auszahlungsströme auf den Beginn des Betrachtungszeitraums abzuzinsen. Zur Kennzeichnung der Abzinsung werden die entsprechenden Kosten mit  $XXX^{ab}$  bezeichnet. Der Kapitalwert berechnet sich damit nach folgender Formel 5.106.

$$KW = UMS^{ab} + REW^{ab} - (EAW^{ab} + LAW^{ab}) \quad (5.106)$$

Die erzielten Umsätze  $UMS^{ab}$  aus dem Verkauf von Endprodukten ergeben sich aus der Summe des Produkts der in den einzelnen Perioden an die Märkte  $m$  gelieferten Endprodukte  $fTV_{lmp^t}^m$  mit den Erlösen je Endprodukt  $cRET_{pmt}$ . Die Abzinsung des eingehenden Zahlungsstromes unter Berücksichtigung des Zinssatzes  $z$  erfolgt anhand der Division durch  $(1+z)^{t-1}$  (vgl. Formel 5.107).

$$UMS^{ab} = \sum_{t \in T} \sum_{(l,m,p) \in ROU^m} cRET_{pmt} \cdot fTV_{lmp^t}^m / (1+z)^{t-1} \quad (5.107)$$

Der auf den Beginn des Betrachtungszeitraums abgezinst Restwert  $REW^{ab}$  berechnet sich nach Formel 5.108 aus der Summe der Restwerte  $cRW_{ln^t}$  der potentiellen Produktionslinien  $l^n$ , die sich in der letzten Zeitperiode  $t^{max}$  in Betrieb befinden, d. h.  $bLIT_{ln^t}$  den Wert 1 hat.

$$REW^{ab} = \sum_{l^n \in L^n} bLIT_{ln^t} \cdot cRW_{ln^t} / (1+z)^{t^{max}-1} \quad (5.108)$$

Die Größen  $EAW^{ab}$  bzw.  $LAW^{ab}$  berechnen sich anhand der bereits vorgestellten Formeln, die um die Abzinsung erweitert werden. Stellvertretend wird diese Vorgehensweise für die proportionalen Fertigungskosten  $PFK$  veranschaulicht (vgl. Formel 5.109). Die vollständige Formel zur Berechnung des Kapitalwerts findet sich in Anhang A.4.

$$PFK^{ab} = \sum_{t \in T} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} cPRO_{lpfgt} \cdot fPV_{lpfgt} / (1+z)^{t-1} \quad (5.109)$$

**Bestellmengenflexibilität** Gemäß Abschnitt 5.1.4.2 bildet der periodenspezifische Faktor  $fFL_t$ , um den die Marktversorgung für alle Produkte mit einem Bedarf größer 0 erhöht werden kann, das Maß für die Bestellmengenflexibilität. Die Ermittlung des Faktors erfolgt im Betriebspunkt *Produktion bei maximaler Ausbringung*. Das Transportvolumen in Absatzmärkte setzt sich in diesem Betriebspunkt aus dem Basisvolumen  $fBTV_{lmp^t}^m$  und dem Flexibilitätsvolumen  $fFLTV_{lmp^t}^m$  zusammen. Ersteres beschreibt die Marktversorgung mit Produkten gemäß dem prognostiziertem Marktbedarf und zweiteres stellt die über diesen Bedarf hinausgehende mögliche Marktversorgung dar. Der Faktor  $fFL_t$  berechnet sich damit aus dem Quotienten des über den gesamten Marktbedarf hinaus lieferbaren Volumens für Produkt  $p^e$   $fFLTV_{lmp^t}^m$  und dem Marktbedarf  $dem_{p^t}^p$  (vgl. Formel 5.110). Gleichzeitig wird mit Nebenbedingung 5.110 sichergestellt, dass dieser Faktor für alle Produkte mit Bedarf größer 0 den gleichen Wert annimmt.

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

$$fFL_t \equiv \frac{\sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fFLTV_{lmp^e t}^m}{dem_{p^e t}^p} \quad \forall t \in T, p^e \in \{P^e \mid dem_{p^e t}^p > 0\} \quad (5.110)$$

Für alle Endprodukte  $p^e$  ohne Marktnachfrage in Periode  $t$  muss gewährleistet werden, dass sie keinen Beitrag zur Bestellmengenflexibilität leisten. Der Faktor  $fFLTV_{lmp^e t}^m$  muss daher, wie in Formel 5.111 ausgedrückt, den Wert 0 annehmen.

$$\sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fFLTV_{lmp^e t}^m \equiv 0 \quad \forall t \in T, p^e \in \{P^e \mid dem_{p^e t}^p \equiv 0\} \quad (5.111)$$

Da die Bewertung der Bestellmengenflexibilität einen Vergleich zwischen den Betriebspunkten *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf* und *Produktion bei maximaler Ausbringung* darstellt, müssen diese verknüpft werden. Dies erfolgt durch die Kopplung der Marktversorgung in beiden Betriebspunkten. Mit Nebenbedingung 5.112 wird folglich gewährleistet, dass das Basistransportvolumen in Märkte  $fBTV_{lmp^e t}^m$  im Betriebspunkt *Produktion bei maximaler Ausbringung* dem Transportvolumen in Märkte  $fTV_{lmp^e t}^m$  im Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf* entspricht.

$$\sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fTV_{lmp^e t}^m \equiv \sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fBTV_{lmp^e t}^m \quad \forall m \in M, p^e \in P^e, t \in T \quad (5.112)$$

Bei der gewählten Modellierung kann der Fall eintreten, dass das Flexibilitätsvolumen  $fFLTV_{lmp^e t}^m$  auf Kosten des Basisvolumens  $fBTV_{lmp^e t}^m$  erhöht wird. Dies würde dem nicht realitätskonformen Fall entsprechen, dass der prognostizierte Marktbedarf nicht gedeckt wird und dadurch freie Kapazität im Produktionsnetzwerk für über den Bedarf hinaus gehende Marktversorgung erzeugt wird. Mit Nebenbedingung 5.113 wird folglich die Forderung implementiert, dass  $fFLTV_{lmp^e t}^m$  nur dann einen Wert größer 0 annehmen kann, falls der prognostizierte Marktbedarf vollständig gedeckt wird. Hierzu wird die Boolevariable  $bFV_{p^e t}$  eingesetzt, die gemäß Ungleichung 5.114 den Wert 1 annimmt, falls der Marktbedarf von Produkt  $p^e$  in Periode  $t$  nicht gedeckt werden kann.

$$\sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fFLTV_{lmp^e t}^m \leq (1 - bFV_{p^e t}) \cdot BigM \quad \forall t \in T, p^e \in P^e \quad (5.113)$$

$$\sum_{m \in M} dem_{mp^e t} - \sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fTV_{lmp^e t}^m \leq bFV_{p^e t} \cdot BigM \quad \forall p^e \in P^e, t \in T \quad (5.114)$$



**Liefargeschwindigkeit** Die Liefargeschwindigkeit  $LG$  setzt sich aus den Liefargeschwindigkeiten für *Kaufteile*, *Komponenten* und *Endprodukten* zusammen (vgl. Formel 5.115). Sie wird gemäß Abschnitt 5.2.1.2 im Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf* ermittelt. Die durchschnittliche Liefargeschwindigkeit berechnet sich für die drei Elemente jeweils aus zwei Summanden. Der erste beschreibt die Lieferzeit eines Kaufteils, einer Komponente bzw. eines Endprodukts. Diese berechnet sich aus dem Produkt des einer Relation zugewiesenen Transportvolumens  $fTV$  und der zugehörigen Transportzeit  $lz$  dividiert durch den gesamten Bedarf des jeweiligen Kaufteils, Endprodukts bzw. der Komponente  $dem_{p_t}^p$ . Mit dem zweiten Summanden wird vermieden, dass eine unvollständige Abdeckung des Marktbedarfs positive Auswirkungen auf die Zielgröße Liefargeschwindigkeit hat. Für jede nachgefragte aber nicht erfüllte Einheit eines Kaufteils, einer Komponente oder eines Endprodukts  $fFV$  wird die Lieferzeit analog zum Transportvolumen berechnet. Als Lieferzeit wird das um einen Tag erhöhte Maximum der Lieferzeit aller relevanten Transportrelationen herangezogen.

$$\begin{aligned}
 LG = & \frac{\sum_{(b,l,p^k) \in ROU^b} \sum_{t \in T} fTV_{blp^k}^b \cdot lz_{bl}^b}{\sum_{p^k \in P^k} \sum_{t \in T} dem_{p^k t}^p} + \frac{\sum_{p^k \in P^k} \sum_{t \in T} fFV_{p^k t} \cdot \left( \max_{(bl) \in EDG^b} lz_{bl}^b + 1 \right)}{\sum_{p^k \in P^k} \sum_{t \in T} dem_{p^k t}^p} \\
 & + \frac{\sum_{(l_1, l_2, p^c) \in ROU^f} \sum_{t \in T} fTV_{l_1 l_2 p^c}^f \cdot lz_{l_1 l_2}^f}{\sum_{p^c \in P^c} \sum_{t \in T} dem_{p^c t}^p} + \frac{\sum_{p^c \in P^c} \sum_{t \in T} fFV_{p^c t} \cdot \left( \max_{(l_1, l_2) \in EDG^f} lz_{l_1 l_2}^f + 1 \right)}{\sum_{p^c \in P^c} \sum_{t \in T} dem_{p^c t}^p} \\
 & + \frac{\sum_{(l, m, p^e) \in ROU^m} \sum_{t \in T} fTV_{l m p^e}^m \cdot lz_{l m}^m}{\sum_{p^e \in P^e} \sum_{t \in T} dem_{p^e t}^p} + \frac{\sum_{p^e \in P^e} \sum_{t \in T} fFV_{p^e t} \cdot \left( \max_{(l, m) \in EDG^m} lz_{l m}^m + 1 \right)}{\sum_{p^e \in P^e} \sum_{t \in T} dem_{p^e t}^p}
 \end{aligned} \tag{5.115}$$

Das Fehlvolumen für Komponenten  $p^c$  leitet sich gemäß Formel 5.116 aus dem unerfüllten Marktbedarf  $fFV_{p^c t}^{p^e}$  durch Multiplikation mit dem zugehörigen Materialbedarfskoeffizienten ab.

$$fFV_{p_2 t}^{p^c} \equiv \sum_{(p_1, p_2) \in BOF} fFV_{p_1 t} \cdot mbk_{p_1 p_2}^p \quad \forall p_2 \in P^c, t \in T \tag{5.116}$$

In analoger Weise wie sich das Fehlvolumen für Komponenten aus den nicht erfüllten Marktbedarfen für Endprodukte ableitet, leitet sich das Fehlvolumen für Kaufteile

## 5 Multikriterielle Optimierung globaler Produktionsnetzwerke

$fFV_{p^k t}^{p^k}$ , wie in Formel 5.117 dargestellt, aus dem Fehlvolumen für Endprodukte und Komponenten ab.

$$fFV_{p^k t}^{p^k} \equiv \sum_{(p,p^k) \in BOM} fFV_{pt} \cdot mbk_{pp^k}^m \quad \forall p^k \in P^k, t \in T \quad (5.117)$$

**Lieferzuverlässigkeit** Die Lieferzuverlässigkeit  $fLU_{pt}$  für Produkt  $p$  in Periode  $t$  resultiert gemäß den Ausführungen aus Abschnitt 5.1.4.2 aus der Anzahl der Linienbefähigungen für das Produkt  $p$  in Periode  $t$  sowie der Lagermenge für das Produkt  $p$  am Ende der Periode  $t-1$ . Je größer der Wert  $fLU_{pt}$ , desto höher ist die Lieferzuverlässigkeit. Ein Wert in Höhe von 1 entspricht einer im Planstand reibungsfreien jedoch nicht abgesicherten Marktversorgung. Mit dem ersten Summanden aus Formel 5.118 wird der Beitrag der Linienbefähigungen zur Lieferzuverlässigkeit berechnet. Dieser steigt mit Anzahl der Befähigungen und sinkt linear mit den relevanten Kapazitätsverlusten der Produktionslinien. Der Beitrag, den die Befähigung der Produktionslinie  $l$  für Produkt  $p$  unter Berücksichtigung der Kapazitätsverluste  $fLOSS_{lt}$  zur Herstellung von Produkt  $p$  leisten kann, nimmt den Wert 0 an, falls die Befähigung in Periode  $t$  nicht in Betrieb ist, d. h.  $bBEP_{lpfgt} = 0$  gilt, oder die Verluste  $fLOSS_{lt}$  dem verfügbaren Zeiteanteil  $tsh_{lt}$  entsprechen. Mit dem zweiten Summanden wird der Beitrag des Lagerbestandes zur Lieferzuverlässigkeit ermittelt. Entspricht der Bestand für Produkt  $p$  am Ende der Periode  $t-1$  dem Bedarf  $dem_{pt}^p$  in Periode  $t$  wird dieser mit 1 bewertet.

$$fLU_{pt} \equiv \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} (bBEP_{lpfgt} - bBEP_{lpfgt} \cdot (tsh_{lt} - fLOSS_{lt})) + \frac{\sum_{(l,p,f,g) \in BEP} fINV_{lpfgt-1}}{dem_{pt}^p} \quad \forall t \in T, p \in \{P \mid dem_{pt}^p > 0\} \quad (5.118)$$

**Remanenzrisiko** Als Metrik für das Remanenzrisiko dient gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.1.4.2 der Anteil des Marktbedarfs, der erforderlich ist, damit eine vorgegebene Höhe der Kosten pro Einheit  $cKEh_p^e$  nicht überschritten wird. Wie in Formel 5.119 ausgedrückt, muss das Produkt aus der Menge der abgesetzten Endprodukte  $fRTV_{lmpt}^m$  und den vorgegebenen Kosten pro Einheit  $cKEh_p^e$  demnach mindestens so groß sein wie die Summe aus einmalig und laufend anfallenden Aufwänden.

$$\sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} \sum_{t \in T} fRTV_{lmp^e t}^m \cdot cKEh_p^e \geq EAW + LAW^r \quad (5.119)$$

Während der Einmalaufwand  $EAW$  unabhängig vom Betriebspunkt ist, müssen die laufenden Aufwände für die Berechnung des Remanenzrisikos  $LAW^r$  im Betriebspunkt *Produktion gemäß Remanenzfall* ermittelt werden. Die in Formel 5.120 dargestellte Berechnung erfolgt analog zum Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf*. Die Formeln für die Berechnung der einzelnen Kostenelemente können im Anhang A.5 nachgeschlagen werden.

$$\begin{aligned} LAW^r = & PFK^r + LOK^r + UAK^r + TKB^r + TKW^r + TKM^r + KTK^r \\ & + LAK^r + FKL^r + FKE^r + FKS^r + ZOK^r \end{aligned} \quad (5.120)$$

Gemäß Abschnitt 5.1.4.2 ist die Annahme zu implementieren, dass der rückläufige Marktbedarf  $fRTV_{lmp^e t}^m$  in jeder Periode den gleichen Produktmix aufweist, wie der prognostizierte Marktbedarf. Mit Nebenbedingung 5.121 wird dies umgesetzt, in dem in jeder Periode für jedes Endprodukt  $p^e$  mit Bedarf größer 0 gefordert wird, dass das Verhältnis aus den im Remanenzfall abgesetzten Einheiten  $fRTV_{lmp^e t}^m$  und dem prognostizierten Marktbedarf  $dem_{p^e t}^p$  dem periodenspezifischen Wert  $fRE_t$  entspricht.

$$\frac{\sum_{(l,m,p^e) \in ROU^m} fRTV_{lmp^e t}^m}{dem_{p^e t}^p} \equiv fRE_t \quad \forall t \in T, p^e \in \left\{ p^e \mid dem_{p^e t}^p > 0 \right\} \quad (5.121)$$

### 5.2.5.2 Formulierung der Nutzenfunktionen

Für die Anwendung des Verfahrens der Zielprogrammierung ist eine Normierung der Zielgrößen erforderlich. Durch den Einsatz von Ober- und Untergrenzen für die einzelnen Zielgrößen werden die zugehörigen Metriken anhand der Formeln 5.122 bis 5.128 auf dem Intervall  $[0, 1]$  normiert. Dies erfolgt derart, dass zu minimierende Zielgrößen den Wert 1 annehmen, wenn die Untergrenze erreicht wird und den Wert 0 wenn die Obergrenze erreicht wird. Zu maximierende Zielgrößen weisen gegensätzliches Verhalten auf. Für die periodenspezifischen Zielgrößen Bestellmengenflexibilität und Remanenzrisiko ist der Nutzwert für jede Periode zu bestimmen. Die Zielgröße Lieferzuverlässigkeit weist neben der Periodenabhängigkeit zudem einen Produktbezug auf. Der Nutzwert ist dementsprechend für jedes Produkt in jeder Periode zu bestimmen.

$$NU^{EAW} = \frac{EAW^{max} - EAW}{EAW^{max} - EAW^{min}} \quad (5.122)$$

$$NU^{LAW} = \frac{LAW^{max} - LAW}{LAW^{max} - LAW^{min}} \quad (5.123)$$

$$NU^{KW} = \frac{KW - KW^{min}}{KW^{max} - KW^{min}} \quad (5.124)$$

$$NU_t^{FL} = \frac{fFL_t - FL^{min}}{FL^{max} - FL^{min}} \quad \forall t \in T \quad (5.125)$$

$$NU^{LG} = \frac{LG^{max} - LG}{LG^{max} - LG^{min}} \quad (5.126)$$

$$NU_{pt}^{LU} = \frac{fLU_{pt} - LU^{min}}{LU^{max} - LU^{min}} \quad \forall p \in \{P \mid dem_{pt}^p > 0\}, t \in T \quad (5.127)$$

$$NU_i^{RE} = \frac{RE^{max} - fRE_i}{RE^{max} - RE^{min}} \quad \forall t \in T \quad (5.128)$$

### 5.2.5.3 Formulierung der Zielfunktion

Die Berechnung der Zielfunktion basiert auf den Abweichungen des Nutzwerts der einzelnen Zielgrößen  $\delta^{XX}$  von vorgegebenen Zielwerten  $ZW^{XX}$ . Diese werden gemäß der in Abschnitt 2.2.2.4 beschriebenen Vorgehensweise mit den Formeln 5.129 bis 5.135 bestimmt. Die Berechnung der Zielgrößen Flexibilität und Remanenzrisiko erfolgt periodenspezifisch. Für die Zielgröße Lieferzuverlässigkeit weist die Nebenbedingung zusätzlich einen Produktbezug auf.

$$NU^{LAW} + \delta^{LAW+} - \delta^{LAW-} \equiv ZW^{LAW} \quad (5.129)$$

$$NU^{EAW} + \delta^{EAW+} - \delta^{EAW-} \equiv ZW^{EAW} \quad (5.130)$$

$$NU^{KW} + \delta^{KW+} - \delta^{KW-} \equiv ZW^{KW} \quad (5.131)$$

$$NU_t^{FL} + \delta_t^{FL+} - \delta_t^{FL-} \equiv ZW_t^{FL} \quad \forall t \in T \quad (5.132)$$

$$NU^{LG} + \delta^{LG+} - \delta^{LG-} \equiv ZW^{LG} \quad (5.133)$$

$$NU_{pt}^{LU} + \delta_{pt}^{LU+} - \delta_{pt}^{LU-} \equiv ZW_{pt}^{LU} \quad \forall t \in T, p \in \{P \mid dem_{pt}^p > 0\} \quad (5.134)$$

$$NU_i^{RE} + \delta_i^{RE+} - \delta_i^{RE-} \equiv ZW_i^{RE} \quad \forall t \in T \quad (5.135)$$

Die Zielfunktion (Formel 5.136) des mathematischen Modells besteht in der Minimierung der Summe der gewichteten Abweichungen der einzelnen Zielgrößen von den vorgegebenen Zielwerten. Für die periodenspezifischen Größen Bestellmengenflexi-

bilität und Remanenzrisiko muss hierfür der Mittelwert der Abweichungen über alle Zeitperioden ermittelt werden. Im Hinblick auf die Lieferzuverlässigkeit ist darüber hinaus der Produktbezug zu berücksichtigen.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \left( \delta^{EAW+} + \delta^{EAW-} \right) \cdot GW^{EAW} + \left( \delta^{LAW+} + \delta^{LAW-} \right) \cdot GW^{LAW} \\
 & + \left( \delta^{KW+} + \delta^{KW-} \right) \cdot GW^{KW} + \frac{\sum_{t \in T} \delta_t^{FL+} + \delta_t^{FL-}}{t^{max}} \cdot GW^{FL} \\
 & + \left( \delta^{LG+} + \delta^{LG-} \right) \cdot GW^{LG} + \frac{\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \delta_{pt}^{LU+} + \delta_{pt}^{LU-}}{t^{max} \cdot |P|} \cdot GW^{LU} \\
 & + \frac{\sum_{t \in T} \left( \delta_t^{RE+} + \delta_t^{RE-} \right)}{t^{max}} \cdot GW^{RE}
 \end{aligned} \tag{5.136}$$

### 5.2.5.4 Einhaltung unterer und oberer Schranken

Um sehr große Abweichungen einzelner Zielgrößen von den gewünschten Zielwerten zu vermeiden, werden die Nebenbedingungen 5.137 bis 5.143 eingeführt. Diese stellen sicher, dass für zu maximierende bzw. minimierende Zielgrößen eine untere bzw. obere Schranke eingehalten wird. Für die Größen Bestellmengenflexibilität, Remanenzrisiko und Lieferzuverlässigkeit weisen die Schranken einen Periodenbezug auf.

$$KW \geq KW^{uS} \tag{5.137}$$

$$EAW \leq EAW^{oS} \tag{5.138}$$

$$LAW \leq LAW^{oS} \tag{5.139}$$

$$LG \leq LG^{oS} \tag{5.140}$$

$$fFL_t \geq FL^{uS} \quad \forall t \in T \tag{5.141}$$

$$fRE_t \leq RE^{oS} \quad \forall t \in T \tag{5.142}$$

$$\sum_{p \in P} fLU_{pt} \geq LU^{uS} \quad \forall t \in T \tag{5.143}$$

## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

Die Methode zur Konfiguration GPN besteht gemäß den Ausführungen aus Abschnitt 4.2.2 aus einem Prozessmodell mit der inhaltlichen Beschreibung der durchzuführenden Schritte sowie einem Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums der Netzwerkkonfiguration.

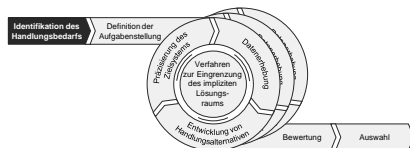
### 6.1 Prozessmodell zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

Das in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte Prozessmodell zur Konfiguration GPN umfasst sieben Schritte. Die einzelnen Phasen werden im Folgenden in sequentieller Anordnung erläutert. Zur Vereinfachung der inhaltlichen Zuordnung der Ausführungen erfolgt zu Beginn eines jeden Abschnitts die graphische Einordnung in die Visualisierung der Methode zur Konfiguration GPN (vgl. Abbildung 4.2).

#### 6.1.1 Identifikation des Handlungsbedarfs

Die Notwendigkeit zur Anpassung eines Produktionsnetzwerks kann neben offensichtlichen Gründen, wie bspw. der erforderlichen Integration eines neuen Produkts, auch aus einer unzureichenden Abstimmung des Systems Netzwerk auf

die Anforderungen und gebotenen Möglichkeiten der Systemumwelt resultieren. Der Zustand mangelnder Passung kann das Ergebnis einer Veränderung des Systems Netzwerk oder der Netzwerkkumgebung sein. Die Identifikation des Handlungsbedarfs lässt sich dementsprechend in zwei Teilaufgaben untergliedern. Erstens in die nach innen gerichtete Überwachung der Leistungsparameter des Produktionsnetzwerks und zweitens in die nach außen gerichtete Beobachtung der Systemumgebung.



### 6.1.1.1 Kennzahlenbasierte Identifikation von Handlungsbedarfen

Bei der nach innen gerichteten Überwachung der Leistungsparameter des Produktionsnetzwerks ist die Prädiktion der Kennzahlen unter Zugrundelegung des aktuellen Netzwerkplanstandes sowie der prognostizierten Entwicklungen hinsichtlich relevanter Einflussgrößen vorzunehmen. Die kontinuierliche Beobachtung der sog. Key Performance Indicators (KPIs) in Verbindung mit dem Abgleich mit festgelegten Eingriffsgrenzen zeigt an, wann Maßnahmen im Netzwerk erforderlich werden. Hierfür bietet sich der Einsatz eines sog. Performance Measurement Systems (PMS) an. Ein für diesen Zweck geeignetes PMS wird in SAGER et al. (2016) vorgestellt.

Dieses PMS für GPN basiert auf dem von J. WEBER et al. (1995) für den Bereich der Logistik entwickelten Konzept der selektiven Kennzahlen, das nicht als konkretes Kennzahlensystem sondern als Konstruktionsmethodik für PMS konzipiert wurde (J. WEBER 1997, S. 451). Dieser Umstand erlaubt die Methodenübertragung auf andere Bereiche sowie das Gesamtunternehmen (SANDT 2004, S. 48). Die Anwendung des von LELKE (2005, S. 49) als sehr flexibel eingestuften Konzepts auf dem Gebiet GPN ist folglich ohne das Vornehmen tiefgreifender Anpassungen möglich.

Das Konzept der selektiven Kennzahlen besteht aus drei Schritten. Den Ausgangspunkt bildet die Ableitung von Kennzahlen aus der Unternehmensstrategie. Im zweiten Schritt werden aus koordinationsrelevanten Merkmalen des Leistungssystems Kennzahlen abgeleitet. Dies dient der Überprüfung der Realisierbarkeit der strategischen Ziele. Abschließend werden die dualistisch abgeleiteten Kennzahlen zusammengeführt. Die unternehmensindividuelle Erarbeitung eines PMS folgt dieser Vorgehensweise.

**Ableitung strategischer Kennzahlen** Die Ableitung von strategischen Kennzahlen ist in Abschnitt 5.1.4 enthalten. Da diese als Zielgrößen in das Optimierungsmodell eingehen, ist die Beschreibung konkreter Metriken erforderlich. Diese aus dem Einsatz eines Optimierungsmodells resultierende Notwendigkeit führt zu einer strukturellen Abweichung vom Konzept der selektiven Kennzahlen. Die Vorgehensweise zur Identifikation strategischer Zielgrößen stellt im Rahmen der Gesamtmethode keine unternehmensindividuell anzuwendende Generierungsmethodik dar, sondern mündet in einer Sammlung konkreter Kennzahlen. Durch die axiomatische Zielgrößenableitung sowie dem Einsatz des Verfahrens der Zielprogrammierung werden die Auswirkungen dieser Limitation auf die unternehmensindividuelle Anwendbarkeit der Methode minimiert.

**Ableitung operativer Kennzahlen** Konzeptkonform ist für die Ableitung operativer Kenngrößen eine Generierungsmethodik einsetzbar, die eine unternehmens- und kontextindividuelle Entwicklung relevanter Größen erlaubt. Für die erforderliche Analyse des Leistungssystems setzt J. WEBER (1997, S. 443-447) Konzepte aus der Systemtheorie ein. Nach PAPE (1990, S. 144) unterteilt J. WEBER (1997, S. 443) das Leistungssystem in eine Mehrzahl an Elementen, die miteinander in Beziehung stehen. Der Systemzustand wird durch die Struktur- und Verhaltenseigenschaften der Elemente und Beziehungen bestimmt. Zur Zustandsbeschreibung eines Systems greift J. WEBER (1997) in Anlehnung an DÖRNER (1989, S. 59-63) und FUCHS-WEGNER (1974, S. 70) auf die Merkmale *Komplexität* und *Dynamik* zurück. Die Allgemeingültigkeit der Systemtheorie erlaubt die unmittelbare Übertragung dieser Vorgehensweise auf GPN. Gemäß Abschnitt 5.1.1 stellen in diesem Kontext Produktionslinien, Beschaffungs- und Absatzmärkte die Elemente dar und Transportrelationen die Beziehungen.

J. WEBER (1997, S. 444) versteht unter der Systemkomplexität nach LUHMANN (1973, S. 1065) und DÖRNER (1989, S. 59) eine Beschreibung der Vielfältigkeit und Vielschichtigkeit der Elemente und Verknüpfungen. Übertragen auf Produktionsnetzwerke bedeutet dies, dass die Anzahl und Unterschiedlichkeit von Produktionslinien, Beschaffungs- und Absatzmärkten sowie Transportrelationen den Komplexitätsgrad des Systems bestimmen. Die Identifikation und Abbildung wesentlicher Komplexitätstreiber steht daher im Fokus der unternehmensindividuell vorzunehmenden Kennzahlenableitung.

Unter dem Merkmal *Dynamik* versteht J. WEBER (1997, S. 446) in Anlehnung an CHILD (1972, S. 3) und DÖRNER (1989, S. 62) die Intensität sowie den Verlauf einer zeitlichen Veränderung von Systemelementen und -beziehungen. Während die Intensität durch das Ausmaß der Veränderung sowie deren Geschwindigkeit charakterisiert wird, beschreibt der Veränderungsverlauf die Regelmäßigkeit des Auftretens einer Veränderung.

**Zusammenführung der strategischen und operativen Kennzahlen** Die Zusammenführung der dualistisch abgeleiteten Kennzahlen dient der Identifikation von Abhängigkeiten zwischen strategischen und operativen Kenngrößen. Dabei sind konkurrierende Zielgrößen von besonderer Bedeutung, da diese eine Abwägung zwischen der Umsetzung strategischer Zielsetzungen und Gewährleistung eines reibungsfreien operativen Betriebs erforderlich machen. Da die Dynamik die zeitliche Veränderung der Komplexität von Systemelementen bzw. Beziehungen beschreibt, werden die beiden Systemmerkmale für die folgende Analyse zusammengefasst.



## 6.1 Prozessmodell zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

---

Die Realisierung eines betriebswirtschaftlich optimalen Produktionsnetzwerks beruht auf der Nutzung standortspezifischer Kostenvorteile in jedem Wertschöpfungsschritt. In der Konsequenz ergibt sich ein global verteiltes Netzwerk mit komplexen Warenströmen. Dieser Effekt kommt im Falle transportkostenintensiver Güter nicht zum Tragen, da die kostenoptimale Netzwerkalternative auf das Konzept der Weltfabrik<sup>1</sup> führt. Allgemeingültige negative Auswirkungen eines betriebswirtschaftlich optimalen Netzwerkdesigns können daher nicht identifiziert werden. Die Realisierung eines GPN mit hoher Bestellmengenflexibilität erfordert hingegen die Erhöhung der Produktionskapazität bzw. die Fähigkeit, ein Produkt auf verschiedenen Produktionslinien herstellen zu können. Da dies mit einer steigenden Anzahl an Produktionslinien und parallel pro Linie herstellbarer Produkte einhergeht, resultieren negative Auswirkungen auf die Komplexität von Produktionslinien sowie Transportrelationen. Zur Minimierung des Remanenzrisikos muss für jeden Produktionsstandort eine ausreichende Auslastung gewährleistet werden. Dies erfordert die Fähigkeit, ein Produkt an mehreren Standorten herstellen zu können, um produktspezifische Nachfragerückgänge im gesamten Netzwerk ausgleichen zu können. Hieraus resultiert eine steigende Komplexität von Produktionslinien und Transportrelationen. Die Fähigkeit, Nachfrageschwankungen im Netzwerk ausgleichen zu können, wirkt sich positiv auf die Liefertreue aus. Dementsprechend lässt sich in gleicher Weise wie für die Zielgröße Remanenzrisiko ein negativer Zusammenhang zwischen der Liefertreue und der Komplexität von Systemelementen und -beziehungen attestieren. Die Maximierung der Lieferschnelligkeit bedingt keine allgemeingültigen negativen Auswirkungen auf operative Kenngrößen. In Abbildung 6.1 wird das Konzept der selektiven Kennzahlen für GPN zusammenfassend dargestellt.

### 6.1.1.2 Identifikation von umweltinduzierten Handlungsbedarfen

Mit der Identifikation von umweltinduzierten Handlungsbedarfen durch die nach außen gerichtete Beobachtung der Systemumgebung wird das Ziel verfolgt, neue Entwicklungsoptionen frühzeitig zu erkennen. In diesem Zusammenhang gilt es, relevante Einflussfaktoren zu bestimmen und in einer vorausschauenden Planung entsprechend abzubilden (SUDHOFF 2008, S. 5). Hierfür bietet sich der Einsatz der folgenden, auf MEYER & JACOB (2008, S. 146-154) zurückgehenden, Indikatoren an:

---

<sup>1</sup>Das Konzept der Weltfabrik zeichnet sich durch die zentralisierte Herstellung von Produkten an einem Standort für den gesamten Weltmarkt aus. (MEYER & JACOB 2008, S. 165)

## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

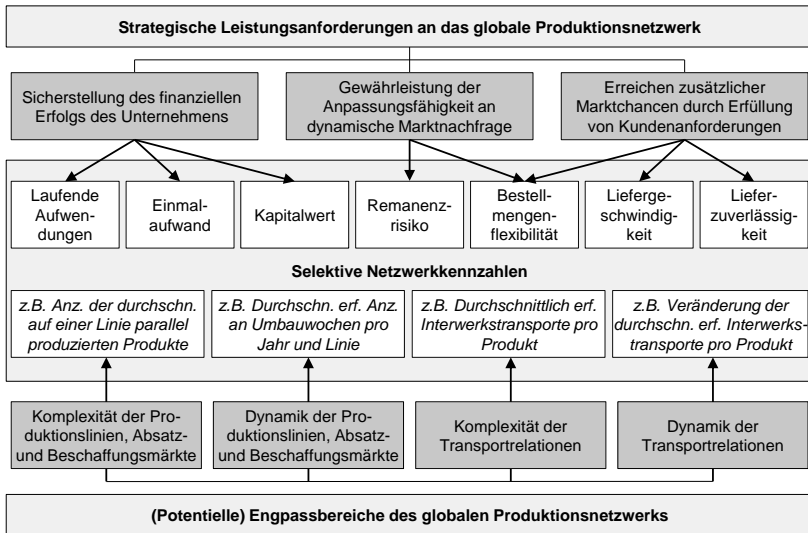
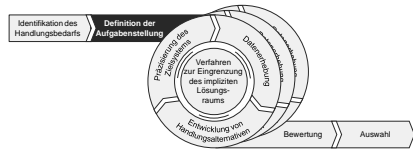


Abbildung 6.1: Konzept der selektiven Kennzahlen für globale Produktionsnetzwerke

1. *Neue Märkte und Umsatzverschiebungen:* Während Märkte kurzfristig vergleichsweise stabil sind, können bedeutende Innovationen und Konjunkturzyklen mittelfristig zu Marktschwankungen führen. Langfristig wandeln sich Märkte in ihrer Struktur, was zu Veränderungen der Marktgrößen, Kostenstrukturen und realisierbaren Preisen führt. Nur die frühzeitige Identifikation maßgeblicher Veränderungen erlaubt die Eroberung von Marktanteilen in der Wachstumsphase durch eine entsprechende Netzwerkanpassung.
2. *Fähigkeiten und Cluster:* Die Beobachtung der Entwicklung des Bildungsniveaus in verschiedenen Weltregionen bildet die Basis für den frühzeitigen Zugang zu talentierten Fachkräften und eröffnet neue Standortoptionen. Beziehen Wettbewerber erstmals Kaufteile aus einer Region oder lokalisieren dort erfolgreich neue Technologien, so stellt dies einen Hinweis auf einen lokalen Leistungssprung dar.
3. *Veränderungen der Standortstruktur von Wettbewerbern:* Die Analyse der Produktionsnetzwerke existierender aber auch potentieller Wettbewerber deckt deren strukturelle Wettbewerbsvorteile bspw. durch die Produktion in Niedriglohnländern auf und zeigt so einen Handlungsbedarf an.

### 6.1.2 Definition der Aufgabenstellung

Ausgehend von der Identifikation einer Fehlentwicklung ist die Aufgabenstellung zur Anpassung des Produktionsnetzwerks zu formulieren. Zunächst gilt es, das Aggregationsniveau für die Modellierung festzulegen und den Lösungsraum



der Netzwerkkonfiguration durch die Auswahl der zu betrachtenden Entscheidungsdimensionen aufzuspannen. Mit dem Ziel, den Planungsaufwand zu reduzieren und den Konfigurationsprozess zu beschleunigen ist der Lösungsraum durch die Erhebung von Planungsrestriktionen einzugrenzen. Die Angabe einer quantitativ beschreibbaren Zielvorstellung erlaubt schließlich die multidimensionale Bewertung von Handlungsalternativen und die automatisierte Durchsuchung des impliziten Lösungsraums.

#### 6.1.2.1 Definition des Aggregationsniveaus der Modellierung

Die Definition des Aggregationsniveaus erfordert in jedem Einzelfall die Abwägung zwischen erforderlichem Modellierungsaufwand und erreichbarer Modellgenauigkeit. Das vorgestellte mathematische Modell zur Netzwerkkonfiguration gibt hierfür sowohl die Grenzen als auch die Struktur der Vorgehensweise vor. So sind durch das Optimierungsmodell u. a. das Betrachtungslevel und die abbildbaren Zusammenhänge vorgegeben. Trotz des unveränderlichen Betrachtungsniveaus auf Ebene von Produktionslinien kann im Zuge der Definition des Aggregationsniveaus jedoch bspw. festgelegt werden, ob einzelne Bandabschnitte separat oder aggregiert betrachtet werden sollen. Analog der Modellbildung zum Produktionsnetzwerk (vgl. Abschnitt 5.1.1) erfolgt die Definition des Aggregationsniveaus neben der grundlegenden Festlegung der zeitlichen Auflösung des Entscheidungsproblems in den Schritten Netzwerkobjekte, Produktportfolio und der Verknüpfung von Netzwerkobjekten mit dem Produktportfolio.

Die Festlegung des Aggregationsniveaus der Netzwerkobjekte beginnt bei den *Beschaffungsmärkten*. Die Abbildung der Welt als einzigen Beschaffungsmarkt und die Modellierung einzelner Lieferanten als Beschaffungsmarkt bilden hierbei die beiden Extrempunkte. Die Wahl der passenden Ebene im Einzelfall ist u. a. davon abhängig, wie transportkostenintensiv die bezogenen Produkte sind, welche Bedeutung Zollkosten zukommt und ob regionale Bezugsbeschränkungen aufgrund von *Local Content Vorgaben*

## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

---

bestehen. Für die Definition, welcher Produktionsumfang im Modell in einer *Produktionslinie* abgebildet werden soll, bildet die Information welche Produktionsschritte zu unterscheiden sind, die wesentliche Entscheidungsgrundlage. Mit der Festlegung der Schritte wird gleichzeitig die vertikale Gliederung des Produktportfolios in Endprodukte, Komponenten, etc. vorgenommen. Eine Aufteilung eines Produktionsumfangs in zwei Schritte ist insbesondere dann vorzunehmen, wenn zwischen zwei Schritten keine direkte Kopplung besteht und so die Allokation der Umfänge an verschiedenen Produktionsstandorten möglich ist. Abschließend ist im Hinblick auf die Netzwerkobjekte das Aggregationsniveau der *Absatzmärkte* zu bestimmen. Analog zu Beschaffungsmärkten kann von der Auffassung der Welt als einen einzigen Markt bis hin zur Betrachtung einzelner Großkunden als Absatzmarkt eine Festlegung getroffen werden.

Neben der vertikalen Aufgliederung des Produktportfolios ist im Zuge der Festlegung der Produktionsschritte eine horizontale Segmentierung zur Reduzierung der Modellkomplexität erforderlich (MEYER & JACOB 2008, S. 155). Produkte, die einen sehr ähnlichen Fertigungsprozess aufweisen sind zu einem Produkt zu aggregieren.

Die Verknüpfung der Netzwerkobjekte mit dem Produktportfolio ist weitestgehend im mathematischen Modell abgebildet und kann folglich bei der Festlegung des Aggregationsniveaus nicht wesentlich beeinflusst werden.

### 6.1.2.2 Auswahl der Entscheidungsdimensionen

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 1.4.2.3 stehen im Rahmen der Netzwerkkonfiguration neun Entscheidungsdimensionen zur Verfügung. In Abhängigkeit des vorliegenden Handlungsbedarfs, zwingend einzuhaltender Vorgaben sowie des anvisierten Umfangs der Netzwerkanpassung, ist festzulegen, welche Entscheidungsdimensionen für eine Optimierung der Standortstruktur herangezogen werden dürfen und sollen. Es handelt es sich hierbei um eine Vorgabe der Unternehmenshierarchie, der keine allgemeingültige Logik zugrunde liegen kann.

### 6.1.2.3 Ermittlung der Planungsrestriktionen

Mit der Ermittlung der Planungsrestriktionen wird das Ziel verfolgt, den durch die Auswahl der Entscheidungsdimensionen aufgespannten Lösungsraum einzuschränken. Dies führt zu einer Vereinfachung sowie Beschleunigung des Entscheidungsprozesses,

## 6.1 Prozessmodell zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

---

da Lösungen, die nicht realisiert werden können oder sollen bereits in dieser frühen Phase aus dem Betrachtungsraum ausgeschlossen werden (LAUX et al. 2014, S. 14-15). Da jede Einschränkung des Lösungsraums die Gefahr birgt, das globale Optimum der Handlungsalternativen auszuschließen, gilt es, jede Restriktion auf ihre Erforderlichkeit hin zu überprüfen. Im Einzelnen sind relevante Vorgaben in den von ERNST (2012, S. 81-82) in Anlehnung an KAUDER (2008, S. 16-32) und CHOPRA et al. (2014, S. 148-155) eingeführten Kategorien makroökonomisch, strategisch und physisch zu erheben.

*Makroökonomische Restriktionen* lassen sich in rechtliche und finanzielle Vorgaben untergliedern (KAUDER 2008, S. 21). Rechtliche Bestimmungen sind im Wesentlichen das Resultat aus protektionistischen Maßnahmen einzelner Länder, die dadurch Importe erschweren oder eigene Exporte fördern wollen (EIBNER 2006, S. 104-107). Hierbei ist zwischen tarifären und nicht-tarifären Handelshemmnissen zu unterscheiden. Während erstere, wie bspw. Zölle, als finanzielle Parameter in das multikriterielle Optimierungsmodell einfließen, stellen letztere einzuhaltende Vorgaben in Form von Importquoten, freiwillige Selbstbeschränkungen oder *Local Content Anforderungen* dar, die den Lösungsraum einschränken (vgl. KAUDER (2008, S. 24-28)). Aus finanzieller Sicht können Vorgaben zum maximalen Investitionsvolumen begrenzend wirken. Da jede Investition, welche über die Kapitalkosten hinaus Gewinn erwirtschaftet, als grundsätzlich auf dem Kapitalmarkt finanzierbar zu betrachten ist (HÜBNER 2007, S. 66), spielen finanzielle Restriktionen aus makroökonomischen Gründen eine untergeordnete Rolle.

Mit dem Ziel, die Konformität der Netzwerkstruktur mit der Unternehmensstrategie zu gewährleisten, sind *strategische Restriktionen* zu berücksichtigen (KAUDER 2008, S. 17). Es ist sicherzustellen, dass alle funktionalen und wettbewerbsbezogenen Strategien eine Gesamtstrategie bilden und alle Prozesse und Ressourcen eines Unternehmens einen Beitrag zur erfolgreichen Strategieumsetzung leisten (CHOPRA et al. 2014, S. 47).

*Physische Restriktionen* ergeben sich aus der bestehenden Standortstruktur sowie aus Netzwerkbetrieb und -migration (vgl. Abschnitte 5.1.2 und 5.1.3).

### 6.1.2.4 Auswahl der Zielgrößen

Mit der Auswahl der Entscheidungsdimensionen und der Ermittlung der Planungsrestriktionen ist der zu betrachtende Lösungsraum implizit definiert. Für dessen Durchsuchung ist die Angabe einer Zielvorstellung erforderlich, die eine Bewertung von Handlungsalternativen ermöglicht.

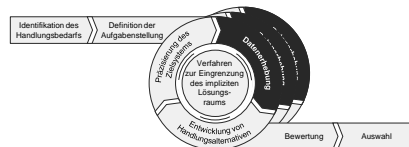
## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

Die Identifikation des Handlungsbedarfs erfordert die kontinuierliche Erfassung der strategischen Zielerreichung durch die aktuelle Netzwerkstruktur durch ein PMS. Dieses beinhaltet bereits die Auswahl der zu verfolgenden Ziele aus den strategischen Netzwerkzielen. Dementsprechend besteht die Aufgabe in diesem Schritt nicht in der Erarbeitung eines neuen sondern lediglich in der Überprüfung und ggf. Anpassung des vorhandenen Zielsystems. Neben der bloßen Auswahl bedarf jedes Ziel in einem Entscheidungsmodell einer genaueren Spezifikation. Für das in Abschnitt 4.2.1.2 ausgewählte Lösungsverfahren sind hierfür die Auskunft über das erstrebte Ausmaß der einzelnen Ziele, die Angabe eines Faktors je Zielgröße zur Gewichtung der Abweichung vom gewünschten Zielwert sowie optional eine Aussage bzgl. einzuhaltender unterer bzw. oberer Schranken je Zielgröße erforderlich. Das Treffen dieser Angaben stellt den Entscheidungsträger vor eine große Herausforderung, da er zu diesem Zeitpunkt keine Informationen über den Raum möglicher Zielwerte besitzt (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991, S. 132). Im Rahmen des hier vorgestellten Prozessmodells ist in der Phase der *Definition der Aufgabenstellung* daher lediglich eine Auswahl der zu verfolgenden Zielgrößen zwingend vorzunehmen. Liegen bei diesem Schritt bereits weitergehende Angaben vor, können diese in den folgenden Schritten berücksichtigt werden. Da aus prozessualen Gründen mehrere Handlungsalternativen zu erzeugen sind, besteht zudem die Notwendigkeit zur Formulierung mehrerer unterschiedlich gearteter Zielsysteme.

### 6.1.3 Datenerhebung

Die Ableitung tragfähiger Entscheidungen auf Basis modellgestützter Verfahren zur Analyse und Planung von Netzwerken ist nur bei Vorliegen valider Daten möglich (JODIN et al. 2009, S. 1-2). Deren Erhebung in der erforderlichen Qualität ist mit einem hohem zeitlichen Aufwand verbunden. Für das zur mathematischen

Optimierung verwandte Themengebiet der Simulation wird dieser auf bis zu 50% des Gesamtaufwands beziffert (ACÉL 1996). Mit dem Ziel, den Zeitaufwand zur Datenerfassung zu minimieren, wurde in Abschnitt 3.1 eine iterative Vorgehensweise bei der Erhebung gefordert. Dieser mehrere Prozessschritte umfassende zyklische Prozess ist Gegenstand von Abschnitt 6.2. Die erforderlichen Voraussetzungen für den Schritt der Datenerhebung werden in diesem Abschnitt geschaffen.



### 6.1.3.1 Prozessbeschreibung der Datenerhebung

Eine Prozessbeschreibung für die Datenerhebung erfordert zunächst die Definition der wesentlichen Begrifflichkeiten. Unter *Daten* werden Zeichenfolgen verstanden, die nach bestimmten Regeln aus analogen oder digitalen Signalen oder Zeichen zusammengesetzt sind. Da Daten keine Verwendungshinweise enthalten, können sie in verschiedener Art und Weise interpretiert werden. Durch die Interpretation von Daten entstehen *Informationen*. Diese beinhalten die Bedeutung der Daten im relevanten Kontext und sind somit zweckgebunden. (BRACHT et al. 2011, S. 163-164)

Trotz dieser definitorischen Unterscheidung wird für den Prozess zur Erhebung von Daten und Informationen die in der Literatur geläufigere Bezeichnung der *Datenerhebung* verwendet. Darüber hinaus werden im Folgenden die Begriffe Erfassung und Erhebung synonym eingesetzt. Da die Güte der erzielbaren Ergebnisse von der Qualität der Eingangsdaten determiniert wird, kommt der Datenerhebung eine erhebliche Bedeutung zu (W. KÜHN 2006, S. 105). Für diesen Prozess stehen elabourierte Methoden zur Verfügung. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 559 wurde das in folgender Abbildung 6.2 visualisierte allgemeine Methodennutzungsmodell zur Informationsgewinnung für die modellgestützte Analyse großer Netze der Logistik entwickelt. Dieses Modell kann unmittelbar im Kontext der Konfiguration GPN eingesetzt werden.

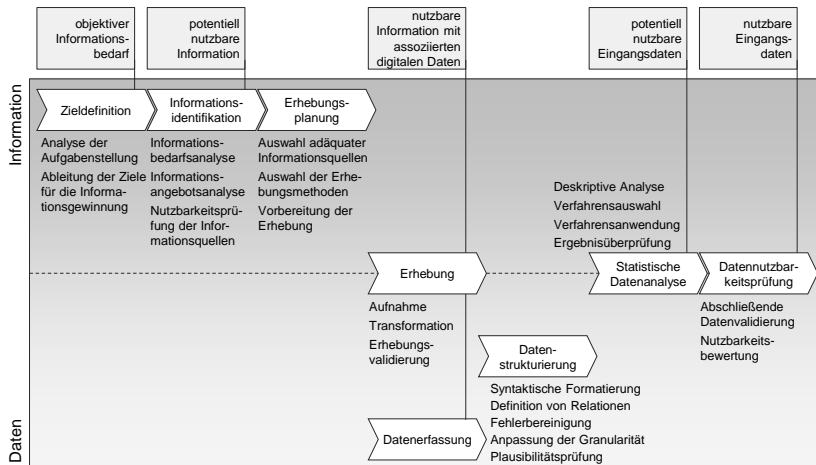


Abbildung 6.2: Prozessorientiertes Vorgehensmodell zur Informationsgewinnung (Quelle: in Anlehnung an BERNHARD et al. (2007, S. 7))

## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

---

Mit dem Prozess der *Zieldefinition* wird aufbauend auf der Definition der Aufgabenstellung der objektive Informationsbedarf hergeleitet. Mit der anschließenden *Informationsidentifikation*, die sich aus den Schritten Informationsbedarfsanalyse, Informationsangebotsanalyse sowie einer Nutzbarkeitsprüfung der Informationsquellen zusammensetzt, werden die nutzbaren Informationen mit dem Bezug zur Quelle, der zu erwartenden Qualität sowie dem damit einhergehenden Erhebungsaufwand festgelegt. Im Rahmen der *Erhebungsplanung* wird die eigentliche Datenerhebung organisatorisch derart vorbereitet, dass der Anwender diese selbstständig durchführen kann. Die *Erhebung* und *Datenerfassung* dient der Erfassung der notwendigen Daten durch Anwendung der ausgewählten Methoden sowie der gezielten Aufbereitung für den geplanten Einsatzzweck. Mit dem Abschluss dieses Prozessschritts liegen dem Anwender nutzbare Informationen mit assoziierten, digitalen Daten vor, die anschließend durch die Einzelprozesse der *Datenstrukturierung* in eine analysefähige Form zu überführen sind. Im Zuge der syntaktischen Formatierung werden die vorliegenden Daten in eine Datenbank übertragen und die Zusammenhänge zwischen einzelnen Datensätzen in Form von Relationen abgebildet. Nach der Fehlerbereinigung und Anpassung der Granularität der Daten erfolgt im Rahmen der Plausibilitätsprüfung die Prüfung der Weiterverwendbarkeit der Datenbank für die nachfolgenden Schritte. Fällt diese Verifikation und Validierung negativ aus, ist eine entsprechende Neu- bzw. Nacherhebung von Daten erforderlich. Ausgehend von den in der Datenbank abgelegten bereinigten und strukturierten Datensätzen werden mittels *statistischer Datenanalyse* weitergehende Informationen ermittelt. Abschließend erfolgt die *Datennutzbarkeitsprüfung* bestehend aus der Datenvalidierung und der Nutzbarkeitsprüfung. Im Fall eines positiven Ergebnisses liegen nutzbare Informationen für die modellgestützte Analyse vor. (BERNHARD et al. 2007, S. 7-16)

### 6.1.3.2 Datenstrukturierung

Trotz der individuell im Einzelfall vorzunehmenden Festlegung des Aggregationsniveaus der Modellierung und damit der erforderlichen Daten, kann aufgrund der Struktur des mathematischen Modells eine übergeordnete Klassifizierung der relevanten Informationen für die Netzwerkkonfiguration vorgenommen werden. Für die einzelnen Datenklassen lassen sich allgemeine Anforderungen für deren Erhebung ableiten. Die Datenstruktur vereinfacht dadurch den Prozess der Datenerhebung. Die Klassifizierung der relevanten Informationen beruht auf den folgenden Ansätzen von KOHLER (2008, S. 98-102) und REUTER et al. (2015, S. 464-465).



## 6.1 Prozessmodell zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

KOHLER (2008, S. 98-102) nimmt eine Unterscheidung zwischen der Analyse des aktuellen Wertschöpfungsnetzwerks, der Ermittlung der Produktstruktur und der Ermittlung potenzieller Bestandteile des zukünftigen Wertschöpfungsnetzwerks vor. Aufgrund der im Rahmen der Modellbildung (vgl. Abschnitt 5.1) dargestellten engen Verknüpfung eines Produktionsnetzwerks mit dem zugehörigen Produktportfolio wird der zweite Schritt zur Ermittlung der Produktstruktur auf die Schritte eins und drei aufgeteilt. Daraus resultiert eine Klassifizierung der zu erhebenden Daten gem. der Beschreibung des aktuellen bzw. des potentiellen zukünftigen Produktionsnetzwerks.

Auf REUTER et al. (2015, S. 464-465) geht die Strukturierung eines Datenmodells zur modellgestützten Netzwerkconfiguration in die drei Elemente technisches Modell, Kostenmodell sowie Annahmen und Restriktionen zurück. Die Erfassung von Planungsrestriktionen schränkt den Lösungsraum der Netzwerkconfiguration ein. Damit bildet diese einen der Datenerhebung vorausgehenden Prozessschritt und damit die Grenze jedoch keinen Bestandteil des Datenmodells. Dementsprechend werden die Daten zur Netzwerkconfiguration in ein technisches Modell und ein Kostenmodell untergliedert.

Aus der Synthese der Klassifizierungsansätze von KOHLER (2008) und REUTER et al. (2015) resultiert die in Abbildung 6.3 visualisierte allgemeine Struktur eines Datenmodells zur Konfiguration GPN. Das technische Modell wird dabei weiter untergliedert in die Netzwerkelemente sowie deren Parametrierung. Zur Verdeutlichung des Inhalts der einzelnen Segmente sind beispielhafte Indexmengen und Parameter angeführt. Die vollständige Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die allgemeine Struktur des Datenmodells findet sich in Anhang B.

Technisches Modell	Netzwerkelemente	1 Menge der bestehenden Produktionslinien $l^p$ Menge der bestehenden Linienbefähigungen $BEP^p$	4 Menge der potentiellen Produktionslinien $l^n$ Menge der potentiellen Linienbefähigungen $BEP^n$
	Parametrierung der Netzwerkelemente	2 Anfangsbestand für Produkt $p$ nach Linie $l^p$ : $inv_{l^pfg}^p$ Anzahl an Kernmitarbeitern am Standort $s$ in Periode 0: $mak0_{s^p}$	5 Frühester SOP der potentiellen Produktionslinie $l^n$ : $li_{l^n}^{SOP}$ Kapazitätsverlust aus Befähigung von Linie $l$ für $p$ : $loss_{l^pfg}^p$
Kostenmodell		3 Fixkosten für den Betrieb der Produktionslinie $l^p$ : $cFIX_{l^p}^l$ Mitarbeiterkosten am Standort $s$ in Periode $t$ : $cMA_{st}$	6 Investitionskosten für die Errichtung der Linie $l^n$ : $cIVT_{l^n}^l$ Kosten für die Befähigung der Linie $l^n$ für Produkt $p$ : $cIVT_{l^n}^{p, bep}$

Abbildung 6.3: Allgemeine Struktur eines Datenmodells zur Konfiguration GPN

## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

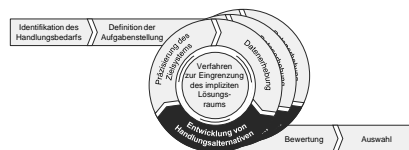
Die Daten aus den Feldern 1-3 beziehen sich auf das aktuelle Produktionsnetzwerk und stellen daher IST-Daten bzw. auf die Zukunft extrapolierte IST-Daten dar. Diese Daten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie nicht durch Experten erarbeitet oder abgeschätzt werden müssen, sondern bereits als Datensätze in verschiedenen Systemen vorliegen oder gemessen werden können. Beispielsweise können Transportkosten für einzelne Relationen aus den Abrechnungen mit Logistikdienstleistern entnommen werden und produktspezifische Taktzeiten von Produktionslinien können gemessen werden. Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung dieser Datensätze sind entsprechende Annahmen zu treffen. Da alle Weiterentwicklungen eines Produktionsnetzwerks auf dem IST-Zustand basieren, bildet dessen Parametrierung in der erforderlichen Qualität eine unumgängliche Notwendigkeit. Es ist daher die einmalige Erhebung und ggf. Extrapolation der IST-Daten in der notwendigen Granularität und Qualität vorzunehmen.

Die potentiellen Elemente des zukünftigen Produktionsnetzwerks (Feld 4) spannen den Lösungsraum der Netzwerkkonfiguration auf. Die Menge der Freiheitsgrade eines Produktionsnetzwerks stellt Expertenwissen dar, das nicht unmittelbar vorliegt oder gemessen werden kann. Selbst Spezialisten können lediglich fundierte Annahmen zu möglichen Freiheitsgraden treffen. Die Bewertung der tatsächlichen Umsetzbarkeit technischer Maßnahmen erfordert die Durchführung zeitintensiver Machbarkeitsstudien. Mit dem Ziel, nicht für alle denkbaren Freiheitsgrade eines Produktionsnetzwerks Machbarkeitsstudien durchführen zu müssen, ist ein iterativer Prozess zu deren Ermittlung vorzusehen. Dieser ist Gegenstand von Abschnitt 6.2.

Die den Feldern 5 und 6 angehörenden Datensätze dienen der Parametrierung der Netzwerkfreiheitsgrade. Deren exakte Ermittlung erfordert im Vergleich zur Durchführung von Machbarkeitsstudien ein Vielfaches des Zeitaufwands. Analog zur Ermittlung der Freiheitsgrade muss folglich auch deren Parametrierung iterativ stattfinden.

### 6.1.4 Entwicklung von Handlungsalternativen

Mit Abschluss der Datenerhebung liegen die relevanten Eingangsgrößen für die Entwicklung von Handlungsalternativen vor. Dies erfolgt vollständig automatisiert durch Einsatz des in Kapitel 5 formulierten Optimierungsmodells. Je-

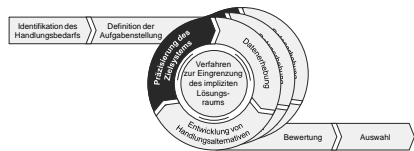


## 6.1 Prozessmodell zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

der Optimierungslauf führt auf die für ein Zielsystem optimale Handlungsalternative. Diese wird durch die Ausprägung der Entscheidungsvariablen vollständig beschrieben. Gemäß den Ausführungen zur Auswahl der Zielgrößen kann für den initialen Optimierungslauf aufgrund fehlender Informationen zum Lösungsraum nicht gewährleistet werden, dass die formulierten Zielsysteme vollständig definiert sind. Durch die Erzeugung von Netzwerkalternativen, die jeweils für eine der sieben Zielgrößen optimal sind, kann dieses Informationsdefizit behoben und der Entscheider so zur Präzisierung des Zielsystems befähigt werden.

### 6.1.5 Präzisierung des Zielsystems

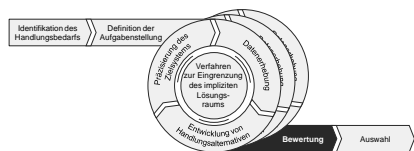
Mit der Entwicklung von Handlungsalternativen gewinnt der Entscheidungsträger Informationen zu erreichbaren Zielwerten im vorhandenen Lösungsraum. Auf dieser Basis kann das initial parametrisierte Zielsystem präzisiert werden.



Wurde das Ziel für den Kapitalwert bei der ersten Formulierung des Zielsystems bspw. über dem, auch bei Vernachlässigung aller anderen Zielgrößen, erreichbaren Wert angesetzt, so muss dies korrigiert werden. Darüber hinaus kann im Zuge der iterativen Ermittlung von Netzwerkszenarien der Bedarf zu weiteren Anpassungen des Zielsystems, wie bspw. der Gewichtungsfaktoren, entstehen. Die Festlegung der erforderlichen Parameter erfolgt unternehmensindividuell durch die Entscheidungsträger. Eine allgemeingültige Vorgehensweise für diesen Prozess kann daher nicht formuliert werden.

### 6.1.6 Bewertung

Mit dem Ende des zyklischen Durchlaufs der Phasen *Datenerhebung*, *Entwicklung von Handlungsalternativen* und *Präzisierung des Zielsystems* ist die Überführung des anfänglichen MODM-Problems in ein MADM-Problem abgeschlossen. Für die Auswahl einer Handlungsalternative aus dem verbleibenden expliziten Lösungsraum durch das Management ist eine detaillierte Bewertung der noch vorhandenen

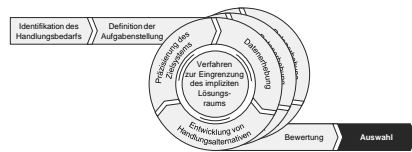


## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

Optionen erforderlich. Eine einfache und zeiteffiziente Möglichkeit besteht in der Beschreibung der einzelnen Netzwerkalternativen durch Einsatz des zur *Identifikation des Handlungsbedarfes* eingesetzten PMS. Durch den Vergleich der resultierenden Kennzahlenausprägungen für die einzelnen Netzwerkalternativen kann die Auswahl einer Lösungsoption durch die Entscheidungsträger erfolgen. Darüber hinaus stehen in der Literatur elaborierte Ansätze, wie bspw. der von UDE (2010), zur umfassenden Bewertung explizit formulierter Netzwerkalternativen zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.3.4).

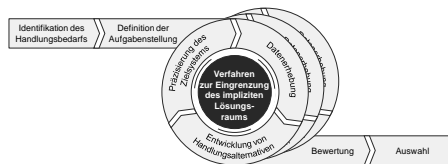
### 6.1.7 Auswahl

Die Auswahl einer Handlungsalternative und die Initiierung eines Realisierungsprojektes markiert den Abschluss des Entscheidungsprozesses zur Netzwerkkonfiguration. Aufgrund des monetären Umfangs sowie der weitreichenden Implikationen wird die Entscheidung im Allgemeinen nicht von einer Einzelperson, sondern durch ein Gremium getroffen. Die greifenden Mechanismen bei der Entscheidungsfindung durch Individuen oder Gruppen ist Untersuchungsgegenstand der Entscheidungstheorie (vgl. bspw. BAMBERG et al. (2013)).



## 6.2 Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums

Die folgenden Ausführungen dienen zur Erläuterung der detaillierten Vorgehensweise zur iterativen Bearbeitung der Prozessschritte *Datenerhebung*, *Entwicklung von Handlungsalternativen* und *Präzisierung des Zielsystems*. Dieses Verfahren zur iterativen Eingrenzung des impliziten Lösungsraums ist in vier Hauptschritte gegliedert. Zunächst gilt es, den Lösungsraum in der initialen Datenerhebung aufzuspannen und zu parametrieren. Auf Basis des hiermit erzeugten Datenmodells können im zweiten Schritt erste Optimierungsstudien durchgeführt werden und mit den so generierten Informationen zum Lösungsraum die Parametrierung der Zielsysteme vorgenommen werden.



Die Prozessschritte drei und vier sind sequentiell für alle Zielsysteme durchzuführen. Im dritten Schritt wird eine erste Netzwerkalternative für das multikriterielle Zielsystem ermittelt und detailliert bewertet. Durch die so gewonnenen Informationen kann der implizit definierte Lösungsraum eingegrenzt werden. Abschließend erfolgt durch die wiederholte Berechnung und Grob- bzw. Feinbewertung von Netzwerkalternativen die Identifikation der optimalen Lösung für das jeweilige Zielsystem. In Abbildung 6.4 ist der zugehörige detaillierte Prozessablauf mit den Teilschritten 1.1 bis 4.8 visualisiert.

**Schritt 1: Initiale Datenerhebung** Die initiale Datenerhebung beginnt mit der Erfassung der Informationen zum aktuellen Produktionsnetzwerk (Schritt 1.1). Dies umfasst die Felder 1-3 in Abbildung 6.3. Gemäß den Ausführungen aus Abschnitt 6.1.3 sind diese Daten einmalig in der festgelegten Granularität und Qualität zu erfassen.

Mit der Erhebung potentieller Netzwerkelemente (Feld 4 in Abbildung 6.3) wird der Lösungsraum für das zukünftige Produktionsnetzwerk aufgespannt (Schritt 1.2). Diese dürfen den im Rahmen der Definition der Aufgabenstellung festgelegten Planungsrestriktionen nicht widersprechen. Für jedes Netzwerk stehen zahlreiche Änderungsoptionen zur Verfügung, die von Experten auf deren Realisierbarkeit hin zu überprüfen sind. Für eine gesicherte Aussage zur Machbarkeit ist eine erste Ausplanung der Maßnahmen erforderlich. Um diesen Aufwand zu vermeiden, sind in Schritt 1.2 alle potentiellen Netzwerkelemente zu erfassen, die auf Basis einer ersten Expertenschätzung realisierbar sind. Bei Unsicherheit bzgl. der Machbarkeit ist das Netzwerkelement in den Lösungsraum aufzunehmen. Mit dieser Vorgehensweise wird ein zu großer Lösungsraum aufgespannt. In Konsequenz beinhaltet dieser alle machbaren potentiellen Netzwerkelemente, jedoch unter Umständen auch nicht realisierbare Maßnahmen.

In Prozessschritt 1.3 sind die technischen Parameter aller im Lösungsraum enthaltenen Netzwerkelemente zu ermitteln (Feld 5 in Abbildung 6.3). Die exakte Parametrierung ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Soll bspw. ein neues Produkt einer Produktionslinie zugewiesen werden können, so besteht für die exakte Bestimmung der Taktzeit evtl. die Notwendigkeit zur Durchführung zeitaufwändiger Simulationsstudien. Mit dem Ziel diesen Aufwand zu vermeiden, ist die erstmalige Parametrierung der potentiellen Netzwerkelemente expertenbasiert durchzuführen. Um trotz nicht exakter Parameter die optimale Netzwerkalternative identifizieren zu können, ist die Prämisse zu setzen, die Parameter so gut wie möglich, jedoch niemals zu negativ zu ermitteln. Für das Beispiel der Taktzeit einer neuen Linienbefähigung bedeutet dies, dass die Taktzeit initial

## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

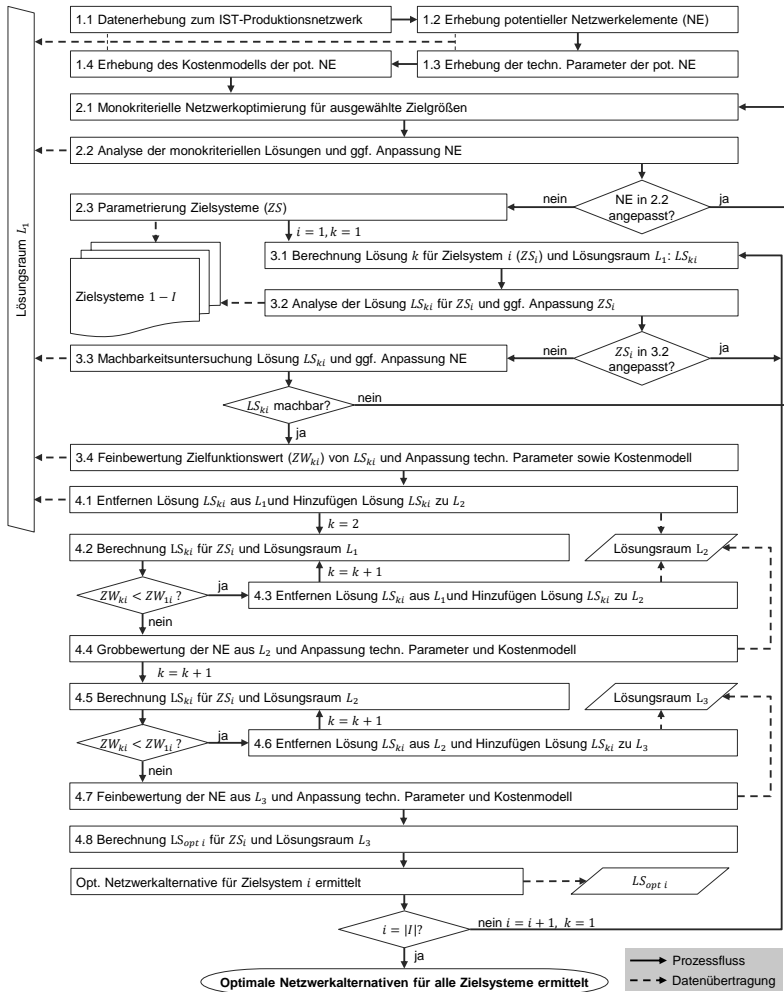


Abbildung 6.4: Verfahren zur Bestimmung optimaler Netzwerkalternativen unter schrittweiser Eingrenzung des impliziten Lösungsraums

tendenziell zu niedrig angesetzt werden muss. Eine zu hoch angenommene Taktzeit würde zu einer Reduzierung der Ausbringungsmenge einer Produktionslinie führen und u. a. Kosten für erhöhte Schichtmodelle oder Kapazitätsausbauten verursachen.

## 6.2 Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums

---

Dies kann dazu führen, dass das Netzwerkelement der Linienbefähigung aufgrund der fälschlicherweise zu hoch angesetzten Taktzeit nicht Teil der besten Netzwerkalternative ist. Ist die Linienbefähigung mit der tendenziell zu geringen Taktzeit Teil der optimalen Lösung, so ist im weiteren Verlauf des Verfahrens die exakte Taktzeit zu ermitteln und in einem weiteren Optimierungslauf zu bestimmen, ob die Linienbefähigung dennoch ausgewählt wird. Im Anhang C findet sich eine Übersicht für alle technischen Parameter, in welche Richtung eine Abweichung bei der erstmaligen Datenerhebung im Rahmen der Methodenanwendung vorgesehen ist.

Für die Parametrierung des Kostenmodells der potentiellen Netzwerkelemente in Schritt 1.4 (Feld 6 in Abbildung 6.3) gilt mit der gleichen Begründung eine den technischen Parametern analoge Prämisse. Alle Kostensätze sind so gut wie möglich zu ermitteln, jedoch niemals zu negativ. Mit Ausnahme des Restwerts von Produktionsanlagen wirken sich zu niedrig angesetzte Kostenparameter positiv auf die finanziellen Zielgrößen aus. Folglich sind Kostensätze tendenziell zu niedrig und der Restwert zu hoch anzusetzen.

Mit Abschluss von Schritt 1.4 steht der aufwandsarm ermittelte, implizit definierte initiale Lösungsraum  $L_1$  zur Verfügung. Dieser beinhaltet zu viele, da teilweise nicht realisierbare potentielle Netzwerkelemente und ist zu positiv parametrieren. Folglich begünstigt der Lösungsraum  $L_1$  eine Anpassung des bestehenden Produktionsnetzwerks. Für die automatisierte Durchsichtung dieses Lösungsraums sind im nächsten Schritt die Zielsysteme zu parametrieren.

**Schritt 2: Parametrierung der Zielsysteme** Die Beschreibung eines Zielsystems für das formulierte Optimierungsmodell besteht u. a. aus der Angabe zu Minimal- und Maximalwerten für die einzelnen Zielgrößen sowie einer Aussage bzgl. einzuhaltender unterer bzw. oberer Schranken je Zielgröße. Die erforderlichen Informationen zum Lösungsraum für das Festlegen dieser Werte werden durch monokriterielle Optimierungsläufe für alle ausgewählten Zielgrößen ermittelt (Schritt 2.1). Durch die Erzeugung der bzgl. der einzelnen Zielgrößen optimalen Netzwerkalternativen, sind die theoretischen Optimalwerte je Zielgröße sowie die resultierende Ausprägung der weiteren Größen bekannt. Wird bspw. die kapitalwertoptimale Netzwerkalternative berechnet, so ergibt sich hieraus der maximal erreichbare Kapitalwert sowie die für diese Lösung resultierenden Werte für die verbleibenden Zielgrößen wie z. B. die Lieferzeit. Die Durchführung monokriterieller Optimierungsläufe befähigt den Entscheidungsträger somit zur Parametrierung der Zielsysteme.

In Prozessschritt 2.2 erfolgt die Analyse der bzgl. der einzelnen Zielgrößen optimalen Netzwerkalternativen. Gegebenenfalls nicht notwendige potentielle Netzwerkelemente sind aus dem Lösungsraum  $L_1$  zu entfernen. Wurde bspw. die Errichtung eines marktnahen Standorts ausschließlich für die Reduzierung der Lieferzeit in den Lösungsraum aufgenommen, der jedoch bei der monokriteriellen Minimierung der Liefergeschwindigkeit nicht eröffnet wird, kann dieser aus dem Lösungsraum genommen werden. Im Falle einer Anpassung der potentiellen Netzwerkelemente sind erneut monokriterielle Optimierungsläufe auf Basis des neuen, eingeschränkten Lösungsraums  $L_1$  durchzuführen. Andernfalls kann in Schritt 2.3 die Parametrierung der Zielsysteme erfolgen.

Die bestimmten monokriteriellen Optimalwerte für die einzelnen Zielgrößen können für zu maximierende bzw. minimierende Ziele bei der multikriteriellen Optimierung nicht überschritten bzw. unterschritten werden. Auf Basis der Information zum Optimum der einzelnen Ziele können darüber hinaus für alle Größen obere bzw. untere Schranken vorgegeben werden, die in der multikriteriellen Optimierung erreicht werden müssen. Die Normierung der einzelnen Zielgrößen ist derart vorzunehmen, dass der Nutzwert 1 wird, falls eine Zielgröße den Optimalwert der monokriteriellen Optimierung annimmt und der Nutzwert 0, falls die untere bzw. obere Schranke erreicht wird. Darüber hinaus sind von den Entscheidungsträgern Zielwerte und Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Zielgrößen anzugeben. Diese sind individuell im Einzelfall festzulegen. Als Ergebnis des zweiten Schritts liegen  $I$  vollständig beschriebene Zielsysteme  $ZS_i$  für die multikriterielle Optimierung vor. Die folgenden beiden Schritte 3 und 4 sind separat für alle definierten Zielsysteme durchzuführen.

**Schritt 3: Berechnung und Feinbewertung einer Netzwerkalternative** In Schritt 3.1 wird für das Zielsystem  $ZS_i$  die optimale multikriterielle Netzwerkalternative  $LS_{ki}$  im Lösungsraum  $L_1$  berechnet. Auf Basis der Analyse der Lösung  $LS_{ki}$  ist durch die Entscheidungsträger festzulegen, ob eine Anpassung des Zielsystems  $ZS_i$  erforderlich ist (Schritt 3.2). Dies kann bspw. notwendig werden, falls eine Zielgröße das Ergebnis in nicht beabsichtigter Weise dominiert. Bei einer Änderung des Zielsystems  $ZS_i$  ist erneut die optimale Netzwerkalternative aus Lösungsraum  $L_1$  zu ermitteln.

Mit dem Ziel die Verständlichkeit der folgenden Ausführungen zu erhöhen, wird ergänzend zum Prozessablauf (vgl. Abbildung 6.4) die in Abbildung 6.5 dargestellte, stark vereinfachte Visualisierung der Prozessschritte eingesetzt. Die einzelnen Diagramme zeigen auf der Abszissenachse die Lösungen, d. h. die im Lösungsraum beispielhaft



## 6.2 Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums

enthaltenen Netzwerkalternativen a-k. Auf der Ordinatenachse ist der Zielfunktionswert der Lösungen aufgetragen. Gemäß dem formulierten Optimierungsmodell gilt es, diesen zu minimieren. Im linken Diagramm ist das Ergebnis nach Abschluss von Schritt 3.2 dargestellt. Lösung c ist demnach die optimale Netzwerkalternative im zu großen und zu positiv parametrisierten Lösungsraum  $L_1$ .

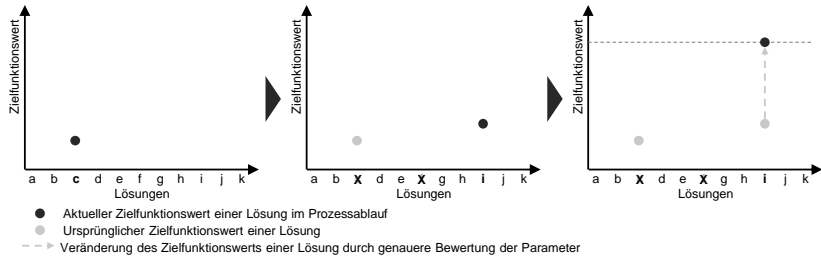


Abbildung 6.5: Visualisierung zur iterativen Eingrenzung des Lösungsraums (1/2)

Prozessschritt 3.3 besteht in der Machbarkeitsuntersuchung aller Netzwerkelemente, die Bestandteil der optimalen Lösung, d. h. im Beispiel von Netzwerkalternative c, sind. Dies ist erforderlich, da die Realisierbarkeit der potentiellen Netzwerkelemente im Rahmen der Datenerhebung zur Aufwandsreduzierung nicht abschließend sichergestellt wurde. Ist die Machbarkeit aller Netzwerkelemente der Lösung nicht gegeben, so sind die nicht realisierbaren Elemente aus dem Lösungsraum  $L_1$  zu entfernen und zu Schritt 3.1 zurückzukehren. Sind in Bezug auf Netzwerkalternative c bspw. ein oder mehrere enthaltene potentielle Netzwerkelemente nicht realisierbar, so führt dies zum Ausschluss von Lösung c und ggf. weiteren Lösungen. Im mittleren Diagramm in Abbildung 6.5 betrifft dies bspw. Netzwerkalternative f.

Für die erste optimale multikriterielle Lösung, die vollständig realisierbar ist, im Beispiel Lösung i, ist in Schritt 3.4 eine Feinbewertung zu erstellen. Für alle Netzwerkelemente, die Bestandteil der Lösung sind, ist durch Experten die exakte Ermittlung der technischen Parameter sowie des Kostenmodells vorzunehmen. Der Lösungsraum  $L_1$  ist entsprechend zu aktualisieren. Aufgrund der zu positiven initialen Parametrierung des Lösungsraums  $L_1$  verschlechtert sich durch die Feinbewertung, wie im rechten Diagramm in Abbildung 6.5 für Lösung i visualisiert, der Zielfunktionswert der Lösung. Das Ergebnis von Schritt 3 bildet eine gute, vollständig realisierbare Netzwerkalternative mit feinbewertetem Zielwert. Die Optimalität der Lösung ist nicht gewährleistet.

## 6 Methode zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke

**Schritt 4: Iterative Ermittlung der optimalen Netzwerkalternative** Ausgehend von der in Schritt 3 ermittelten Netzwerkalternative wird abschließend die optimale Lösung bestimmt. Hierzu werden in den Prozessschritten 4.1 bis 4.3 zunächst alle Netzwerkalternativen im Lösungsraum  $L_1$  ermittelt, die einen niedrigeren Zielfunktionswert aufweisen, als die in Schritt 3 feinbewertete Lösung. Im Beispiel trifft dies, wie im linken Diagramm in Abbildung 6.6 dargestellt, auf die Netzwerkalternativen b, e, h, j und k zu. Die in diesen Lösungen enthaltenen potentiellen Netzwerkelemente spannen den im Weiteren zu betrachtenden Lösungsraum  $L_2$  auf. Die verbleibenden Lösungen a, d und g weisen einen schlechteren Zielfunktionswert als die bekannte und realisierbare Lösung i auf und können dementsprechend aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden. Potentielle Netzwerkelemente die ausschließlich in diesen Lösungen auftreten, sind kein Bestandteil des Lösungsraums  $L_2$ .

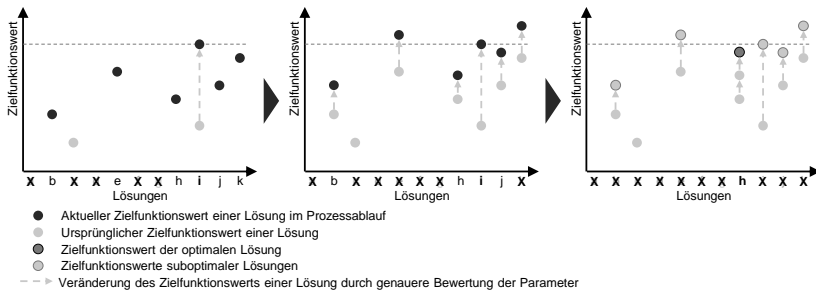


Abbildung 6.6: Visualisierung zur iterativen Eingrenzung des Lösungsraums (2/2)

Aus prozessualer Sicht ist für die Ermittlung der in den Lösungsraum  $L_2$  aufzunehmenden potentiellen Netzwerkelemente in Schritt 4.1 zunächst die in Schritt 3.3 feinbewertete Lösung aus dem Lösungsraum  $L_1$  zu entfernen. Als Lösung ist dabei die Kombination der gewählten Netzwerkelemente zu verstehen. Besteht eine Netzwerkalternative bspw. aus einer neuen Linienbefähigung für ein Produkt sowie der Errichtung einer Produktionslinie, so sind nicht die beiden Netzwerkelemente aus dem Lösungsraum  $L_1$  zu entfernen, sondern lediglich die Kombination aus diesen beiden Netzwerkelementen. Dies kann durch das Ergänzen einer entsprechenden Restriktion im mathematischen Modell realisiert werden. Alle Netzwerkelemente, die Teil der Netzwerkalternative sind, werden zu Lösungsraum  $L_2$  hinzugefügt. In Schritt 4.2 erfolgt die Berechnung einer neuen Lösung für das Zielsystem  $i$  und den angepassten Lösungsraum  $L_1$ . Ist der Zielfunktionswert der neuen Lösung kleiner als der Wert der in Schritt 3.3 feinbe-

## 6.2 Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums

---

werteten Lösung, so ist diese in Schritt 4.3 aus  $L_1$  zu entfernen und die potentiellen Netzwerkelemente zu  $L_2$  hinzuzufügen. Die Schritte 4.1 bis 4.3 können automatisiert von Computerprogrammen durchgeführt werden. Sobald der Zielfunktionswert der ermittelten Lösung den Wert der in Schritt 3.3 feinbewerteten Lösung übersteigt, sind alle Netzwerkelemente, die Teil der optimalen Lösung sein können, in den Lösungsraum  $L_2$  überführt.

Die im Lösungsraum  $L_2$  enthaltenen Netzwerkelemente sind in Schritt 4.4 einer von Experten durchzuführenden Grobbewertung zu unterziehen. Die Genauigkeit der Parametrierung muss dabei auf ein individuell im Einzelfall festzulegendes Niveau erhöht werden. Aufgrund der Prämisse einer initial zu positiven Parametrierung können sich die Parameter in diesem Schritt ausschließlich verschlechtern. Im Rahmen der Grobbewertung gilt weiterhin die Prämisse, dass die Parameter tendenziell zu positiv zu wählen sind. Aufgrund der genaueren Parametrierung des Lösungsraums erhöhen sich im Beispiel, wie im mittleren Diagramm in Abbildung 6.6 dargestellt, die Zielfunktionswerte der im Lösungsraum  $L_2$  enthaltenen Netzwerkalternativen b, e, h, j und k.

Analog zur Eingrenzung des Lösungsraums  $L_1$  auf  $L_2$  ist der neu parametrierte Raum  $L_2$  in den Schritten 4.5 und 4.6 auf den Lösungsraum  $L_3$  einzugrenzen. Im Beispiel übersteigen die Zielfunktionswerte der Lösungen e und k den Wert der feinbewerteten Lösung i (vgl. mittleres Diagramm in Abbildung 6.6). Dementsprechend sind alle ausschließlich in diesen beiden Netzwerkalternativen auftretenden potentiellen Netzwerkelemente kein Bestandteil von Lösungsraum  $L_3$ . Prozessschritt 4.7 dient zur Feinbewertung aller in  $L_3$  enthaltenen Netzwerkelemente. Auf Basis des in der erforderlichen Qualität parametrierten Lösungsraums  $L_3$  kann in einem abschließenden Optimierungslauf in Schritt 4.8 die optimale Netzwerkvariante für das Zielsystem  $ZS_i$  berechnet werden. Im gewählten Beispiel ist Lösung h die gesuchte optimale Netzwerkalternative (vgl. rechtes Diagramm in Abbildung 6.6).

Nach Abschluss des iterativen Prozesses für die definierten Zielsysteme liegen alle erforderlichen Netzwerkalternativen vor, die in den nächsten Prozessschritt der Bewertung übergeben werden können.

## **7 Fallbeispiel**

Dieses Kapitel dient zur Vorstellung der Pilotanwendung der entwickelten Methode in der unternehmerischen Praxis. Alle in den folgenden Abschnitten dargestellten Daten und Informationen sind aus einem realen Anwendungsfall entnommen, aus Gründen der Geheimhaltung jedoch in verfremdeter Form dargestellt. Dies betrifft neben den Charakteristika des Produktionsnetzwerks wie bspw. der Anzahl und Art der Produkte, der Marktnachfrage, der Standortanzahl, etc. vor allem auch jedwede Kostensätze. Aufgrund der verfremdeten Datengrundlage stellen die in den folgenden Abschnitten vorgestellten Ergebnisse keine allgemeingültigen Handlungsempfehlungen für reale Entscheidungssituationen dar und erlauben keinerlei Schlussfolgerung für die Weiterentwicklung des dem Anwendungsfall zugrunde liegenden Produktionsnetzwerks.

### **7.1 Pilotanwendung der entwickelten Methode**

Für die Pilotanwendung bildet das Produktionsnetzwerk für Verbrennungsmotoren eines Herstellers von Premiumautomobilen den Betrachtungsgegenstand. In diesem Netzwerk werden 3-, 4- und 6-Zylinder Reihenotto- und Reihendieselmotoren hergestellt. Die einzelnen Motoren unterscheiden sich neben der Zylinderanzahl durch die Einbaulage (längs bzw. quer) sowie durch Leistungsstufen und Ländervarianten. Das Produktionsnetzwerk besteht aus vier Produktionsstandorten für Motoren. Diese befinden sich in Deutschland, England, der Tschechischen Republik und China. Im Folgenden wird mit der Montage die letzte Stufe des Herstellungsprozesses betrachtet.

#### **7.1.1 Identifikation des Handlungsbedarfs**

Der Handlungsbedarf für die Weiterentwicklung des betrachteten Produktionsnetzwerks ergibt sich aus einer Veränderung der Umwelt des Netzwerks. Der sog. Brexit – dem geplanten Ausstieg Großbritanniens aus der EU – sowie geplante Gesetze zur Reduzierung der Schadstoffemissionen neu zugelassener PKW bilden die beiden Haupttreiber.

### 7.1.1.1 Brexit

Am 23. Juni 2016 stimmten die Wähler des Vereinigten Königreichs mehrheitlich für den Austritt aus der Europäischen Union. Der Verlust des freien Zugangs zum EU-Binnenmarkt sowie der Mitgliedschaft in der Europäischen Zollunion stellen mögliche Folgen dieses sog. Brexits dar (THEURER 2017). Dies würde zu maßgeblichen Veränderungen der Zollgesetzgebung zum Warenaustausch mit dem Vereinigten Königreich führen. Diese sind insbesondere vor dem Hintergrund des vorhandenen Produktionsstandortes in England von maßgeblicher Bedeutung für die Konfiguration des betrachteten Produktionsnetzwerks.

### 7.1.1.2 Emissionsgesetzgebung

Im Jahr 2009 wurde in der EU für PKWs eine CO<sub>2</sub>-Regulierung eingeführt. Diese legt fest, dass der durchschnittliche Ausstoß aller neu zugelassenen PKWs eines Herstellers einen gesetzlich vorgegebenen Grenzwert in Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer nicht überschreiten darf. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte drohen den Herstellern Strafzahlungen i. H. v. 95 € je Gramm Zielverfehlung und Fahrzeug (VDA 2016, S. 76-77). Daneben existieren innerhalb der EU Höchstgrenzen für den Ausstoß verschiedener weiterer Schadstoffe sowie Partikel. Die Obergrenzen unterliegen einer schrittweisen Verschärfung (UMWELTBUNDESAMT 2016). Zur weiteren Steigerung der Effizienz von Verbrennungsmotoren reagiert der betrachtete Automobil-OEM mit der Entwicklung einer neuen Motorengeneration. Im Rahmen der Netzwerkkonfiguration gilt es, diese in das Produktionsnetzwerk zu integrieren.

### 7.1.2 Definition der Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund des identifizierten Handlungsbedarfs besteht die übergeordnete Aufgabenstellung im Rahmen der Netzwerkkonfiguration in der Beantwortung der folgenden beiden zentralen Fragestellungen:

1. Welche Anpassung der zwischen England und den anderen Standorten aufgeteilten Produktionsaktivitäten sind aufgrund des Brexits erforderlich?
2. Wie gestaltet sich das optimale Integrationszenario für die Produkte der neuen Produktgeneration in das bestehende Netzwerk?

### 7.1.2.1 Definition des Aggregationsniveaus der Modellierung

Dieser Abschnitt gliedert sich in Anlehnung an die Ausführungen in Abschnitt 6.1.2.1 in die Festlegung der zeitlichen Auflösung des Entscheidungsproblems sowie die Definition der Netzwerkobjekte und des Produktportfolios.

**Zeitliche Auflösung des Entscheidungsproblems** Für den Einsatz von grundlegenden Änderungen an Produkten sowie Produktionsressourcen gilt bei dem betrachteten Automobilhersteller ein fest vorgegebenes zeitliches Raster. Jeder Quartalsbeginn markiert einen erlaubten Einsatzzeitpunkt. Als zeitliche Auflösung des Entscheidungsproblems wurde daher die Quartalsbetrachtung gewählt. Der Betrachtungszeitraum wurde auf sechs Jahre festgelegt.

**Definition des Aggregationsniveaus der Netzwerkobjekte** Die *Beschaffungsmärkte* für das bestehende Produktionsnetzwerk unterscheiden sich zwischen den Produktionsstandorten in der EU sowie dem Standort in China. Der Bezug von Kaufteilen für die europäischen Motorwerke erfolgt möglichst kostengünstig nach dem sog. *Best-Cost-Country* Prinzip. Aufgrund der geographischen Nähe der Produktionsstandorte in der EU beeinflusst die Netzwerkstruktur die Lieferantenauswahl nicht wesentlich. Da der Standort England als Beschaffungsmarkt darüber hinaus nur eine untergeordnete Rolle spielt, werden für die Modellierung des Entscheidungsproblems alle Lieferanten in einem virtuellen Beschaffungsmarkt zusammengefasst. In China sind bei der Lieferantenauswahl gesetzliche Regelungen zum *Local Content* zu beachten. Diese werden im Abschnitt zu Planungsrestriktionen betrachtet.

Der Produktionsumfang, der in einer *Produktionslinie* abgebildet wurde, umfasst die gesamte Motormontage. Jeder Motor soll zusammenhängend montiert werden, d. h. es sollen keine Zwischenerzeugnisse zwischen Produktionsstandorten oder Linien ausgetauscht werden. Eine Aufgliederung der Montageumfänge auf mehrere sequentiell zu durchlaufende Produktionslinien führt daher zu keinem zusätzlichen Erkenntnisgewinn und ist folglich nicht erforderlich.

Die Fahrzeugwerke des Automobilherstellers bilden die *Absatzmärkte* für das Produktionsnetzwerk für Verbrennungsmotoren. Zur Abbildung der wesentlichen Zolleffekte ist in diesem Zusammenhang eine detailliertere Betrachtung erforderlich.

Zollkosten für den zollregionenüberschreitenden Transport von Kaufteilen zu Motorwerken und von Verbrennungsmotoren zu Fahrzeugwerken können unmittelbar berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann das Ursprungsland des Motors aufgrund von Freihandelsabkommen die Höhe der zu entrichtenden Zollkosten für die Einfuhr von Fahrzeugen in gewissen Zollregionen beeinflussen. Viele Freihandelsabkommen der Europäischen Union erlauben bspw. einen zollfreien Warenaustausch, falls ein gewisser *Local Content Anteil* erreicht wird. Damit sich ein Fahrzeug als EU-Ursprungsware qualifiziert und damit mit reduziertem Zollsatz oder zollfrei in gewisse Märkte eingeführt werden kann, muss sich in vielen Fällen der zugehörige Motor als EU-Ursprungsware qualifizieren. Da die Zielmärkte der Fahrzeugwerke nicht Teil des betrachteten Produktionsnetzwerkes waren, war eine Anpassung der Modellierung erforderlich.

Für die korrekte Berücksichtigung der vom Ziel- und Ursprungsmarkt des Motors abhängigen Zollkosten für Fahrzeuge musste der Bedarf der Fahrzeugwerke nach Zielländern aufgeteilt werden. Länder mit gleichem Zollrecht konnten dabei zusammengefasst werden. Die realen Fahrzeugwerke wurden derart in mehrere virtuelle Fahrzeugwerke aufgeteilt, dass ein virtuelles Fahrzeugwerk jeweils nur noch Absatzmärkte mit gleichem Zollrecht versorgt. Im Fallbeispiel werden die Fahrzeugwerke, mit Ausnahme der Standorte in China, bis zum Vollzug des Brexits ausschließlich von EU-Motorwerken versorgt. Nach dem Brexit können für das Motorwerk in England so lange keine Freihandelsabkommen angewendet werden, bis das Vereinigte Königreich neue Abkommen abgeschlossen hat. Die realen Fahrzeugwerke wurden dementsprechend in zwei virtuelle Fahrzeugwerke aufgeteilt. Während das erste Zielmärkte mit EU-Freihandelsabkommen versorgt, beliefert das zweite alle anderen Märkte, bei denen das Ursprungsland des Motors keine zollrechtlichen Auswirkungen hat. Diese beiden Arten von Fahrzeugwerken wurden unterschiedlichen Zollregionen zugeordnet. In Abhängigkeit des Standorts des Motorwerks entstehen für den Transport der Motoren zu den Fahrzeugwerken Zölle, die bereits die Zollkosten für die Einfuhr der Fahrzeuge in die Zielmärkte beinhalten. Um den mit einer Verdopplung der Fahrzeugwerke einhergehenden Modellierungsaufwand zu vermeiden, wurden die europäischen als auch die in Übersee befindlichen virtuellen Fahrzeugwerke, die Zielmärkte mit EU-Freihandelsabkommen versorgen, zu jeweils einem Werk zusammengefasst. Für die relevanten Transportkosten und -zeiten für Motoren zu diesen Fahrzeugwerken wurden entsprechende Durchschnittswerte herangezogen. Die weiteren Fahrzeugwerke wurden unverändert im Modell berücksichtigt. In Abbildung 7.1 ist die Modellierung des in der Pilotanwendung betrachteten Produktionsnetzwerkes zusammenfassend visualisiert.

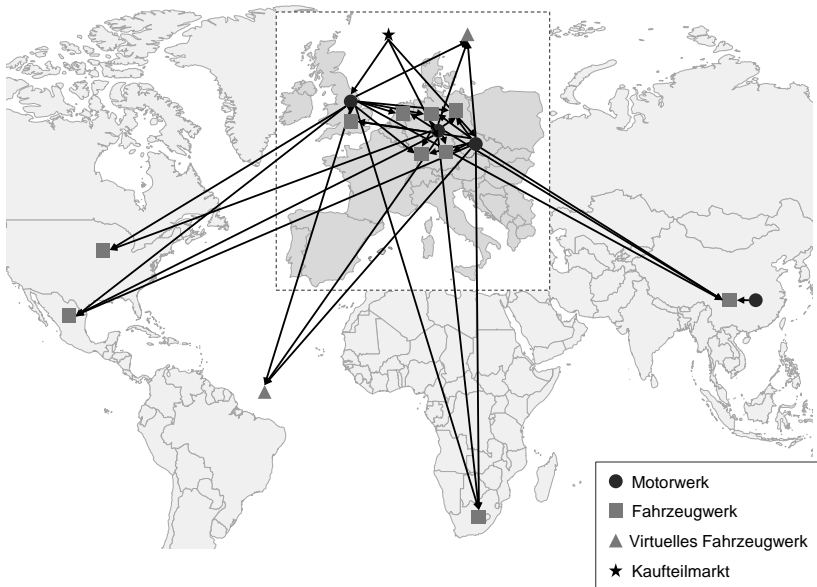


Abbildung 7.1: Modellierung des in der Pilotanwendung betrachteten Produktionsnetzwerks für Verbrennungsmotoren

**Definition des Aggregationsniveaus des Produktportfolios** Die vertikale Aufgliederung des betrachteten Produktportfolios für Reihenmotoren resultiert aus den getroffenen Festlegungen zu den Netzwerkobjekten. Dementsprechend ist für die Herstellung eines Verbrennungsmotors im Rahmen der Pilotanwendung lediglich ein virtuelles Kaufteil erforderlich, in dem alle realen Kaufteile zusammengefasst sind.

Zur Reduzierung der Modellkomplexität ist eine horizontale Segmentierung der Motoren erforderlich, die sich durch die Entwicklungsstufe, die Zylinderanzahl, die Kraftstoffart, die Einbaulage sowie durch die Leistungsstufe und Ländervariante unterscheiden. Da die Montageumfänge von Motoren, die sich lediglich durch die Leistungsstufe und/oder Ländervariante unterscheiden nur geringfügige Abweichungen aufweisen, werden diese zusammengefasst. Eine Ausnahme bildet die für den Quereinbau vorgesehene höchste Leistungsstufe des 4-Zylinder Reihenottomotors. Dieser Sondermotor wird aufgrund spezieller Montageumfänge separat betrachtet. Auf Basis dieser Festlegungen wird für die Produktbezeichnungen die in Tabelle 7.1 dargestellte Nomenklatur eingeführt.



## 7.1 Pilotanwendung der entwickelten Methode

Tabelle 7.1: Nomenklatur der Produktbezeichnungen

Stelle 1 Motorbauart	Stelle 2 Zylinderanzahl	Stelle 3 Kraftstoffart/Leistungsstufe	Stelle 4 Einbaulage	Stelle 5 Entwicklungsstufe
R: Reihenmotor	3	O: Benzin	L: längs	0
	4	D: Diesel	Q: quer	1
	6	T: Sondermotor		2

Die Motoren derselben Zylinderanzahl und Verbrennungsart bilden mit Ausnahme des Sondermotors eine Produktfamilie (Stellen 1-3 der Produktnomenklatur). Der Sondermotor bildet eine eigene Produktfamilie. Alle Motoren einer Entwicklungsstufe gehören einer Produktgeneration an (5. Stelle der Produktnomenklatur). Aus der horizontalen Segmentierung des Produktportfolios resultieren wie in Tabelle 7.2 dargestellt 32 Produkte, die in 7 Produktfamilien und 3 Produktgenerationen gegliedert sind. Bei den der Generation 3 zugehörigen Motoren handelt es sich um die neu in das Produktionsnetzwerk zu integrierenden Produkte.

Tabelle 7.2: Betrachtetes Produktportfolio

		Generation					Generation		
		Gen 1	Gen 2	Gen 3			Gen 1	Gen 2	Gen 3
Familie	R3D	R3DL0	R3DL1	R3DL2	Familie	R4O	R4OL0	R4OL1	R4OL2
		R3DQ0	R3DQ1	R3DQ2			R4DQ0	R4DQ1	R4DQ2
	R3O	R3OL0	R3OL1	R3OL2		R4T	R4TQ0	R4TQ1	
		R3OQ0	R3OQ1	R3OQ2		R6D	R6DL0	R6DL1	R6DL2
	R4D	R4DL0	R4DL1	R4DL2		R6O	R6OL0	R6OL1	R6OL2
		R4DQ0	R4DQ1	R4DQ2					

### 7.1.2.2 Auswahl der Entscheidungsdimensionen

Im Rahmen der Pilotanwendung wurde die Errichtung neuer Produktionsstandorte für Verbrennungsmotoren vor dem Hintergrund des prognostizierten Technologiewechsels hin zur Elektromobilität ausgeschlossen. Die Schließung von Produktionsstandorten und damit auch Produktionslinien ist im Hinblick auf den Brexit Teil des zu analysierenden Lösungsraums. Um den mit einer Standort- oder Linienschließung einhergehenden

## 7 Fallbeispiel

---

Kapazitätsverlust ausgleichen zu können, ist der Neubau von Produktionslinien an bestehenden Produktionsstandorten zu untersuchen. Da es sich bei den derzeit im Netzwerk vorhandenen Montagelinien um standardisierte Produktionslinien für Baukastenmotoren mit einer fest definierten Produktionskapazität handelt, ist von einem Linienaus- oder -rückbau aus strategischen Gründen abzusehen. Die Anpassung der Produktionskapazität von Produktionslinien kann ausschließlich durch eine Änderung des Betriebszeitmodells realisiert werden. Hinsichtlich der Anpassung der Befähigungen von Produktionslinien für Produkte, Produktfamilien und Produktgenerationen gelten aus strategischer Sicht keine Einschränkungen.

### 7.1.2.3 Ermittlung der Planungsrestriktionen

Für das Motorwerk in China gilt aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen die Prämisse, dass ausschließlich Motoren für das chinesische Fahrzeugwerk hergestellt werden dürfen. Darüber hinaus ist eine Versorgung dieses Fahrzeugwerks mit Motoren aus Europa nur für ausgewählte Motortypen erlaubt, die nicht lokal in China gefertigt werden. Für den Produktionsstandort für Verbrennungsmotoren in China bestehen daher keine Freiheitsgrade, die einen Beitrag zur Bewältigung des identifizierten Handlungsbedarfes leisten können. Aus diesem Grund wurde das chinesische Motorwerk aus der weiteren Netzwerkbeurteilung ausgeschlossen.

Bei der Einführung einer neuen Entwicklungsstufe von Verbrennungsmotoren werden nicht alle Fahrzeuge des betrachteten Automobilherstellers unmittelbar auf die neue Produktgeneration umgestellt. Aus diesem Grund besteht im Produktionsnetzwerk für Verbrennungsmotoren die Notwendigkeit, Motoren aus verschiedenen Generationen zeitgleich zu fertigen. Mit dem Ziel, die Komplexität von Produktionslinien zu begrenzen, wurde für alle Großserienproduktionslinien die Prämisse gesetzt, dass maximal zwei Produktgenerationen zur gleichen Zeit befähigt sein dürfen.

Weiterhin wurden die Motortypen R3DL1 und R3DL2 aus strategischen Gründen aus den Betrachtungen ausgeschlossen.

### 7.1.2.4 Auswahl der Zielgrößen

Für den betrachteten Automobilhersteller stellt der Kapitalwert für alle Entscheidungen die zentrale betriebswirtschaftliche Kennzahl dar, weshalb diese Zielgröße in das

Zielsystem aufgenommen wurde. Besonderes Augenmerk soll darüber hinaus auf die Minimierung des erforderlichen EAW zur Anpassung des Produktionsnetzwerks für Verbrennungsmotoren gelegt werden. Dies erklärt sich vor dem Hintergrund der bestehenden Ungewissheit zum Zeitpunkt des prognostizierten Technologiewandels hin zur Elektromobilität. Da hierdurch bereits eine Minimierung des Risikos von Investitionen erfolgt, wurde die Zielgröße Remanenzrisiko in der Folge aus dem Zielsystem ausgeschlossen. Die LAWs fließen in den Kapitalwert ein und es bestehen keine zusätzlichen gesonderten Bestrebungen zu deren Minimierung. Die Notwendigkeit zur gesonderten Betrachtung der zugehörigen Zielgröße war daher nicht gegeben. Die Integration einer neuen Produktgeneration geht mit zahlreichen Umbauten bestehender Produktionslinien einher. Trotz der erforderlichen Integrationsmaßnahmen soll die Versorgung der Fahrzeugwerke nicht gefährdet werden, weshalb die Lieferzuverlässigkeit in das Zielsystem aufgenommen wurde. Ungeachtet des langfristig erwarteten Rückgang der Nachfrage nach Verbrennungsmotoren kann es kurz- und mittelfristig dennoch zu erhöhten Bedarfen kommen. Zur Sicherstellung der Lieferfähigkeit sollte bei der Netzwerkkonfiguration daher ein Flexibilitätsziel verfolgt werden. Zur Vermeidung hoher Bestände in der Lieferkette sowie zur Gewährleistung einer hohen Reaktionsfähigkeit auf kurzfristige Anpassungen der Abliefersequenz wurde die Zielgröße Liefergeschwindigkeit in das Zielsystem integriert.

### 7.1.3 Verfahren zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums

Bei der Vorstellung der Pilotanwendung des Verfahrens zur Eingrenzung des impliziten Lösungsraums sollen die erzielten Ergebnisse im Vordergrund stehen. Dementsprechend sind die nachfolgenden Ausführungen nach den Ergebnistypen Lösungsraum, Zielsysteme und optimale Netzwerkalternativen gegliedert.

#### 7.1.3.1 Lösungsraum

Tabelle 7.3 zeigt die Struktur des erfassten Lösungsraums. Wie im Rahmen der Definition der Aufgabenstellung dargelegt, besteht das betrachtete Produktionsnetzwerk zur Herstellung des relevanten Produktportfolios aus den drei Produktionsstandorten in England (Werk 1), der Tschechischen Republik (Werk 2) und Deutschland (Werk 3). An den Standorten 1 und 2 ist jeweils eine Großserienlinie (1a und 2a) und eine Kleinserienlinie (1b und 2b) installiert. Der Standort 3 besteht aus derzeit drei Großserienlinien (3a, 3b,

## 7 Fallbeispiel

Tabelle 7.3: Übersicht zum erfassten Lösungsraum der Netzwerkconfiguration

		Generation																				
		Gen 1				Gen 2				Gen 3												
Familie	R3D	R3DL0				R3DL1				R3DL2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d														
		R3DQ0				R3DQ1				R3DQ2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d
	R3O	R3OL0				R3OL1				R3OL2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d
		R3OQ0				R3OQ1				R3OQ2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d
	R4D	R4DL0				R4DL1				R4DL2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d
		R4DQ0				R4DQ1				R4DQ2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d
	R4O	R4OL0				R4OL1				R4OL2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d
		R4OQ0				R4OQ1				R4OQ2												
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d
	R4T	R4TQ0				R4TQ1																
		1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d							
R6D	R6DL0				R6DL1				R6DL2													
	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	
R6O	R6OL0				R6OL1				R6OL2													
	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	1a	1b	2a	2b 3a	3b	3c	3d	

- Bestehende Linienbefähigung
- Potentielle Linienbefähigung
- Produkt außerhalb des Betrachtungsraums

3c) und kann um eine weitere Großserienlinie (3d) erweitert werden. Die Standortsecheidung für die potentielle Linie (3d) ist als vorläufig zu betrachten. Mit dem Ziel, den initialen Datenerhebungsaufwand zu reduzieren, wurde lediglich eine potentielle Produktionslinie berücksichtigt. Diese wurde standortunabhängig parametrisiert und dem gemäß subjektiver Experteneinschätzungen am besten geeigneten Standort zugeordnet. Ist die Errichtung dieser Linie Teil der optimalen Netzwerkalternative für ein Zielsystem, sind dem Lösungsraum potentielle Produktionslinien an den Standorten 1 und 2 hinzuzufügen und unter Berücksichtigung der individuellen Standortgegebenheiten zu parametrieren.

Für die 21 bereits in Produktion befindlichen Produkte der Generationen 1 und 2 stehen auf den vorhandenen Linien im Produktionsnetzwerk 46 Linienbefähigungen zur Verfügung. Für die 9 noch keiner Linie zugewiesenen neuen Motoren aus der Generation 3 bestehen auf Basis von Expertenangaben 32 potentielle Linienbefähigungen. Aufgrund des großen Gestaltungsspielraums hinsichtlich der neuen Produktionslinie 3d konnten dieser alle Produkte der Generation 3 zugewiesen werden. Darüber hinaus wurden im Hinblick auf mögliche Systemoptimierungen zusätzlich 8 potentielle Linienbefähigungen für bereits in Produktion befindliche Motoren angegeben.

### 7.1.3.2 Zielsysteme

Mit dem Ziel, die notwendigen Informationen zum Lösungsraum für die Parametrierung der Zielsysteme zu generieren, wurden für die ausgewählten Zielgrößen monokriterielle Optimierungsläufe durchgeführt. In [Abbildung 7.2](#) sind die bzgl. der einzelnen Ziele optimalen Netzwerkalternativen dargestellt.

Aus der Analyse der monokriteriell optimalen Netzwerkalternativen lassen sich drei wesentliche Erkenntnisse ableiten. Erstens wird die kapitalwertoptimale Lösung durch eine Produktionsverlagerung von England in die anderen Werke erreicht. Zweitens wird die einmalaufwandsoptimale Alternative durch Beibehalten der aktuellen Netzwerkstruktur in Kombination mit der Realisierung von nur 14 der 40 möglichen Linienbefähigungen realisiert. Drittens werden die Zielgrößen Flexibilität, Liefertreue und Lieferzeit erwartungsgemäß durch einen Kapazitätsausbau und der Realisierung zahlreicher Linienbefähigungen optimal. Da sich die Struktur des Produktionsnetzwerks zwischen den einzelnen Zielgrößen stark unterscheidet, wurde im Rahmen der Pilotanwendung entschieden, zwei Zielsysteme einzuführen, um dem Management zwei unterschiedlich gelagerte Netzwerkalternativen zur Entscheidung vorlegen zu können.

Um die Vergleichbarkeit der Zielsysteme zu gewährleisten, wurde für die Normierung der Zielgrößen auf die gleichen Parameter zurückgegriffen. Als Maximal- und Minimalwerte wurden zum einen die monokriteriell optimalen Werte und zum anderen die daraus abgeleiteten unteren bzw. oberen Schranken herangezogen. Dem ersten Zielsystem liegt die Annahme zugrunde, dass für Verbrennungsmotoren aufgrund des Technologiewandels hin zur Elektromobilität über den prognostizierten Bedarf hinaus keine Nachfragesteigerungen zu erwarten sind. Es sollte daher eine aus finanziellen Gesichtspunkten sehr gute Netzwerkalternative mit starkem Fokus auf die Zielgröße

## 7 Fallbeispiel

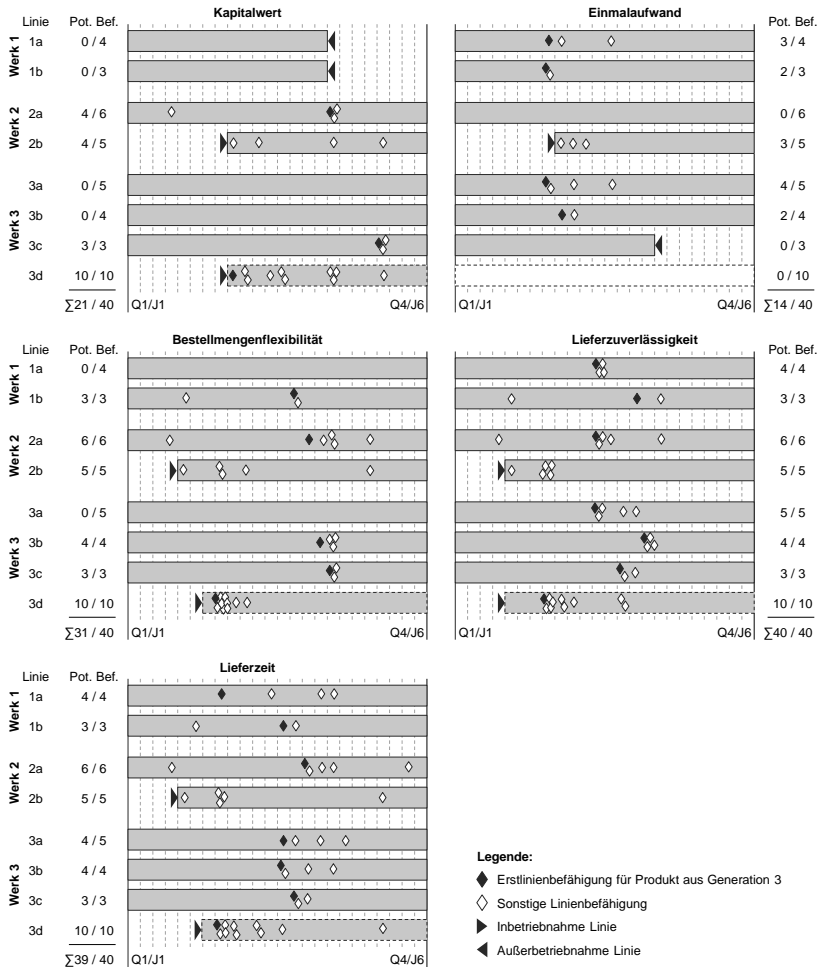


Abbildung 7.2: Übersicht zu den monokriteriell optimalen Netzwerkalternativen

EAW ermittelt werden. Die Zielwerte für die Nutzwerte der Größen Kapitalwert und EAW wurden durch die Entscheidungsträger in der Folge auf 0,9 bzw. 0,95 festgelegt und die zugehörigen Gewichtungsfaktoren auf 2 bzw. 3. Da das Kostenoptimum durch den Betrieb möglichst weniger Produktionslinien und die Realisierung einer geringen Anzahl von Linienbefähigungen erreicht wird, geht die Kostenoptimierung stark zu

Lasten der Versorgungssicherheit. In der Konsequenz wurde die Lieferzuverlässigkeit als zweiter Schwerpunkt eingeführt. Im Vergleich zur maximal realisierbaren Versorgungssicherheit konnten weitgehende Zugeständnisse gemacht werden und der Zielwert durch das Management auf 0,38 festgelegt werden. Durch den Gewichtungsfaktor 3 wurde sichergestellt, dass sich eine Abweichung von diesem niedrig angesetzten Zielwert deutlich in der Zielfunktion manifestiert. Das Ziel für die Liefergeschwindigkeit wurde auf 0,9 gesetzt. Da eine Abweichung von diesem Wert zugunsten der anderen Zielgrößen akzeptabel ist, wurde der Gewichtungsfaktor 1 gewählt. Das zweite Zielsystem sollte auf eine Netzwerkalternative führen, die aus finanziellen Gesichtspunkten gut ist und gleichzeitig die Erfüllung einer steigenden Marktnachfrage ermöglicht. Im Vergleich zum ersten Zielsystem wurde der Zielwert für den EAW durch die Entscheidungsträger daher auf 0,8 abgesenkt. Der anvisierte Nutzwert für die Bestellmengenflexibilität wurde mit 0,81 beziffert und die Zielgröße mit dem Gewichtungsfaktor 3 versehen und so auf eine Ebene mit dem EAW gestellt. Die Parameter der Liefergeschwindigkeit als untergeordnetem Ziel blieben im Vergleich zum ersten Zielsystem unverändert.

### 7.1.3.3 Optimale Netzwerkalternativen

Die Vorstellung der Ergebnisse aus der iterativen Ermittlung der optimalen Netzwerkvarianten für die beiden definierten Zielsysteme gliedert sich in drei Schritte. Der erste Abschnitt dient der Ergebnisplausibilisierung. In den Schritten zwei und drei werden die in Abschnitt 7.1.2 definierten zentralen Fragestellungen beantwortet.

**Ergebnisplausibilisierung** In nachfolgender Abbildung 7.3 sind für die beiden definierten Zielsysteme die erzielten Nutzwerte für die einzelnen Zielgrößen dargestellt. Während die optimale Netzwerkalternative für das erste Zielsystem (im folgenden als erste Handlungsalternative bezeichnet) den angestrebten Wert für die Größe Kapitalwert nahezu erreicht, sind für die anderen Zielgrößen, trotz teilweise höherer Gewichtung, deutliche Abweichungen von den Zielwerten zu verzeichnen. Bei den Zielsetzungen nach der Minimierung des EAW und Maximierung der Lieferzuverlässigkeit handelt es sich um konkurrierende Zielgrößen. Mit der Anzahl der realisierten Linienbefähigungen nimmt die Lieferzuverlässigkeit, jedoch auch gleichzeitig der EAW zu. Die daraus resultierende Notwendigkeit zur Abwägung zwischen diesen beiden Zielgrößen erklärt den deutlichen Abstand von den angestrebten Zielwerten trotz des hohen Gewichtungsfaktors. Die Größe Liefergeschwindigkeit steht in Konkurrenz zur Minimierung des EAW.

## 7 Fallbeispiel

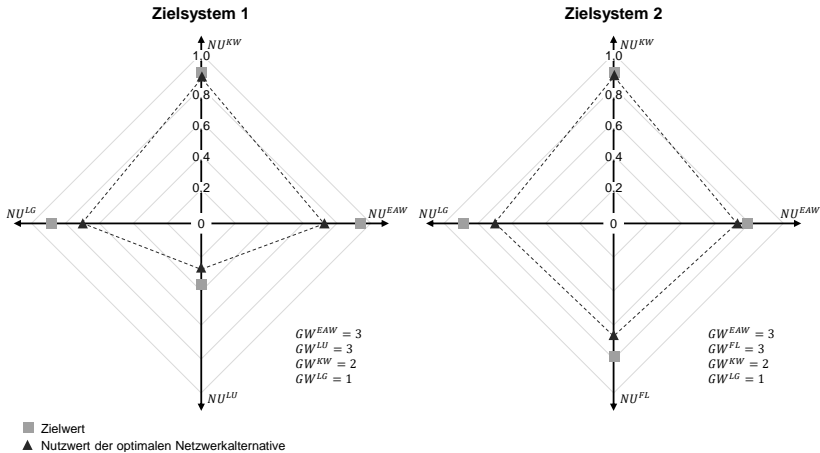


Abbildung 7.3: Erzielte Nutzwerte für die einzelnen Zielgrößen je Zielsystem

Zur Realisierung kurzer Lieferzeiten ist die Motorenproduktion in geographischer Nähe zu den Fahrzeugwerken erforderlich. Dies erfordert die Herstellung eines Motorentyps an mehreren Produktionsstandorten. Aufgrund des geringen Gewichtungsfaktors der Lieferspeed ergibt sich eine deutliche Abweichung vom Zielwert.

Der Zielwert für den Kapitalwert wird auch durch die optimale Lösung für das zweite Zielsystem (im folgenden als zweite Handlungsalternative bezeichnet) nahezu erreicht. Im Gegensatz zum ersten Zielsystem weist der Nutzwert für den EAW nur eine geringe Zielabweichung auf. Die Werte für die Zielgrößen Flexibilität und Lieferspeed zeigen deutliche Abweichungen vom anvisierten Zielwert. Da die Zielgrößen EAW und Flexibilität in direkter Konkurrenz stehen, ist eine Abwägung erforderlich. Die Auslastung aller in Betrieb befindlichen Montagelinien liegt im Betriebspunkt bei maximaler Ausbringung für die optimale Netzwerkalternative bei 99,66%. Eine weitere Erhöhung der Bestellmengenflexibilität kann daher nur durch die Realisierung einer Kapazitätserweiterung und nicht durch zusätzliche Linienbefähigungen erreicht werden. Vor dem Hintergrund, dass der entsprechende Ausbau mit sprungfixen Kosten einhergeht und sich negativ auf den EAW sowie den Kapitalwert auswirkt, erklärt sich, dass eine Kapazitätserweiterung nicht Teil der optimalen Netzwerkalternative ist. Die Begründung der Zielabweichung in Bezug auf die Größe Lieferspeed folgt den Ausführungen zum Zielsystem 1.



## 7.1 Pilotanwendung der entwickelten Methode

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Optimierungsmodell ein nachvollziehbares Verhalten zeigt und die Plausibilität der optimalen Netzwerkalternativen auf oberster Ebene bestätigt werden kann. In Abbildung 7.4 ist die resultierende Struktur der bezüglich der beiden Zielsysteme optimalen Netzwerkalternativen dargestellt.

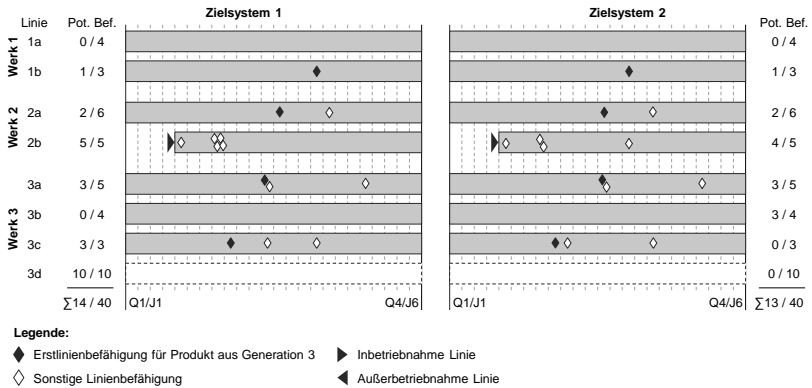


Abbildung 7.4: Übersicht zu den multikriteriell optimalen Netzwerkalternativen

Die Übersicht zu dem erzielten Ergebnis für die beiden Zielsysteme zeigt sehr deutlich, dass sich die ermittelten optimalen Netzwerkalternativen nur geringfügig unterscheiden. In beiden Fällen werden alle vorhandenen Montagelinien dauerhaft betrieben und die Errichtung der potentiellen Produktionslinie ist nicht vorgesehen. Die Anzahl der realisierten Linienbefähigungen unterscheidet sich mit 1 lediglich marginal. Dies erscheint ob der Verschiedenartigkeit der zugrundeliegenden Zielsysteme zunächst widersprüchlich. Ein Vergleich mit den in Abbildung 7.2 dargestellten monokriteriell optimalen Netzwerkalternativen zeigt, dass es sich bei der resultierenden multikriteriellen Netzwerkstruktur im Wesentlichen um eine Kombination von Elementen aus der kapitalwert- und einmalaufwandsoptimalen Lösung handelt. Die sehr gering ausfallenden Investitionstätigkeiten am Standort 1 gehen auf die Kapitalwertoptimierung zurück und die nicht vorgesehene Errichtung der potentiellen Produktionslinie ist ein Element der einmalaufwandsminimalen Netzwerkalternative. Die Ähnlichkeit der erzielten Lösung erklärt sich daher vor dem Hintergrund der in beide Zielsysteme einfließenden und hoch gewichteten Zielgrößen EAW und Kapitalwert.

### **Brexit: Anpassung der weltweiten Aufteilung der Produktionsaktivitäten**

Wie aus Abbildung 7.4 hervorgeht, ist die Schließung des Produktionsstandorts in England in keiner der optimalen Netzwerkalternativen vorgesehen. Beide an diesem Standort vorhandenen Produktionslinien werden im gesamten Betrachtungszeitraum betrieben. Die Investitionstätigkeiten in England fallen jedoch sehr gering aus. So wird für die Großserienlinie 1a keine der vier potentiellen Befähigungen realisiert. Lediglich auf dem Kleinserienband 1b ist mit der Implementierung der Befähigung für den Motor R6OL2 im dritten Quartal des vierten Betrachtungsjahres die Integration eines Produkts aus der neuen Produktgeneration vorgesehen. Die Realisierung dieser Befähigung ist darauf zurückzuführen, dass der EAW für die Produktintegration in ein Kleinserienband im Vergleich zu einem Großserienband deutlich geringer ausfällt. Gleichzeitig schlagen sich die mit der Produktallokation am Standort in England einhergehenden negativen Zollkosteneffekte aufgrund der Abzinsung der anfallenden Zahlungsströme auf den Beginn des Betrachtungszeitraums bei der Kapitalwertberechnung nur in verringerter Form nieder. Die Erklärung für das Zustandekommen der Linienbefähigung für den Motor R6OL2 legt nahe, dass diese Entscheidung bei einer rollierenden Überplanung der Netzwerkstruktur in den kommenden Jahren revidiert werden wird. Mit abnehmender Vorlaufzeit der Befähigung schlagen sich die negativen Zollkosteneffekte verstärkt im Kapitalwert nieder und anstelle der Befähigung des Kleinserienbandes 1b wird die Nutzung eines der Großserienbänder 2a oder 3b für den R6OL2 wirtschaftlich lukrativer. Neben diesen strukturellen Auswirkungen des Brexits zeigt der in Tabelle 7.4 dargestellte Vergleich der Kapazitätsauslastung der einzelnen Standorte einen weiteren, bereits kurzfristig wirkenden Effekt.

*Tabelle 7.4: Auslastung der Produktionsstandorte*

Produktionsstandort	Auslastung Handlungsalternative 1	Auslastung Handlungsalternative 2
Deutschland	93,1%	92,8%
Tschechien	100,0%	98,3%
England	39,1%	42,3%
Produktionsnetzwerk	84,8%	84,8%

Während die Werke in Deutschland und der Tschechischen Republik in den beiden optimalen Netzwerkalternativen Auslastungsgrade von deutlich über 90% aufweisen liegt die Auslastung des englischen Standortes bei lediglich ca. 40%. Die vorhandenen Linienbefähigungen im Netzwerk erlauben die vorwiegende Allokation der Bedarfe an

## 7.1 Pilotanwendung der entwickelten Methode

den wirtschaftlich vorteilhafteren Standorten in Deutschland und der Tschechischen Republik. Dies führt zu einer veränderten Standortrolle des englischen Werkes im Produktionsnetzwerk. Ausgehend von der Rolle als Volumenhersteller verändert sich der Standort hin zu einem Werk, welches lediglich das Überlaufvolumen aus anderen Standorten produziert und den Flexibilitätsvorhalt im Netzwerk bündelt. Das in Abbildung 7.5 für die zweite Handlungsalternative dargestellte Kapazitätschart für das Großserienband 1a verdeutlicht diese Funktion durch eine Gegenüberstellung der Belegung in den beiden Betriebspunkten gemäß prognostiziertem Bedarf und bei maximaler Ausbringung.

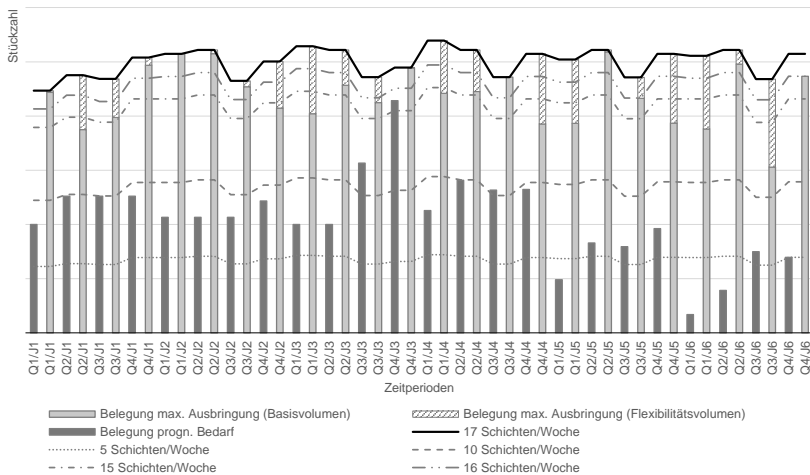


Abbildung 7.5: Kapazitätschart für das Großserienband 1a in den Betriebspunkten gemäß prognostiziertem Bedarf sowie bei maximaler Ausbringung

Bei betriebswirtschaftlich optimaler Produktion der prognostizierten Bedarfe zeigt sich die geringe Auslastung der Montagelinie. Wird aufgrund eines Nachfrageanstiegs die Maximierung der Ausbringung des gesamten Produktionsnetzwerks erforderlich, erlauben die bestehenden Linienbefähigungen mit Ausnahme des letzten Quartals eine vollständige Auslastung der Großserienlinie 1a.

Zusammenfassend kann das Fazit gezogen werden, dass der Brexit zwar zu keiner kurz- oder mittelfristigen Schließung des Werkes in England führt, jedoch nur geringfügige Investitionen an diesem Standort vorgesehen sind. Die Produktionsaktivitäten werden so schrittweise nach Deutschland und in die Tschechische Republik verlagert. Die Stand-

## 7 Fallbeispiel

ontrolle des englischen Werkes ändert sich bereits kurzfristig vom Volumenproduzenten hin zu einem Werk, welches das Überlaufvolumen aus anderen Standorten produziert und den Flexibilitätsvorhalt im Netzwerk bündelt.

**Integrationszenario für die Motoren der neuen Produktgeneration** Aus Abbildung 7.4 geht hervor, dass die Ausgestaltung des Integrationszenarios für die neue Produktgeneration nur unwesentlich vom Zielsystem abhängt. Die Ausführungen in diesem Abschnitt beschränken sich daher auf die erste Handlungsalternative. In Abbildung 7.6 ist das detaillierte Integrationszenario für die neue Entwicklungsstufe der Verbrennungsmotoren dargestellt.

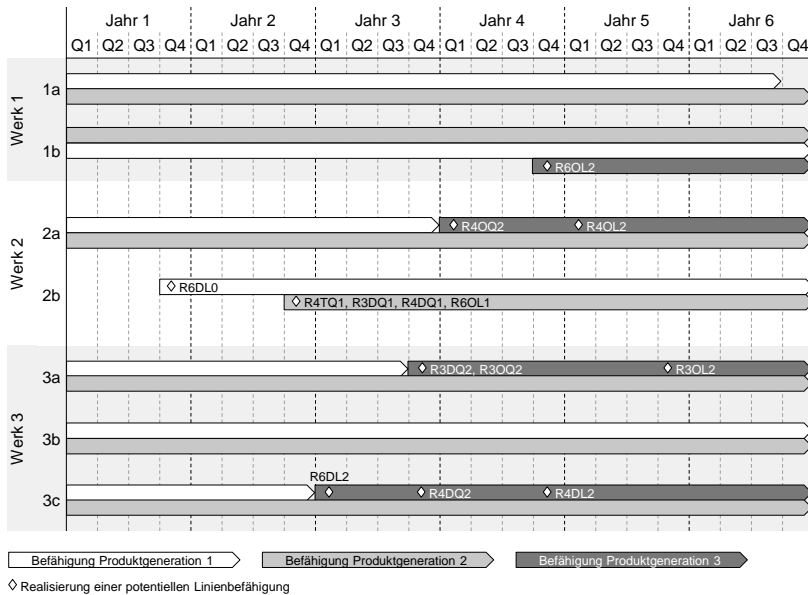


Abbildung 7.6: Integrationszenario für die Produkte der neuen Produktgeneration

Gemäß der geltenden Planungsrestriktionen sieht die Anlaufstufung der neuen Produktgeneration auf keinem Großserienband die Befähigung von 3 Produktgenerationen in der gleichen Zeitperiode vor. Mit der Befähigung für die Produktgeneration 3 endet daher zeitgleich die Fähigkeit der Produktionslinien, Motoren aus der ersten Entwicklungsstufe zu montieren. Zur Vermeidung synchroner Umbaumaßnahmen und den damit

## 7.1 Pilotanwendung der entwickelten Methode

---

verbundenen negativen Auswirkungen auf die Liefertreue werden die einzelnen Produktionslinien schrittweise für die Produkte aus der neuen Entwicklungsstufe befähigt. Die Voraussetzung für diese Optimierungsmaßnahme bildet der im Rahmen der Pilotanwendung gegebene gestaffelte Marktstart der neuen Verbrennungsmotoren. Die Integration der neuen Produktgeneration startet auf der Großserienlinie 3c in der Zeitperiode 9. Aufgrund der hierfür erforderlichen Umbaumaßnahmen sinkt die Kapazität der Produktionslinie in den Perioden 3 und 4 deutlich ab. Um die Versorgung der Fahrzeugwerke dennoch sicherstellen zu können, erfolgt eine Befähigung des Kleinserienbandes 2b für den bis dahin ausschließlich auf Linie 3c allokierten Motorentypen R6DLO in Periode 4. In den Zeitperioden 12 bzw. 13 erfolgt die Befähigung der Großserienlinien 3a und 2a für die neue Produktgeneration. Die hierzu notwendigen Umbaumaßnahmen erfordern die Verdrängung von Produktionsvolumen von diesen Linien auf andere Montagelinien. Angesichts der Auslastungssituation kann lediglich das Großserienband in England Volumen aufnehmen. Aufgrund der durch den Brexit verursachten wirtschaftlichen Nachteile ist jedoch eine Befähigung des Kleinserienbandes 2b am Standort in der Tschechischen Republik für die Motoren R3DQ1, R4DQ1 und R6OL1 in Periode 8 bzgl. des ersten Zielsystems die lohnendere Alternative. In der gleichen Zeitperiode erfolgt zur Reduzierung der Zollkosten, unabhängig von den Integrationsmaßnahmen für die neue Produktgeneration, die Verlagerung des Sondermotors R4TQ1 von der am Standort England befindlichen Großserienlinie 1a auf die Kleinserienlinie 2b in der Tschechischen Republik. Als letzte Linie wird im gewählten Betrachtungszeitraum wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, die Montagelinie 1b für ein Produkt der neuen Entwicklungsstufe befähigt.

Im Gegensatz zu den Produkten der Generationen 1 und 2 ist für die Motoren der neuen Generation keine Montage an mehreren Standorten vorgesehen. Dies führt zu einer Reduzierung des EAW, jedoch auch gleichzeitig zu Einbußen bzgl. der Liefertreue. Da der Berechnung der Bestellmengenflexibilität ein Bedarfswachstum bei konstantem Produktmix zugrunde liegt, kann aufgrund der singulären Produktbefähigungen der Fall eintreten, dass Flexibilitätseingänge auftreten, obwohl die Kapazität aller Produktionslinien nicht vollständig ausgeschöpft wird. Im gewählten Betrachtungszeitraum ist der Bedarf für Produkte aus den ersten beiden Entwicklungsstufen groß genug, um die erforderlichen Volumenverschiebungen zwischen den Produktionslinien vornehmen zu können. Für die Jahre nach dem im Rahmen der Pilotanwendung betrachteten Zeitraum kann zur Aufrechterhaltung der Flexibilität aufgrund einer Volumenzunahme der neuen Produkte die Realisierung weiterer Linienbefähigungen notwendig werden.

## 7 Fallbeispiel

Zusammenfassend wird eine gestaffelte Integration der Produkte aus der neuen Generation vorgenommen. Zum Ausgleich für die durch Umbaumaßnahmen verursachten Kapazitätsverluste werden zusätzliche Befähigungen des Kleinserienbandes 2b vorgenommen. Die Produktion der neuen Verbrennungsmotoren ist im Gegensatz zu den Produktgenerationen 1 und 2 jeweils nur noch auf einer Montagelinie vorgesehen.

### 7.1.4 Bewertung

Aufgrund der großen Ähnlichkeit der beiden Handlungsalternativen stand nicht ein tiefgehender Vergleich der Netzwerke sondern die kritische Überprüfung der Lösungen aus operativer Sicht im Fokus. Dementsprechend wurden gemäß der Ausführungen zum Konzept der selektiven Kennzahlen für GPN in Abschnitt 6.1.1.1 die potentiellen Engpassbereiche des resultierenden Produktionsnetzwerks in den Dimensionen Komplexität und Dynamik der Produktionslinien sowie Transportrelationen analysiert.

**Komplexität der Produktionslinien** Als Metrik für die Bewertung der Komplexität der Produktionslinien wurde die durchschnittliche Anzahl der aktiven Linienbefähigungen pro Montagelinie herangezogen. Abbildung 7.7 zeigt die zeitliche Entwicklung dieser Metrik für die zweite Handlungsalternative getrennt nach Groß- und Kleinserienlinien.

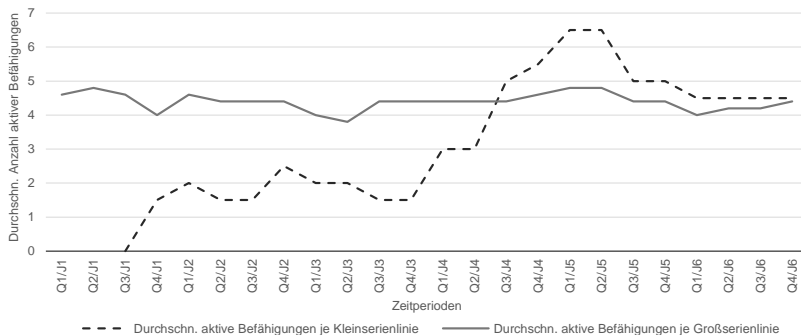


Abbildung 7.7: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl der aktiven Linienbefähigungen pro Montagelinie

## 7.1 Pilotanwendung der entwickelten Methode

Aus Abbildung 7.7 geht hervor, dass die durchschnittliche Anzahl der aktiven Linienbefähigungen pro Montagelinie für die Großserienlinien im Betrachtungszeitraum nahezu konstant bleibt. Für die Kleinserienlinien nimmt dieser Wert aufgrund der Integrationsmaßnahmen zunächst stark zu. Zum Ende des betrachteten Zeitraums hin pendelt sich der Wert auf dem Niveau der Großserienlinien ein. Für die erste Handlungsalternative zeigt sich ein analoges Verhalten, weshalb auf weitere Erläuterungen verzichtet wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Komplexität der Großserienlinien aufgrund der vorgesehenen Maßnahmen im Vergleich zum Ausgangszustand nicht wesentlich verändert. Die Anzahl der durchschnittlich aktiven Linienbefähigungen auf den Kleinserienlinien pendelt sich im Betrachtungszeitraum auf dem Niveau der Großserienlinien ein.

**Dynamik der Produktionslinien** Die Dynamik der Produktionslinien wird mittels der durchschnittlichen Veränderung des Produktionsvolumens im Vergleich zum vorhergehenden Quartal gemessen. Die Ergebnisse für diese Kennzahl sind in Tabelle 7.5 dargestellt.

*Tabelle 7.5: Durchschnittliche Veränderung des Produktionsvolumens im Vergleich zum vorhergehenden Quartal je Montagelinie im Betrachtungszeitraum*

		Wert für Handlungsalternative 1	Wert für Handlungsalternative 2
Werk 1	1a	24,8%	31,2%
	1b	20,1%	20,7%
Werk 2	2a	8,2%	8,2%
	2b	2,0%	5,7%
Werk 3	3a	7,9%	7,9%
	3b	5,7%	5,7%
	3c	11,9%	4,6%

Im Vergleich zu den Werken in Deutschland und der Tschechischen Republik weisen die Produktionslinien am Standort England bei beiden Handlungsalternativen eine deutlich größere durchschnittliche Veränderung des Produktionsvolumens auf. Für die Großserienlinie 1a ist dieser Effekt auf die neue Standortrolle zurückzuführen. Da überwiegend das Überlaufvolumen aus anderen Produktionslinien in England allokiert wird, schlagen

## 7 Fallbeispiel

---

sich sowohl Kapazitätsschwankungen von Produktionslinien an den anderen Standorten als auch Nachfrageschwankungen der Fahrzeugwerke auf der Montagelinie 1a in England nieder. Die deutlichen Volumenschwankungen auf der Kleinserienlinie sind bedingt durch einzelne Produktanläufe. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die für die beiden Handlungsalternativen exakt gleichen Werte für die Linien 2a, 3a und 3b aus einer vollständigen Linienauslastung im gesamten Betrachtungszeitraum resultieren. Die Volumenschwankungen sind ausschließlich durch Kapazitätsschwankungen auf den Produktionslinien bedingt. Als Reaktion auf die kritisch zu betrachtenden Schwankungen des Produktionsvolumens auf der Großserienlinie 1a sind Maßnahmen zur Bewältigung dieser Dynamik zu erarbeiten. Eine Glättung des Produktionsvolumens ist aufgrund der damit einhergehenden betriebswirtschaftlichen Nachteile so weit wie möglich zu vermeiden.

**Komplexität der Transportrelationen** Die durchschnittliche Anzahl der von einem Motorwerk versorgten Fahrzeugwerke bildet die Metrik für die Bewertung der Komplexität der Transportrelationen. Berücksichtigt werden hierbei auch die Transportrelationen zu den im Hinblick auf die korrekte Bestimmung der Zollkosten eingeführten virtuellen Fahrzeugwerken (vgl. 7.1.2.1). Zu Beginn des Betrachtungszeitraums liegt der Wert bei 7,3. Die Maßnahmen zur Realisierung der Handlungsalternativen führen zu einem Anstieg dieses Wertes auf 11,3 bzw. 10,3. Parallel zur Implementierung der final ausgewählten Handlungsalternative sind in der Konsequenz Maßnahmen zur Bewältigung der steigenden Abstimmungsbedarfe mit den Fahrzeugwerken zu ergreifen.

**Dynamik der Transportrelationen** Für die Bewertung der Dynamik der Transportrelationen wird die Anzahl der in den einzelnen Perioden im Betrachtungszeitraum neu zu errichtender Relationen herangezogen. Unter einer Transportrelation wird dabei die Kombination aus Montagelinie, Fahrzeugwerk und Produkt verstanden. Im Rahmen der Realisierung beider Handlungsalternativen sind in einzelnen Perioden bis zu 35 neue Transportrelationen zu errichten. Diese Anpassungen der Transportbeziehungen sind für die Funktionsweise der geplanten Produktionsnetzwerke unabdingbar und sind daher frühzeitig im Projekt zur Realisierung einer Handlungsalternative zu berücksichtigen.



### 7.1.5 Auswahl

Mit Abschluss der Bewertung der ermittelten optimalen Handlungsalternativen stehen die erforderlichen Informationen für die Auswahl der zu realisierenden Netzwerkalternative durch das zuständige Unternehmensgremium zur Verfügung.

## 7.2 Erkenntnisse aus der Pilotanwendung

Im Rahmen der Pilotanwendung konnte gezeigt werden, dass mit der entwickelten Methode in der unternehmerischen Praxis Entscheidungsempfehlungen zur Weiterentwicklung bestehender Produktionsnetzwerke erarbeitet werden können. Mit der in sieben Hauptschritte gegliederten Vorgehensweise konnte der Gesamtprozess der Netzwerkkonfiguration strukturiert, vollständig und systematisch bearbeitet werden. Das entwickelte Optimierungsmodell bildete das zentrale Hilfsmittel zur analytisch anspruchsvollen Identifikation der optimalen Netzwerkalternativen für die festgelegten Zielsysteme im implizit definierten Lösungsraum. Die folgenden Aspekte stellen die drei im Zuge der Pilotanwendung identifizierten Hauptherausforderungen bei der Anwendung der entwickelten Methode dar:

1. Das Erzeugen eines konsistenten Datenmodells für die Netzwerkkonfiguration nach der Erhebung der relevanten Daten in der Softwareumgebung Microsoft Access hat sich als sehr zeitaufwändige Aufgabe erwiesen. Bereits kleine Fehler im Datenmodell führten zu unlösbaren Optimierungsmodellen. Die Fehlersuche gestaltete sich aufgrund der vielfältigen Fehlermöglichkeiten sowie des Umfangs der Eingangsdaten hoch komplex und langwierig.
2. Die Parametrierung der Zielsysteme für das Verfahren der Zielprogrammierung stellt trotz der mittels monokriterieller Optimierungsläufe generierten Informationen zum Lösungsraum eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Zielsysteme können ob des Zusammenspiels zahlreicher Parameter nur schwer analytisch durchdrungen werden. Die Generierung eines anspruchsvollen und ausgewogenen Zielsystems in der Praxis erfordert daher im Regelfall eine iterative Vorgehensweise.
3. In Abhängigkeit der gewählten Parameter ergeben sich für die Lösung der Optimierungsmodelle mit handelsüblichen Rechnern mitunter Laufzeiten, die mehrere Tage umfassen. Dies führt aufgrund der langen Wartezeiten zu Beeinträchtigungen im Prozess der Netzwerkkonfiguration.

## 8 Bewertung der Methode

Die in Kapitel 7 vorgestellte Pilotanwendung der entwickelten Methode zur Konfiguration GPN hat auf plausible und gute Ergebnisse geführt. Damit konnte die Anwendbarkeit der Methode in der unternehmerischen Praxis bestätigt werden. Die folgenden Abschnitte dienen zur tiefergehenden Bewertung der Allgemeingültigkeit der Methodengüte.

### 8.1 Bewertung der Zielerreichung

Im Hinblick auf die bestehenden Defizite bei der Netzwerkkonfiguration (vgl. Abbildung 1.1) bestand das Forschungsziel in der Optimierung des Prozessablaufs der Netzwerkkonfiguration bei gleichzeitiger Erhöhung der erreichbaren Lösungsqualität. Zur Erreichung dieser Zielsetzung wurde ein kombinierter Ansatz gewählt, in welchem die Stärken bestehender Prozessmodelle mit den Vorzügen der multikriteriellen Optimierung kombiniert wurden.

**Optimierung des Prozessablaufs der Netzwerkkonfiguration** Die zum allgemeinen Prozessmodell der Entscheidungsfindung konforme Methode wurde so konzeptioniert, dass sich das analytische Kernelement der Methode, das multikriterielle Optimierungsmodell zur Entwicklung von Handlungsalternativen, nahtlos in alle Prozessschritte einfügt. So ist bspw. die Präzisierung von Zielsystemen entgegen bestehender Prozessmodelle nach der Analyse des implizit definierten Lösungsraums durch monokriterielle Optimierungsläufe vorgesehen. Erst die hiermit gewonnenen Erkenntnisse erlauben die fundierte Parametrierung von Zielsystemen für den Einsatz des Verfahrens der Zielprogrammierung. Aufgrund der fehlenden intuitiven Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse von Optimierungsmodellen wurde der Einsatzzweck des entwickelten Modells im Gegensatz zum Stand der Technik angepasst. Mit dem multikriteriellen Optimierungsmodell wird nicht unmittelbar das finale Ergebnis ermittelt, sondern es unterstützt den Netzwerkplaner bei der Erzeugung von optimalen Handlungsalternativen für verschiedene Zielsysteme. Das mathematische Modell wurde auf

diese Art und Weise so in die Methode zur Netzwerkkonfiguration eingefügt, dass die prozessualen Anforderungen trotz der analytischen Komplexität des Modells erfüllt werden. Darüber hinaus wird durch ein iteratives Verfahren zur Erhebung, Parametrierung und Eingrenzung des impliziten Lösungsraums der erforderliche Zeitaufwand zur Datenerfassung reduziert. Das bestehende Einsparpotenzial ist im Einzelfall abhängig von der Struktur des Lösungsraums sowie der Höhe der Abweichung der initialen Expertenschätzungen von den tatsächlichen Parameterwerten.

**Erhöhung der erreichbaren Lösungsqualität** Die erzielte Erhöhung der erreichbaren Lösungsqualität beruht im Wesentlichen auf der Behebung der Unzulänglichkeiten bestehender Optimierungsmodelle. Erstens ist im entwickelten Modell die modulare Struktur heutiger Produktportfolios berücksichtigt. Zweitens werden die mit der Anpassung bestehender Netzwerkelemente einhergehenden Kapazitätsverluste berücksichtigt. Drittens erlaubt die simultane Betrachtung von drei Betriebspunkten in einem Optimierungslauf eine präzisere Modellierung der Metriken für die Bewertung der einzelnen Zielgrößen. Zusammenfassend ergibt sich eine verbesserte Abbildungsgenauigkeit des Entscheidungsproblems und damit eine Erhöhung der erreichbaren Lösungsqualität.

**Fazit** Durch die Kombination und Weiterentwicklung der Stärken von Prozessmodellen und multikriteriellen Optimierungsmodellen zur Netzwerkkonfiguration leistet die entwickelte Methode einen Beitrag zur Verbesserung des Prozessablaufs der Netzwerkkonfiguration bei gleichzeitiger Erhöhung der erreichbaren Lösungsqualität.

## 8.2 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Ungeachtet der erzielten Verbesserungen gegenüber bestehenden Ansätzen gilt es, die Wirtschaftlichkeit der Anwendung der entwickelten Methode zu bewerten.

### 8.2.1 Aufwand

Der monetäre Aufwand für die Methodenanwendung kann in die drei Kategorien Methodenimplementierung, übergreifende Durchführung und Steuerung der Anwendung sowie Datenerhebung gegliedert werden. Tabelle 8.1 beinhaltet eine Grobabschätzung für die wesentlichen Kostentreiber.

## 8 Bewertung der Methode

*Tabelle 8.1: Kostenbewertung einer einmaligen Methodenanwendung*

Beschreibung	Mitarbeiterkostensatz	Anzahl	Kosten
Beschaffung Softwarelizenz	-	1	100.000 €
Modellimplementierung	150.000 €/PJ	0,5 PJ	75.000 €
Hauptverantwortliche Methodenanwendung	150.000 €/PJ	1 PJ	150.000 €
Begleitendes Projektmanagement	80.000 €/PJ	1 PJ	80.000 €
Datenerfassung zum IST-Netzwerk: 5 PT je Linie	120.000 €/PJ	7 Linien	19.091 €
Erhebung pot. NE: 1 PT je Linie	120.000 €/PJ	7 Linien	3.818 €
Erhebung der techn. Parameter: 0,5 PT je pot. NE	120.000 €/PJ	40 pot. NE	10.909 €
Erhebung des Kostenmodells: 0,5 PT je pot. NE	120.000 €/PJ	40 pot. NE	10.909 €
Machbarkeitsuntersuchung: 0,5 PT je pot. NE	120.000 €/PJ	20 pot. NE	10.909 €
Feinbewertung: 5 PT je pot. NE	120.000 €/PJ	20 pot. NE	54.545 €
<b>Summe</b>			<b>515.182 €</b>

Legende: PT: Personentag PJ: Personenjahr NE: Netzwerkelement

Für die Methodenimplementierung wird im Rahmen der Kostenabschätzung der Einsatz einer frei am Markt verfügbaren Software für die Erstellung und Anwendung von Optimierungsmodellen wie bspw. das *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* der Firma *IBM* angesetzt. Die damit verbundenen Kosten sind im Wesentlichen abhängig vom gewählten Lizenztyp sowie der erforderlichen Anzahl an Lizenzen. Da der Prozess der Netzwerkkonfiguration auch in großen Konzernen wenigen Experten obliegt, wird für die Kostenabschätzung eine Serverlizenz angesetzt.

Der Aufwand für die Implementierung des mathematischen Modells sowie der zugehörigen Datenbankstruktur wird auf 0,5 PJ beziffert. Für die Anwendung der Methode ist ein Experte bzw. eine kleine Gruppe von Experten zu definieren, die den Gesamtprozess von der Identifikation des Handlungsbedarfs über die Durchführung von Optimierungsläufen bis hin zur Vorlage der ermittelten Netzwerkalternativen in den Entscheidungsgremien verantworten. Für eine einmalige Anwendung der Methode wird der Aufwand auf ein Personenjahr beziffert. Darüber hinaus wird für das begleitende Projektmanagement zur Organisation und Durchführung von Workshops sowie zur Datenaufbereitung ebenfalls ein Personenjahr in der Kostenabschätzung berücksichtigt.

In die Datenerfassung sind die Personen einzubeziehen, welche die einzelnen Netzwerkelemente verantworten. Der hierfür erforderliche Zeitaufwand ist abhängig von der Größe des betrachteten Produktionsnetzwerks. In Tabelle 8.1 ist beispielhaft der Aufwand für das im Rahmen der Pilotanwendung betrachtete Netzwerk angegeben.

In Summe ergibt sich für die einmalige Anwendung der Methode auf ein Produktionsnetzwerk, dessen Größe in etwa dem Umfang dem im Rahmen der Pilotanwendung betrachteten Netzwerk entspricht, ein Aufwand i. H. v. ca. 0,5 Mio. €. Der Aufwand für die Methodenanwendung in kommenden Planungszyklen nimmt deutlich ab. Zum einen werden für die Softwarelizenz nach der erstmaligen Anschaffung nur Wartungskosten i. H. v. ca. 20% des Anschaffungspreises fällig und der EAW zur Modellimplementierung entfällt. Zum anderen können zahlreiche bei der Erstanwendung erhobene Daten zum IST-Produktionsnetzwerk sowie zu potentiellen Netzwerkelementen wiederverwendet werden.

### 8.2.2 Nutzen

Der quantitative Nutzen der entwickelten Methode besteht in der Vermeidung von Fehlentscheidungen und damit einhergehenden ungenutzten Potenzialen bei der Netzwerkkonfiguration. Durch den Einsatz eines mathematischen Optimierungsmodells kann für jedes Zielsystem die optimale Lösung unter Berücksichtigung des gesamten Lösungsraums identifiziert werden. Erfolgt die Auswahl der zu untersuchenden Handlungsalternativen in einem manuellen Prozess, hängt die Güte der gefundenen Lösung stark von der Expertise des zuständigen Mitarbeiters sowie vom Zufall ab. In folgendem Diagramm (Abbildung 8.1) sind neben der im Rahmen der Pilotanwendung identifizierten optimalen Lösung für das zweite Zielsystem weitere gültige, jedoch nicht optimale Lösungen dargestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um alle gültigen Lösungen handelt. Um einen monetären Vergleich mit dem bewerteten Aufwand zu ermöglichen, sind in Abbildung 8.1 neben dem Zielfunktionswert zudem die Abweichungen der einzelnen Lösungen vom Optimum in der Einheit € angegeben. Als Metrik für die zugehörige Umrechnung wurde die monetäre Bedeutung einer Abweichung vom Zielwert für die Größe EAW herangezogen.

Als quantitativer Nutzen der entwickelten Methode werden die vermiedenen Mehrkosten durch suboptimale Entscheidungen aufgrund einer nicht vollständigen Durchsuchung des Lösungsraums herangezogen. Im Falle einer Realisierung der in Abbildung 8.1 enthaltenen zweitbesten Lösung nach einer manuellen Lösungsfindung, d. h. ohne Einsatz der entwickelten Methode, beträgt der quantitative Nutzen daher ca. 220.000 €. Bei einer Umsetzung der Lösung 3, 4 bzw. 5 beläuft sich der Nutzen der entwickelten Methode dementsprechend auf ca. 4,3 Mio. €, 46,7 Mio. € bzw. 47,2 Mio. € (vgl. Abbildung 8.1).

## 8 Bewertung der Methode

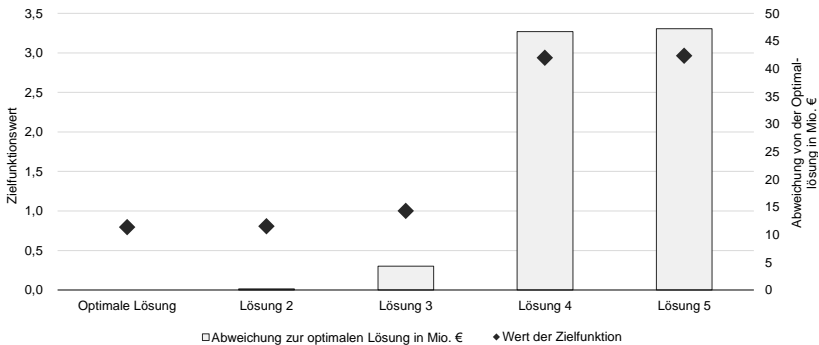


Abbildung 8.1: Bewertung des Nutzens der Methode zur Konfiguration GPN

### 8.2.3 Verallgemeinerte Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Vor einer Anwendung der entwickelten Methode in der unternehmerischen Praxis gilt es, zwischen dem erforderlichen Aufwand und dem erzielbaren Nutzen des Methodeneinsatzes abzuwägen. Da die vorgestellte Methode aufgrund der erzielten Fortschritte eine höhere Wirtschaftlichkeit als bestehende Ansätze zur Netzwerkkonfiguration aufweist (vgl. Abschnitt 8.1), ist hierfür der Vergleich einer manuellen Lösungsfindung mit einer Anwendung der entwickelten Methode ausreichend.

Im Rahmen des Fallbeispiels hätten durch eine manuelle Lösungsfindung im Vergleich zur vollständigen Durchsuchung des Lösungsraums insgesamt Kosten i. H. v. ca. 0,25 Mio. € für die Softwarelizenz, die Modellimplementierung sowie für Teile der Datenerfassung eingespart werden können. Dieser Einsparung steht ein Risiko aufgrund ungenutzten Potenzialen i. H. v. von bis zu 47,2 Mio. € gegenüber. Beinhaltet die manuell ermittelte Lösung bspw. eine zusätzliche Linienbefähigung im Vergleich zur berechneten optimalen Handlungsalternative, so werden die erzielten Einsparungen i. H. v. ca. 0,25 Mio. € um den Faktor zwei überstiegen. Damit die manuelle Lösungsfindung die gleiche oder eine bessere Wirtschaftlichkeit wie die Anwendung der entwickelten Methode aufweist, muss durch die manuelle Lösungsfindung eine Handlungsalternative ermittelt werden, deren Zielfunktionswert um weniger als 1,5% von der optimalen Lösung abweicht. Da diese Genauigkeit durch einen manuellen Prozess ohne vollständige Durchsuchung des Lösungsraums nicht gewährleistet werden kann, ist die Anwendung der entwickelten Methode einer manuellen Lösungsfindung vorzu-

### 8.3 Notwendige Voraussetzungen und bestehende Limitationen

---

ziehen. Diese Schlussfolgerung muss lediglich für Netzwerkoptimierungsprobleme mit sehr wenigen potentiellen Netzwerkelementen und sehr einfachen Zielsystemen eingeschränkt werden. Ist die optimale Lösung aufgrund eines sehr kleinen Lösungsraums ohne analytische Hilfsmittel zu identifizieren, ist ein Verzicht auf die Anwendung der entwickelten Methode wirtschaftlich. In der unternehmerischen Praxis spielen derartige Netzwerkoptimierungsprobleme eine untergeordnete Rolle, da i. d. R. zahlreiche Weiterentwicklungsoptionen für ein bestehendes Netzwerk zur Verfügung stehen.

### 8.3 Notwendige Voraussetzungen und bestehende Limitationen

Für die Realisierung der dargestellten allgemeinen Vorteilhaftigkeit der Methodenanwendung sind die folgenden Grenzen der Anwendbarkeit sowie wesentlichen Limitationen zu berücksichtigen.

- *Industrieller Anwendungsbereich:* Aufgrund der fehlenden Modellierung des Emissionshandels ist die entwickelte Methode nur bedingt für energieintensive Industrien geeignet. Ebenso ist die Anwendung bei einer stark politisch motivierten Netzwerkgestaltung nur eingeschränkt möglich, da politische Aspekte lediglich durch die Vorgabe potentieller Netzwerkelemente nicht jedoch in den Metriken der Zielgrößen berücksichtigt werden können. Im Bereich der Nahrungsmittelindustrie sind Einschränkungen gegeben, falls Vorgaben bzgl. der maximalen Durchlaufzeit einzelner Produktbestandteile bestehen.
- *Zeitliche Implikationen:* Die vorgestellte Methode weist aufgrund der fehlenden Modellierung von Entwicklungsaktivitäten keine umfassende Eignung für Technologien in frühen Entwicklungsstadien auf. Ebenso können taktische Fragestellungen wie bspw. die Auswahl von Transportmodi nicht umfassend beantwortet werden.
- *Prozessuale Voraussetzungen:* Für die vollständige Realisierung der Vorteile des entwickelten mathematischen Optimierungsmodells zur Netzwerkkonfiguration ist eine hohe Qualität bei der Beschreibung des Lösungsraums erforderlich. Bei einer unvollständigen oder stark fehlerbehafteten Parametrierung des Lösungsraums kann die Optimalität der unter Einsatz des Optimierungsmodells ermittelten Lösung – analog zur manuellen Alternativenentwicklung – nicht gewährleistet werden.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Internationalisierung der Wertschöpfungsaktivitäten ist unabdingbar für die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen. GPN ermöglichen die Realisierung von Kostensenkungspotenzialen, die Erschließung neuer Absatz- und Zuliefermärkte, die Überwindung von Handelshemmnissen, die Eindämmung von Währungsrisiken sowie den globalen Zugang zu Fachkräften. Die mit einem GPN verfolgten Ziele unterliegen aufgrund des volatilen, unsicheren und komplexen Umfelds einem stetigen Wandel. Gepaart mit den durch die voranschreitende Globalisierung hervorgerufenen Megatrends resultiert die Notwendigkeit, auch einst effiziente GPN permanent anzupassen und weiterzuentwickeln. Folglich ist die Kompetenz zur Gestaltung globaler Wertschöpfungsnetzwerke von zentraler Bedeutung für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen auf dem Weltmarkt.

Die Netzwerkkonfiguration ist sowohl von hoher prozessualer als auch analytischer Komplexität geprägt. Erstere meint die Herausforderungen in Bezug auf die Prozessschritte, die für das Herbeiführen einer Entscheidung für eine Lösungsalternative innerhalb eines Unternehmens erforderlich sind. Zweitere hingegen beschreibt Faktoren, welche die logische Durchdringung und Bewertung eines Produktionsnetzwerks sowie der zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen erschweren. Diese Herausforderungen beeinträchtigen den Lösungsprozess der Netzwerkkonfiguration sowie die erreichbare Lösungsqualität und hindern Unternehmen an der vollumfänglichen Realisierung der Potenziale GPN. Kein bestehender Ansatz der wissenschaftlichen Literatur wird den Anforderungen aus der prozessualen und analytischen Komplexität der Netzwerkkonfiguration gleichermaßen gerecht.

Aus diesem Grund wurde eine Methode zur Konfiguration GPN entwickelt, welche die Vorzüge bestehender Prozessmodelle und die analytischen Stärken multikriterieller Optimierungsmodelle in sich vereinigt. Zur Bewältigung der hohen prozessualen Anforderungen der Netzwerkkonfiguration wurde der Methode ein aus den Grundlagen der Entscheidungstheorie abgeleitetes allgemeines Ablaufmodell von Entscheidungsprozessen zugrunde gelegt. Die Reihenfolge der zu durchlaufenden Schritte wurde auf die



---

Einbettung eines multikriteriellen Optimierungsmodells ausgerichtet: (1) Identifikation des Handlungsbedarfs, (2) Definition der Aufgabenstellung, (3) Datenerhebung, (4) Entwicklung von Handlungsalternativen, (5) Präzisierung des Zielsystems, (6) Bewertung und (7) Auswahl. Um den gesamten Lösungsraum der Netzwerkkonfiguration berücksichtigen zu können, kommt für den vierten Methodenschritt ein multikriterielles Optimierungsmodell zum Einsatz. Die Erfassung und Parametrierung des hierfür erforderlichen impliziten Lösungsraums ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Mit dem Ziel, diesen zu reduzieren, wurde ein Verfahren zum zyklischen Durchlauf der Phasen drei bis fünf entwickelt. Dieses erlaubt die iterative Eingrenzung des impliziten Lösungsraums unter schrittweiser Erhöhung der Bewertungsgenauigkeit. Da das Ergebnis mathematischer Optimierungsmodelle nach menschlichem Ermessen nicht intuitiv nachvollziehbar ist, ist eine einzige mit einem Optimierungsmodell ermittelte Lösung nicht entscheidungsfähig. Die Methode sieht daher die Entwicklung multipler Handlungsalternativen für unterschiedliche Zielsysteme vor, die im Rahmen der Bewertungsphase gegenübergestellt werden können. Der Einsatzzweck des entwickelten Optimierungsmodells besteht daher nicht in der Berechnung der *einen* optimalen Netzwerkalternative. Es wird als Assistenzsystem für den Netzwerkplaner zur systematischen Generierung von Handlungsalternativen verstanden.

Bei der Entwicklung des Optimierungsmodells wurden die im Rahmen der Literaturanalyse identifizierten Defizite aufgegriffen und beseitigt. Die axiomatische Ableitung der sieben implementierten Zielgrößen Kapitalwert, Einmalaufwand, laufende Aufwendungen, Liefergeschwindigkeit, Lieferzuverlässigkeit, Bestellmengenflexibilität und Remanenzrisiko hat ihren Ursprung in der Unternehmensstrategie. Um eine differenziertere Ausgestaltung der Metriken für die einzelnen Zielgrößen im Vergleich zu bestehenden Ansätzen zu ermöglichen, werden Netzwerkalternativen in einem Optimierungslauf simultan in den drei Betriebspunkten *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf*, *Produktion bei maximaler Ausbringung* sowie *Produktion im Remanenzfall* bewertet. Zur realitätsnahen Abbildung des Entscheidungsproblems der Netzwerkkonfiguration wurden zahlreiche Anforderungen aus Netzwerkbetrieb und -migration wie bspw. die Berücksichtigung von Kapazitätsverlusten bei der Anpassung von Produktionsressourcen implementiert.

Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methode konnte durch die Anwendung auf ein Produktionsnetzwerk für Verbrennungsmotoren in der unternehmerischen Praxis gezeigt werden. Die Verallgemeinerung der gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen der Bewertung der Methode bestätigt die Erfüllung der formulierten Zielsetzung sowie

die Wirtschaftlichkeit des Methodeneinsatzes. Die vorliegende Arbeit leistet daher zusammenfassend einen Beitrag, Entscheidungsträger in der industriellen Praxis zu unterstützen, den analytischen und prozessualen Herausforderungen der Konfiguration GPN erfolgreich begegnen und so historisch gewachsene Produktionsnetzwerke wirksam neu gestalten zu können.

Aufbauend auf den dargelegten Erkenntnissen bieten sich neue Themenfelder für wissenschaftliche Untersuchungen auf dem Gebiet der Konfiguration GPN. Nach Einschätzung des Verfassers besteht das größte Potenzial nicht in der Weiterentwicklung des mathematischen Modells zur Netzwerkkonfiguration sondern in der Optimierung des Prozessschritts der Datenerhebung. Wie die Anwendung in der industriellen Praxis gezeigt hat, geht dieser Schritt mit einem enormen Zeitaufwand einher. Dies kann zu Qualitätseinbußen bei der Erfassung und Parametrierung des Lösungsraums führen und so die erreichbare Lösungsqualität beschränken. Obgleich die vorgestellte Methode bereits einen Beitrag zur Reduzierung dieses Aufwands leistet, gilt es auf diesem Gebiet weitere Anstrengungen zu unternehmen. Die Reduzierung der erforderlichen Datenmenge sowie die Automatisierung der Datenerhebung stellen zwei vielversprechende Ansätze dar. Eine Modularisierung des Funktionsumfangs als auch der Abbildungsgenauigkeit des entwickelten Optimierungsmodells kann dessen Anpassung auf individuelle Problemstellungen ermöglichen. Das Abschalten nicht erforderlicher Funktionseinheiten und die zielgerichtete Auswahl der Abbildungsgenauigkeit kann so einen Beitrag zur Reduzierung der erforderlichen Datenmenge leisten. Für zahlreiche erforderliche Datensätze bietet sich darüber hinaus die Prüfung der Automatisierbarkeit der Datenerfassung und -prognose an.

Hohe Rechenzeiten für die Lösung gemischt-ganzzahliger Optimierungsmodelle erschweren deren Einsatz in der industriellen Praxis. Lange Wartezeiten erfordern höchste Sorgfalt bei der Planung und Vorbereitung von Optimierungsläufen und verhindern unkomplizierte, schnelle Analysen verschiedener Einfluss- und Gestaltungsparameter. Die Entwicklung geeigneter Heuristiken zur Reduzierung der Rechenzeiten kann einen wertvollen Beitrag für die Etablierung multikriterieller Optimierungsmodelle zur Netzwerkkonfiguration in der industriellen Praxis leisten.





## Literaturverzeichnis

AALAEI & DAVOUDPOUR 2015

Aalaei, A.; Davoudpour, H.: Revised multi-choice goal programming for incorporated dynamic virtual cellular manufacturing into supply chain management: A case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 47 (2015), S. 3–15.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser. 2011.

ACÉL 1996

Acél, P. P.: Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen: Effiziente Optimierung der diskreten Simulation. Diss. ETH Zürich. 1996.

ADAM 1993

Adam, D.: *Planung und Entscheidung: Modelle - Ziele - Methoden*. 3. Aufl. Wiesbaden: Gabler. 1993.

ARNTZEN et al. 1995

Arntzen, B. C.; Brown, G. G.; Harrison, T. P.; Trafton, L. L.: Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation. *Interfaces* 25 (1995) 1, S. 69–93.

ARULDOSS et al. 2013

Aruldoss, M.; Lakshmi, T. M.; Venkatesan, V. P.: A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems* 1 (2013) 1, S. 31–43.

AZARON et al. 2008

Azaron, A.; Brown, K. N.; Tarim, S. A.; Modarres, M.: A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics* 116 (2008) 1, S. 129–138.

### BALLESTERO & ROMERO 1998

Ballestero, E.; Romero, C.: *Multiple Criteria Decision Making and its Applications to Economic Problems*. New York: Springer Science + Business Media, LLC. 1998.

### BAMBERG et al. 2013

Bamberg, G.; Coenenberg, A. G.; Krapp, M.: *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. 15. Aufl. Vahlens Kurzlehrbücher. München: Vahlen. 2013.

### BEAMON 1998

Beamon, B. M.: Supply chain design and analysis: models and methods. *International Journal of Production Economics* 55 (1998) 3, S. 281–294.

### BENKER 2003

Benker, H.: *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen: Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2003.

### BERNHARD et al. 2007

Bernhard, J.; Jodin, D.; Hömberg, K.; Kuhnt, S.; Schürmann, C.; Wenzel, S.: Vorgehensmodell zur Informationsgewinnung - Prozessschritte und Methodennutzung. SFB 559 Technical Report 06008. Universität Dortmund. 2007.

### BOGASCHEWSKY & KOHLER 2010

Bogaschewsky, R. W.; Kohler, K.: Multi-objective global supply chain design: a dynamic model including cash flow, cycle time, carbon foot print and international trade aspects. Forschungsbericht. Julius-Maximilians-Universität Würzburg. 2010.

### BOJARSKI et al. 2009

Bojarski, A. D.; Lafnéz, J. M.; Espuña, A.; Puigjaner, L.: Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach. *Computers & Chemical Engineering* 33 (2009) 10, S. 1747–1759.

### BOUZEMBRAK et al. 2011

Bouzembrak, Y.; Allaoui, H.; Goncalves, G.; Bouchriha, H.: A multi-objective green supply chain network design. In: *4th International Conference on Logistics*. Hrsg. von Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway: IEEE. 2011, S. 357–361.

BRACHT et al. 2011

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer. 2011.

BRANS & VINCKE 1985

Brans, J. P.; Vincke, P.: A Preference Ranking Organisation Method. *Management Science* 31 (1985) 6, S. 647–656.

BRASCH 1927

Brasch, H. D.: Zur Praxis der Unkostenschwankungen und ihrer Erfassung. *Betriebswirtschaftliche Rundschau* (1927) 4./5. S. 65–72.

BRAUCHLIN & HEENE 1995

Brauchlin, E.; Heene, R.: *Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik: Eine Einführung*. 4. Aufl. Bd. 1738. Uni-Taschenbücher. Bern: Haupt. 1995.

BREDOW 2014

Bredow, M. v.: Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie. Diss. TU München (2012). Forschungsberichte iw 281. München: Utz. 2014.

BUNDSCHUH 2008

Bundschuh, M.: Modellgestützte strategische Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie: Ein flexibler Planungsansatz für die Fahrzeughauptmodule Motor, Fahrwerk und Antriebsstrang. Diss. Universität Augsburg (2007). Schriftenreihe strategisches Management Bd. 57. Hamburg: Dr. Kovač. 2008.

CHAABANE et al. 2011

Chaabane, A.; Ramudhin, A.; Kharoune, M.; Paquet, M.: Trade-off model for carbon market sensitive green supply chain network design. *International Journal of Operational Research* 10 (2011) 4, S. 416–441.

CHEN & ANDRESEN 2014

Chen, Z.; Andresen, S.: A Multiobjective Optimization Model of Production-Sourcing for Sustainable Supply Chain with Consideration of Social, Environmental, and Economic Factors. *Mathematical Problems in Engineering* 2014 (2014) 2, S. 1–11.

CHILD 1972

Child, J.: Organizational Structure, Environment and Performance: The Role of Strategic Choice. *Sociology* 6 (1972) 1, S. 1–22.

CHOPRA et al. 2014

Chopra, S.; Meindl, P.; Kummer, S.: *Supply Chain Management: Strategie, Planung und Umsetzung*. 5. Aufl. Hallbergmoos: Pearson. 2014.

CHRISTODOULOU et al. 2007

Christodoulou, P.; Fleet, D.; Phaal, R.; Probert, D.; Hanson, P.; Shi, Y.: *Making the right things in the right places: A structured approach to developing and exploiting 'manufacturing footprint' strategy*. Cambridge: University of Cambridge Institute for Manufacturing. 2007.

COLLETTE & SIARRY 2004

Collette, Y.; Siarry, P.: *Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies*. Decision Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer. 2004.

DEMIRLI & YIMER 2006

Demirli, K.; Yimer, A. D.: Production-Distribution Planning with Fuzzy Costs. In: *2006 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. Hrsg. von Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway: IEEE. 2006, S. 702–707.

DEMPE & SCHREIER 2006

Dempe, S.; Schreier, H.: *Operations Research: Deterministische Modelle und Methoden*. Teubner Studienbücher Wirtschaftsmathematik. Wiesbaden: Teubner. 2006.

DING et al. 2009

Ding, H.; Benyoucef, L.; Xie, X.: Stochastic multi-objective production-distribution network design using simulation-based optimization. *International Journal of Production Research* 47 (2009) 2, S. 479–505.

DINKELBACH 1982

Dinkelbach, W.: *Entscheidungsmodelle*. De-Gruyter-Lehrbuch. Berlin, New York: Walter de Gruyter. 1982.



DINKELBACH & KLEINE 1996

Dinkelbach, W.; Kleine, A.: *Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre*. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer. 1996.

DOMSCHKE et al. 2015

Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: *Einführung in Operations Research*. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. 2015.

DÖRNER 1989

Dörner, D.: *Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen*. 1. Aufl. Hamburg: Rowohlt. 1989.

EHRGOTT 2005

Ehrgott, M.: *Multicriteria Optimization*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2005.

EIBNER 2006

Eibner, W.: *Anwendungsorientierte Außenwirtschaft: Theorie & Politik*. Global Text. München: Oldenbourg. 2006.

EISELT & SANDBLOM 2007

Eiselt, H. A.; Sandblom, C.-L.: *Linear Programming and its Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2007.

EISENFÜHR & M. WEBER 2003

Eisenführ, F.; Weber, M.: *Rationales Entscheiden*. 4. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. 2003.

ELLINGER et al. 2003

Ellinger, T.; Beuermann, G.; Leisten, R.: *Operations Research: Eine Einführung*. 6. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. 2003.

ELSEVIER B.V. 2016a

Elsevier B.V.: Finding variations of a word. URL: [http://help.elsevier.com.eaccess.ub.tum.de/app/answers/detail/a\\_id/2950/p/8150](http://help.elsevier.com.eaccess.ub.tum.de/app/answers/detail/a_id/2950/p/8150) (besucht am 03.05.2016).

ELSEVIER B.V. 2016b

Elsevier B.V.: Using proximity operators. URL: [http://help.elsevier.com.eaccess.ub.tum.de/app/answers/detail/a\\_id/2850/p/8150](http://help.elsevier.com.eaccess.ub.tum.de/app/answers/detail/a_id/2850/p/8150) (besucht am 03.05.2016).

ERNST 2012

Ernst, J.: Methode zur Ermittlung von Standortstrukturalternativen in Maschinenbauunternehmen. Diss. TU Darmstadt (2012). Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik". Aachen: Shaker. 2012.

ESPUNA et al. 2003

Espuna, A.; Rodrigues, M. T.; Gimeno, L.; Puigjaner, L.: A Holistic Framework for Supply Chain Management. In: *European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 13*. Hrsg. von A. Kraslawski; I. Turunen. Bd. 14. Computer-aided chemical engineering. Amsterdam, Boston: Elsevier. 2003, S. 413–418.

FERDOWS 1997

Ferdows, K.: Making the Most of Foreign Factories. *Harvard Business Review* 75 (1997) 2, S. 73–88.

FRANCA et al. 2010

Franca, R. B.; Jones, E. C.; Richards, C. N.; Carlson, J. P.: Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality. *International Journal of Production Economics* 127 (2010) 2, S. 292–299.

FRIEDLI et al. 2014

Friedli, T.; Mundt, A.; Thomas, S.: *Strategic management of global manufacturing networks: Aligning strategy, configuration, and coordination*. Management for Professionals. Berlin, Heidelberg: Springer. 2014.

FUCHS-WEGNER 1974

Fuchs-Wegner, G.: Systemanalyse: Eine Forschungs- und Gestaltungsstrategie. In: *Systemtheorie und Betrieb*. Hrsg. von E. Grochla; H. Fuchs; H. Lehmann. Bd. 3. Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung - Sonderheft. Opladen: VS Verlag für Sozialwissenschaften. 1974, S. 69–82.

FUJITA et al. 2012

Fujita, K.; Nasu, K.; Ito, Y.; Nomaguchi, Y.: Global Product Family Design: Multi-Objective Optimization and Design Concept Exploration. In: *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Hrsg. von American Society of Mechanical Engineers. New York: ASME. 2012, S. 1–17.

GÖBEL 2014

Göbel, E.: *Entscheidungen in Unternehmen*. Bd. 8563. Unternehmensführung. Konstanz, München: UVK/Lucius. 2014.

GOETSCHALCKS & FLEISCHMANN 2008

Goetschalcks, M.; Fleischmann, B.: Strategic Network Design. In: *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Hrsg. von H. Stadtler; C. Kilger. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008, S. 117–132.

GOETSCHALCKX et al. 2013

Goetschalckx, M.; Huang, E.; Mital, P.: Trading off Supply Chain Risk and Efficiency through Supply Chain Design. *Procedia Computer Science* 16 (2013), S. 658–667.

GÖTZE 2014

Götze, U.: *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 7. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. 2014.

GRÜNIG & R. KÜHN 2009

Grünig, R.; Kühn, R.: *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme: Ein heuristischer Ansatz*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2009.

GUDEHUS 2010

Gudehus, T.: *Logistik: Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010.

GUILLÉN et al. 2005

Guillén, G.; Mele, F. D.; Bagajewicz, M. J.; Espuña, A.; Puigjaner, L.: Multiobjective

supply chain design under uncertainty. *Chemical Engineering Science* 60 (2005) 6, S. 1535–1553.

GUILLÉN-GOSÁLBEZ & GROSSMANN 2010

Guillén-Gosálbez, G.; Grossmann, I.: A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model. *Computers & Chemical Engineering* 34 (2010) 1, S. 42–58.

HAFEZALKOTOB & TEIMOURY 2008

Hafezalkotob, A.; Teimoury, E.: A multi-objective model for designing a global supply chain network with international transportation mode selection: formulation and analysis. Forschungsbericht. Tehran: Iran University of Science and Technology. 2008.

HAIMES et al. 1971

Haimes, Y. Y.; Lasdon, L. S.; Wismer, D. A.: On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 1 (1971) 3, S. 296–297.

HANNE 1998

Hanne, T.: Multikriterielle Optimierung: Eine Übersicht. Diskussionsbeitrag Nr. 251. Fern Universität Hagen. 1998.

HARRE 2006

Harre, J.: Strategische Standortstrukturplanung für multinational produzierende Unternehmen. Diss. RWTH Aachen (2006). Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 27/2006. Aachen: Shaker. 2006.

HEINEN 1975

Heinen, E.: *Kosten und Kostenrechnung*. Entscheidungsorientierte betriebswirtschaftliche Studien. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler. 1975.

HEINEN 1990

Heinen, E.: Industriebetriebslehre als Entscheidungslehre. In: *Industriebetriebslehre*. Hrsg. von E. Heinen. Wiesbaden: Springer. 1990, S. 1–75.

HERM 2006

Herm, M.: Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business capabilities. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (2006). Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH) Bd. 133. Aachen: Shaker. 2006.

HOCHDÖRFFER 2018

Hochdörffer, J.: Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2018). Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Bd. 211. Aachen: Shaker. 2018.

HÜBNER 2007

Hübner, R.: Strategic supply chain management in process industries: An application to specialty chemicals production network design. Diss. TU Berlin (2007). Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer. 2007.

HUGO & PISTIKOPOULOS 2005

Hugo, A.; Pistikopoulos, E. N.: Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. *Journal of Cleaner Production* 13 (2005) 15, S. 1471–1491.

HWANG & MASUD 1979

Hwang, C.-L.; Masud, A. S. M.: *Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*. Bd. 164. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin, Heidelberg: Springer. 1979.

HWANG & YOON 1981

Hwang, C.-L.; Yoon, K.: *Multiple attribute decision making: Methods and applications: a state-of-the-art-survey*. Bd. 186. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin, Heidelberg: Springer. 1981.

JACOB 2006

Jacob, F.: Quantitative Optimierung dynamischer Produktionsnetzwerke. Diss. TU Darmstadt (2005). Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung. Aachen: Shaker. 2006.

JACOB & STRUBE 2008

Jacob, F.; Strube, G.: Why Go Global? The Multinational Imperative. In: *Global production*. Hrsg. von E. Abele; T. Meyer; U. Näher; G. Strube; R. Sykes. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008, S. 14–33.

JAMSHIDI et al. 2012

Jamshidi, R.; Fatemi Ghomi, S.; Karimi, B.: Multi-objective green supply chain optimization with a new hybrid memetic algorithm using the Taguchi method. *Scientia Iranica* 19 (2012) 6, S. 1876–1886.

JARRE & STOER 2004

Jarre, F.; Stoer, J.: *Optimierung*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. 2004.

JAVANSHIR et al. 2012

Javanshir, H.; Ebrahimnejad, S.; Nouri, S.: Bi-objective supply chain problem using MOPSO and NSGA-II. *International Journal of Industrial Engineering Computations* 3 (2012) 4, S. 681–694.

JETTER 1990

Jetter, O.: *Einkaufsmanagement: Qualitätsprodukte kostengünstig einkaufen in Europa und weltweit*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie. 1990.

JODIN et al. 2009

Jodin, D.; Kuhnt, S.; Wenzel, S.: Methodennutzungsmodell Methodennutzungsmodell zur Informationsgewinnung in großen Netzen der Logistik. In: *Große Netze der Logistik*. Hrsg. von P. Buchholz; U. Clausen. Berlin, Heidelberg: Springer. 2009, S. 1–18.

JUNGERMANN et al. 2010

Jungermann, H.; Pfister, H.-R.; Fischer, K.: *Die Psychologie der Entscheidung: Eine Einführung*. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum. 2010.

JUSTUS 2009

Justus, A.: Management globaler Produktionsnetzwerke: Dimensionen und Handlungsfelder für die Gestaltung, Lenkung und Entwicklung. Diss. Universität St.

Gallen (2009). Schriftenreihe strategisches Management Bd. 79. Hamburg: Dr. Kovač. 2009.

KALLRATH 2013

Kallrath, J.: *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis: Mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Spektrum. 2013.

KAMPKER et al. 2010

Kampker, A.; Schuh, G.; Kupke, D.: Production Network Design. *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) 4, S. 259–263.

KANANI NEZHAD et al. 2013

Kanani Nezhad, A. A.; Roghanian, E.; Azadi, Z.: A fuzzy goal programming approach to solve multi-objective supply chain network design problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations* 4 (2013) 3, S. 315–324.

KAUDER 2008

Kauder, S. G. L.: *Strategische Planung internationaler Produktionsnetzwerke in der Automobilindustrie*. Diss. Wirtschaftsuniversität Wien. 2008.

KERN 1962

Kern, W.: *Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung: Grundlagen und Verfahren*. Habilitationsschrift TH Darmstadt (1962). Beiträge zur betriebswirtschaftlichen Forschung Bd. 15. Köln, Opladen: Westdeutscher Verlag. 1962.

KERN 1974

Kern, W.: *Investitionsrechnung*. Stuttgart: C.E. Poeschel. 1974.

KHAOULA et al. 2013

Khaoula, B.; Hamid, A.; Gilles, G.; Taicir, L.: A supply chain design with product life cycle and green procurement considerations. In: *10th International Conference on Networking, Sensing and Control*. Hrsg. von Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway: IEEE. 2013, S. 855–860.

KINKEL & MALOCA 2009

Kinkel, S.; Maloca, S.: *Produktionsverlagerung und Rückverlagerung in Zeiten der*

Krise: Entwicklungen und Treiber von Produktionsverlagerungen und Rückverlagerungen im deutschen Verarbeitenden Gewerbe. Studie. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung. 2009.

KLEIN & SCHOLL 2012

Klein, R.; Scholl, A.: *Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. 2. Aufl. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Franz Vahlen. 2012.

KOHLER 2008

Kohler, K.: *Global Supply Chain Design: Konzeption und Implementierung eines multikriteriellen Optimierungsmodells für die Gestaltung globaler Wertschöpfungsaktivitäten*. Diss. Julius-Maximilians-Universität Würzburg (2008). *Production and supply management* Bd. 2. Würzburg: Centrum für Supply Management. 2008.

KOLLER et al. 2015

Koller, T.; Goedhart, M. H.; Wessels, D.: *Valuation: Measuring and managing the value of companies*. 6. Aufl. Hoboken, New Jersey: Wiley. 2015.

KREBS 2012

Krebs, P.: *Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multi-dimensionaler Unsicherheiten*. Diss. TU München (2011). *Forschungsberichte iw* 255. München: Utz. 2012.

W. KÜHN 2006

Kühn, W.: *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München, Wien: Carl Hanser. 2006.

LANZA & R. MOSER 2014

Lanza, G.; Moser, R.: *Multi-objective optimization of global manufacturing networks taking into account multi-dimensional uncertainty*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 1, S. 397–400.

LATHA SHANKAR et al. 2013

Latha Shankar, B.; Basavarajappa, S.; Kadadevaramath, R. S.; Chen, J. C.: *A bi-objective optimization of supply chain design and distribution operations using*



non-dominated sorting algorithm: A case study. *Expert Systems with Applications* 40 (2013) 14, S. 5730–5739.

LAUX et al. 2014

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: *Entscheidungstheorie*. 9. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. 2014.

LEE et al. 1981

Lee, S. M.; Green, G. I.; Kim, C. S.: A multiple criteria model for the location-allocation problem. *Computers & Operations Research* 8 (1981) 1, S. 1–8.

LELKE 2005

Lelke, F.: Kennzahlensysteme in konzerngebundenen Dienstleistungsunternehmen unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung eines wissensbasierten Kennzahlengenerators. Diss. Universität Duisburg-Essen. 2005.

LIEBECK 2009

Liebeck, T.: Markt- und ressourcenorientierter Ansatz zur strategischen Gestaltung globaler Produktionsnetzwerke. Diss. TU Darmstadt (2008). Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik". Aachen: Shaker. 2009.

LIU & PAPAGEORGIOU 2013

Liu, S.; Papageorgiou, L. G.: Multiobjective optimisation of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry. *Omega* 41 (2013) 2, S. 369–382.

LU et al. 2010

Lu, H.; Yu, X.; Zhao, X.; Li, Y.; Cheng, N.: A Multi-Attribute Stochastic Programming Approach for Supply Chain Planning with VAR. In: *Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*. Hrsg. von H. Wei; Y. Wang; J. Rong; J. Weng. Reston, Virginia: ASCE. 2010, S. 4060–4067.

LUC 2016

Luc, D. T.: *Multiobjective Linear Programming: An Introduction*. Cham, Heidelberg: Springer. 2016.

LUHMANN 1973

Luhmann, N.: Komplexität. In: *Handwörterbuch der Organisation*. Hrsg. von E. Grochla. Stuttgart: C.E. Poeschel. 1973, S. 1064–1070.

MAHLENDORF 2009

Mahlendorf, M. D.: Sticky Cost Issues - Kostenremanenz bei Nachfrageschwankungen. *Controlling & Management* 53 (2009) 3, S. 193–195.

MARLER & ARORA 2004

Marler, R. T.; Arora, J. S.: Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26 (2004) 6, S. 369–395.

MASTROCINQUE et al. 2013

Mastrocinque, E.; Yuce, B.; Lambiase, A.; Packianather, S. M.: A Multi-Objective Optimisation for Supply Chain Network Using the Bees Algorithm. *International Journal of Engineering Business Management* 38 (2013) 5, S. 1–11.

MAURER et al. 2009

Maurer, A.; Spindelndreier, D.; Türpitz, A.: The power of cost transparency: Finding hidden value in manufacturing networks. Hrsg. von The Boston Consulting Group.

MEIXNER & HAAS 2012

Meixner, O.; Haas, R.: *Wissensmanagement und Entscheidungstheorie: Theorien, Methoden, Anwendungen und Fallbeispiele*. 2. Aufl. Wien: facultas. 2012.

MELACHRINOUDIS & MIN 2000

Melachrinoudis, E.; Min, H.: The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility: A multiple objective approach. *European Journal of Operational Research* 123 (2000) 1, S. 1–15.

MELO et al. 2006

Melo, M. T.; Nickel, S.; Saldanha da Gama, F.: Dynamic multi-commodity capacitated facility location: A mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operations Research* 33 (2006) 1, S. 181–208.

MERCHIEERS 2008

Merchiers, A.: Bewertung globaler Standortstrukturalternativen im Maschinenbau.

Diss. RWTH Aachen (2008). Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Aachen: Apprimus. 2008.

### MEYER 2006

Meyer, T.: Globale Produktionsnetzwerke: Ein Modell zur kostenoptimierten Standortwahl. Diss. TU Darmstadt (2005). Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung. Aachen: Shaker. 2006.

### MEYER 2008a

Meyer, T.: Investments Abroad: Using the Right Evaluation Techniques. In: *Global production*. Hrsg. von E. Abele; T. Meyer; U. Näher; G. Strube; R. Sykes. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008, S. 102–139.

### MEYER 2008b

Meyer, T.: Selection Criteria: Assessing Relevant Trends and Indicators. In: *Global production*. Hrsg. von E. Abele; T. Meyer; U. Näher; G. Strube; R. Sykes. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008, S. 34–101.

### MEYER & JACOB 2008

Meyer, T.; Jacob, F.: Network Design: Optimizing the Global Production Footprint. In: *Global production*. Hrsg. von E. Abele; T. Meyer; U. Näher; G. Strube; R. Sykes. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008, S. 140–190.

### MILTENBURG 2009

Miltenburg, J.: Setting manufacturing strategy for a company's international manufacturing network. *International Journal of Production Research* 47 (2009) 22, S. 6179–6203.

### MITRA et al. 2009

Mitra, K.; Gudi, R. D.; Patwardhan, S. C.; Sardar, G.: Towards resilient supply chains: Uncertainty analysis using fuzzy mathematical programming. *Chemical Engineering Research and Design* 87 (2009) 7, S. 967–981.

### MOATTAR HUSSEINI et al. 2015

Moattar Hussein, Z.; Karimi, B.; Moattar Hussein, S. M.; Ghodsipour, S. H.: Multi-objective integrated production distribution planning concerning manufacturing

partners. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 28 (2015) 12, S. 1313–1330.

MÖLLER et al. 2011

Möller, K.; Klatt, T.; Drees, A.: Heutige und zukünftige Paradigmen des Produktionsstandorts Deutschland. In: *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Hrsg. von J. Gausemeier; H.-P. Wiendahl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2011, S. 18–33.

MONCAYO-MARTÍNEZ & RECIO 2014

Moncayo-Martínez, L. A.; Recio, G.: Bi-criterion optimisation for configuring an assembly supply chain using Pareto ant colony meta-heuristic. *Journal of Manufacturing Systems* 33 (2014) 1, S. 188–195.

E. MOSER 2018

Moser, E.: Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke: Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2017). Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Bd. 210. Aachen: Shaker. 2018.

R. MOSER 2014

Moser, R.: Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke: Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2014). Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Bd. 185. Aachen: Shaker. 2014.

NAGAR et al. 2012

Nagar, L.; Dutta, P.; Jain, K.: An integrated supply chain model for new products with imprecise production and supply under scenario dependent fuzzy random demand. *International Journal of Systems Science* 45 (2012) 5, S. 873–887.

A. NAGURNEY & L. S. NAGURNEY 2010

Nagurney, A.; Nagurney, L. S.: Sustainable supply chain network design: A multi-criteria perspective. *International Journal of Sustainable Engineering* 3 (2010) 3, S. 189–197.

### NEUNER 2009

Neuner, C.: Konfiguration internationaler Produktionsnetzwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheit. Diss. Universität Bayreuth (2009). Gabler research Schriften zum europäischen Management. Wiesbaden: Gabler. 2009.

### NICKEL et al. 2012

Nickel, S.; Saldanha-da-Gama, F.; Ziegler, H.-P.: A multi-stage stochastic supply network design problem with financial decisions and risk management. *Omega* 40 (2012) 5, S. 511–524.

### NYHUIS et al. 2005

Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heger, C. L.: Evaluation of Factory Transformability. In: *3rd International CIRP Conference on Reconfigurable Manufacturing*. 2005, S. 147–152.

### PAPE 1990

Pape, D.: Strategische Planung sozio-ökonomischer Systeme: Das kybernetische System Markt-Unternehmen als Simulationsmodell. In: *Unternehmensstrategien im sozio-ökonomischen Wandel*. Hrsg. von H. Czap. Bd. 15. Wirtschaftskybernetik und Systemanalyse. Berlin: Duncker & Humblot. 1990, S. 143–158.

### PASANDIDEH et al. 2015

Pasandideh, S. H. R.; Niaki, S. T. A.; Asadi, K.: Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA. *Information Sciences* 292 (2015), S. 57–74.

### PETERSEN 2004

Petersen, J.: Local Content-Auflagen: Betriebswirtschaftliche Relevanz und Handhabung am Beispiel des internationalen Großanlagenbaus. Diss. Universität Dortmund (2003). Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag. 2004.

### PFOHL & BRAUN 1981

Pfohl, H.-C.; Braun, G. E.: *Entscheidungstheorie: Normative und deskriptive Grundlagen des Entscheidens*. Bd. 8. Mi-Studienbibliothek Betriebswirtschaft. Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie. 1981.

PINTO-VARELA et al. 2011

Pinto-Varela, T.; Barbosa-Póvoa, A. P. F.; Novais, A. Q.: Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: Economic versus environmental performances. *Computers & Chemical Engineering* 35 (2011) 8, S. 1454–1468.

PISHVAEE et al. 2012

Pishvae, M. S.; Razmi, J.; Torabi, S. A.: Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems* 206 (2012), S. 1–20.

POGGENSEE 2015

Poggensee, K.: *Investitionsrechnung: Grundlagen - Aufgaben - Lösungen*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler. 2015.

POPP 1983

Popp, W.: Strategische Planung für eine multinationale Unternehmung mit gemischt-ganzzahliger Programmierung. *Operations-Research-Spektrum* 5 (1983) 1, S. 45–57.

PORTER 1986

Porter, M. E.: Changing patterns of international competition. *The International Executive* 28 (1986) 2, S. 9–40.

POURROUSTA et al. 2012

Pourrousta, A.; Dehbari, S.; Tavakkoli-Moghaddam, R.; Sadegh Amalnik, M.: A multi-objective particle swarm optimization for production-distribution planning in supply chain network. *Management Science Letters* 2 (2012), S. 603–614.

R. V. RAO 2007

Rao, R. V.: *Decision Making in the Manufacturing Environment: Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. Springer Series in Advanced Manufacturing. London: Springer. 2007.

S. S. RAO 2009

Rao, S. S.: *Engineering optimization: Theory and practice*. 4. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley. 2009.

REINHART et al. 2007

Reinhart, G.; Krebs, P.; Rimpau, C.; Czechowski, D.: Flexibilitätsbewertung in der Praxis: Einsatz einer Methode zur lebenszyklusorientierten Bewertung von Flexibilität in der Produktion. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007) 4, S. 211–217.

REUTER et al. 2015

Reuter, C.; Prote, J. P.; Stöwer, M.: Aggregation of Production Data for the Strategic Planning of Global Production Networks. *Applied Mechanics and Materials* 794 (2015), S. 461–469.

ROLAND BERGER 2015

Roland Berger: The Supply Chain Excellence Study 2015. Stuttgart. URL: [http://www.rolandberger.de/medien/publikationen/2015-12-01-rbsc-pub-supply\\_chain\\_excellence\\_study.html](http://www.rolandberger.de/medien/publikationen/2015-12-01-rbsc-pub-supply_chain_excellence_study.html) (besucht am 12.02.2017).

ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002

Rommelfanger, H. J.; Eickemeier, S. H.: *Entscheidungstheorie: Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. 2002.

RUDBERG & OLHAGER 2003

Rudberg, M.; Olhager, J.: Manufacturing networks and supply chains: An operations strategy perspective. *Omega* 31 (2003) 1, S. 29–39.

RUDBERG & WEST 2008

Rudberg, M.; West, M. B.: Global operations strategy: Coordinating manufacturing networks. *Omega* 36 (2008) 1, S. 91–106.

RUIZ-FEMENIA et al. 2013

Ruiz-Femenia, R.; Guillén-Gosálbez, G.; Jiménez, L.; Caballero, J. A.: Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. *Chemical Engineering Science* 95 (2013), S. 1–11.

SAAD et al. 1991

Saad, K. N.; Roussel, P. A.; Tiby, C.; Sommerlatte, T.: *Management der F & E-Strategie*. 2. Aufl. Management-Perspektiven. Wiesbaden: Gabler. 1991.

### SAATY 1977

Saaty, T. L.: A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15 (1977) 3, S. 234–281.

### SAATY 1990

Saaty, T. L.: How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48 (1990) 1, S. 9–26.

### SABOONCHI & ZHANG 2010

Saboonchi, B.; Zhang, G.: A two-stage stochastic programming method for designing multi-stage global supply chains with stochastic demand. *International Journal of Operational Research* 9 (2010) 4, S. 409.

### SABRI & BEAMON 2000

Sabri, E. H.; Beamon, B. M.: A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega* 28 (2000) 5, S. 581–598.

### SADJADY & DAVOUDPOUR 2012

Sadjady, H.; Davoudpour, H.: Two-echelon, multi-commodity supply chain network design with mode selection, lead-times and inventory costs. *Computers & Operations Research* 39 (2012) 7, S. 1345–1354.

### SADRANIA et al. 2013

Sadrmia, A.; Ismail, N.; Zulkifli, N.; Ariffin, M. K. A.; Nezamabadi-pour, H.; Mirabi, H.: A Multiobjective Optimization Model in Automotive Supply Chain Networks. *Mathematical Problems in Engineering* 2013 (2013) 5, S. 1–10.

### SAFAEI 2014

Safaei, M.: An integrated multi-objective model for allocating the limited sources in a multiple multi-stage lean supply chain. *Economic Modelling* 37 (2014), S. 224–237.

### SAGER et al. 2016

Sager, B.; Hawer, S.; Reinhart, G.: A Performance Measurement System for Global Manufacturing Networks. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 61–66.



SAHRAEIAN 2013

Sahraeian, R.: Capacitated Multimodal Structure of a Green Supply Chain Network Considering Multiple Objectives. *International Journal of Engineering* 26 (2013) 9.

SANDT 2004

Sandt, J.: Management mit Kennzahlen und Kennzahlensystemen: Bestandsaufnahme, Determinanten und Erfolgsauswirkungen. Diss. Wissenschaftliche Hochschule für Unternehmensführung (WHU) Vallendar (2003). Schriften des Center for Controlling & Management (CCM) Bd. 14. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag. 2004.

SARRAFHA et al. 2015

Sarrafha, K.; Rahmati, S. H. A.; Niaki, S. T. A.; Zaretalab, A.: A bi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of a multi-echelon supply chain network design: A new tuned MOEA. *Computers & Operations Research* 54 (2015), S. 35–51.

SCHMIDT 2011

Schmidt, B. C.: Gestaltung Globaler Produktionsstrategien. In: *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Hrsg. von J. Gausemeier; H.-P. Wiendahl. Berlin, Heidelberg: Springer. 2011, S. 71–84.

SCHNEIDER 1995

Schneider, D.: *Informations- und Entscheidungstheorie*. München, Wien: De Gruyter Oldenbourg. 1995.

SCHREYÖGG 2008

Schreyögg, G.: *Organisation: Grundlagen moderner Organisationsgestaltung*. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler. 2008.

SCHUH et al. 2012

Schuh, G.; Potente, T.; Kupke, D.; Varandani, R. M.; Hausberg, C.: An Evolutionary Approach for Global Production Network Optimisation. *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 382–387.

SCHUH et al. 2014

Schuh, G.; Potente, T.; Varandani, R.; Schmitz, T.: Global Footprint Design based on

genetic algorithms – An “Industry 4.0” perspective. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 1, S. 433–436.

SCHUH et al. 2008

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Attig, P.; Hoeschen, A.: Global Footprint Design. In: *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. Hrsg. von M. Mitsuiishi; K. Ueda; F. Kimura. London: Springer. 2008, S. 333–336.

SELIM & OZKARAHAN 2008

Selim, H.; Ozkarahan, I.: A supply chain distribution network design model: An interactive fuzzy goal programming-based solution approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36 (2008) 3-4, S. 401–418.

SEURING & GOLD 2012

Seuring, S.; Gold, S.: Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. *Supply chain management : An International Journal* 17 (2012) 5, S. 544–555.

SHI & GREGORY 1998

Shi, Y.; Gregory, M.: International manufacturing networks - to develop global competitive capabilities. *Journal of Operations Management* 16 (1998) 2-3, S. 195–214.

SHI 2005

Shi, Y.: Global Manufacturing Network. In: *The Blackwell encyclopedia of management: Operations management, Volume 10*. Hrsg. von S. Roden; M. Lewis; N. Slack. Malden, Oxford, Carlton: Blackwell. 2005, S. 100–101.

SKINNER 1996

Skinner, W.: Manufacturing Strategy on the “S” Curve. *Production and Operations Management* 5 (1996) 1, S. 3–14.

SMITH et al. 2015

Smith, N. R.; Manzano, M. G.; Castillo-Villar, K.; Rivera-Morales, L. A.: A bi-objective model for local and global green supply chain. In: *2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Production and Logistics Systems*. Hrsg. von

Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Computational Intelligence Society. Piscataway: IEEE. 2015, S. 83–90.

### STATISTISCHES BUNDESAMT 2017

Statistisches Bundesamt: Erwerbstätige und Arbeitnehmer nach Wirtschaftsbereichen. Hrsg. von Statistisches Bundesamt. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/TabellenErwerbstaetigenrechnung/ArbeitnehmerWirtschaftsbereiche.html> (besucht am 12.02.2017).

### STRUNZ 2012

Strunz, M.: *Instandhaltung: Grundlagen - Strategien - Werkstätten*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. 2012.

### SUDHOFF 2008

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Diss. TU München (2007). Forschungsberichte iwv 208. München: Utz. 2008.

### SUHL & MELLOULI 2009

Suhl, L.; Mellouli, T.: *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. 2. Aufl. Springer-Lehrbuch. Dordrecht: Springer. 2009.

### THEURER 2017

Theurer, M.: May schafft klare Verhältnisse: Grundsatzrede zum Brexit. *Frankfurter Allgemeine* (2017) 17.01.2017. URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/ttip-und-freihandel/grundsatzrede-zum-brexite-may-schafft-klare-verhaeltnisse-14678862.html> (besucht am 22.01.2017).

### THOMAS 2013

Thomas, S.: Produktionsnetzwerksysteme: Ein Weg zu effizienten Produktionsnetzwerken. Diss. Universität St. Gallen. 2013.

### TRIANTAPHYLLOU 2000

Triantaphyllou, E.: *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Bd. 44. Applied optimization. Dordrecht: Springer. 2000.

### UDE 2010

Ude, J.: Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke: Ein Bewertungsansatz unter Berücksichtigung multikriterieller Zielsysteme, Dynamik und Unsicherheit. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2010). Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Bd. 157. Aachen: Shaker. 2010.

### UMWELTBUNDESAMT 2016

Umweltbundesamt: Emissionsstandards: Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Hrsg. von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Dessau. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge> (besucht am 22.01.2017).

### VARANDANI 2014

Varandani, R. M.: Managementkomplexität als Gestaltungsgröße kostenoptimierter globaler Produktionsnetzwerke. Diss. RWTH Aachen (2014). Ergebnisse aus der Produktionstechnik Bd. 19/2014. Aachen: Apprimus. 2014.

### VARTHANAN et al. 2012

Varthanan, P. A.; Murugan, N.; Kumar, G. M.; Parameswaran, S.: Development of simulation-based AHP-DPSO algorithm for generating multi-criteria production-distribution plan. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 60 (2012) 1, S. 373–396.

### VDA 2016

VDA: Jahresbericht 2016: Die Automobilindustrie in Daten und Fakten. Hrsg. von Verband der Automobilindustrie e.V. Berlin. URL: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/jahresbericht-2016.html> (besucht am 05.01.2017).

### VENKATADRI et al. 2012

Venkatadri, U.; Bose, S.; Azaron, A.: A Metaheuristic Approach for Supply Chain Network Design Problems. In: *Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management*. Hrsg. von K. J. Engemann; A. M. Gil-Lafuente; J. M. Merigó. Bd. 115. Lecture Notes in Business Information Processing. Berlin, New York: Springer. 2012, S. 114–122.

F. WANG et al. 2011

Wang, F.; Lai, X.; Shi, N.: A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems* 51 (2011) 2, S. 262–269.

J. WANG & SHU 2007

Wang, J.; Shu, Y.-F.: A possibilistic decision model for new product supply chain design. *European Journal of Operational Research* 177 (2007) 2, S. 1044–1061.

J. WEBER 1997

Weber, J.: Methodik zur Generierung von Logistik-Kennzahlen. *Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis* 49 (1997) 4, S. 438–454.

J. WEBER et al. 1995

Weber, J.; Großklaus, A.; Kummer, S.; Nippel, H.; Warnke, D.: Methodik zur Generierung von Logistik-Kennzahlen. In: *Kennzahlen für die Logistik*. Hrsg. von J. Weber; A. Großklaus. Bd. 8. Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Hochschule für Unternehmensführung Koblenz. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. 1995, S. 9–45.

WEIGERT 2004

Weigert, M.: Entwicklung eines Planungstools für die langfristige Kapazitätsplanung: Eine Untersuchung an einem Beispiel aus der Automobilindustrie. Diss. TU Berlin (2004). Berichte aus der Betriebswirtschaft. Aachen: Shaker. 2004.

WERNERS 2013

Werners, B.: *Grundlagen des Operations Research*. 3. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. 2013.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Digital Manufacturing in the global Era. In: *Digital enterprise technology*. Hrsg. von P. F. Cunha; P. G. Maropoulos. New York: Springer. 2006, S. 3–14.

H.-H. WIENDAHL 2012

Wiendahl, H.-H.: *Auftragsmanagement der industriellen Produktion: Grundlagen, Konfiguration, Einführung*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer. 2012.

H.-P. WIENDAHL et al. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie,

N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2007) 2, S. 783–809.

WILDEMANN 1996

Wildemann, H.: Logistikstrategien. In: *Betriebshütte*. Hrsg. von W. Eversheim; G. Schuh. Hütte. Berlin, Heidelberg: Springer. 1996, S. 15/1–15/109.

WILZ 2010

Wilz, S. M.: *Entscheidungsprozesse in Organisationen: Eine Einführung*. Studientexte zur Soziologie. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften & Springer. 2010.

YANG et al. 2015

Yang, G.-Q.; Liu, Y.-K.; Yang, K.: Multi-objective biogeography-based optimization for supply chain network design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering* 85 (2015), S. 145–156.

ZELENY 2010

Zeleny, M.: Multiobjective Optimization, Systems Design and De Novo Programming. In: *Handbook of multicriteria analysis*. Hrsg. von C. Zopounidis; P. M. Pardalos. Bd. 103. Applied optimization. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010, S. 243–262.

ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991

Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L.: *Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer. 1991.

## Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytischer Hierarchieprozess
EAW	Einmalaufwand
EOP	End of Production
FCM	Fuzzy Cognitive Map
GPN	Globales Produktionsnetzwerk
imp.	implizit
KPI	Key Performance Indicator
LAW	Laufende Aufwendungen
MADM	Multi-attribute Decision Making
MCDM	Multi-criteria Decision Making
MODM	Multi-objective Decision Making
NB	Netzwerkbetrieb
NE	Netzwerkelement
NM	Netzwerkmigration
n. r.	nicht relevant
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OEM	Original Equipment Manufacturer
OR	Operations Research
PJ, PT	Personenjahr, Personentag
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
PU <sub>s</sub>	Produktionsunterbrechungen
SOP	Start of Production
u. d. N.	unter den Nebenbedingungen
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik





## Abbildungsverzeichnis

1.1	Defizite bei der Netzwerkkonfiguration . . . . .	6
1.2	Klassifizierung unterschiedlicher Netzwerktypen (Quelle: in Anlehnung an RUDBERG & OLHAGER (2003, S. 35)) . . . . .	7
1.3	Ressourcenorientiertes Ebenenmodell einer Produktion (Quelle: in Anlehnung an H.-P. WIENDAHL et al. (2007, S. 785)) . . . . .	11
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	14
2.1	Ablauf von Entscheidungsprozessen . . . . .	17
2.2	Klassifizierungsschema für Optimierungsmodelle . . . . .	23
3.1	Anforderungen an eine Methode zur Konfiguration GPN . . . . .	29
3.2	Gliederung der Literatur zur Konfiguration GPN . . . . .	30
3.3	Prozessmodell nach CHRISTODOULOU et al. (2007) (eigene Darstellung)	31
3.4	Zeitliche Entwicklung der Veröffentlichung relevanter Modelle . . . . .	40
3.5	Betrachtete Entscheidungen zur Netzwerkkonfiguration . . . . .	44
3.6	Eingesetzte Zielgrößen zur Netzwerkkonfiguration . . . . .	45
4.1	Einordnung des multikriteriellen Optimierungsmodells . . . . .	63
4.2	Methode zur Konfiguration GPN . . . . .	66
5.1	Gliederung der Modellbildung und der mathematischen Formulierung .	67
5.2	Gliederung der Modellierung der Netzwerkstruktur . . . . .	70
5.3	Verlustzeiten des Anlagenbetriebs (Quelle: in Anlehnung an BUNDSCHUH (2008, S. 70)) . . . . .	73
5.4	Elemente des Zielsystems . . . . .	76
5.5	Technologielebenszyklusmodell nach SAAD et al. (1991, S. 66) . . . . .	77
5.6	Zielgrößen der Netzwerkkonfiguration . . . . .	79
5.7	Gliederung der Investitionsarten nach dem Investitionsanlass (Quelle: in Anlehnung an GÖTZE (2014, S. 10)) . . . . .	80

5.8	Modellierung der finanziellen Zielgrößen der Netzwerkkonfiguration . . .	83
5.9	Kategorisierung der Entscheidungsvariablen . . . . .	88
6.1	Konzept der selektiven Kennzahlen für globale Produktionsnetzwerke . .	122
6.2	Prozessorientiertes Vorgehensmodell zur Informationsgewinnung (Quelle: in Anlehnung an BERNHARD et al. (2007, S. 7)) . . . . .	127
6.3	Allgemeine Struktur eines Datenmodells zur Konfiguration GPN . . . .	129
6.4	Verfahren zur Bestimmung optimaler Netzwerkalternativen unter schrittweiser Eingrenzung des impliziten Lösungsraums . . . . .	134
6.5	Visualisierung zur iterativen Eingrenzung des Lösungsraums (1/2) . . .	137
6.6	Visualisierung zur iterativen Eingrenzung des Lösungsraums (2/2) . . .	138
7.1	Modellierung des in der Pilotanwendung betrachteten Produktionsnetz- werks für Verbrennungsmotoren . . . . .	144
7.2	Übersicht zu den monokriteriell optimalen Netzwerkalternativen . . . .	150
7.3	Erzielte Nutzwerte für die einzelnen Zielgrößen je Zielsystem . . . . .	152
7.4	Übersicht zu den multikriteriell optimalen Netzwerkalternativen . . . .	153
7.5	Kapazitätschart für das Großserienband 1a in den Betriebspunkten gemäß prognostiziertem Bedarf sowie bei maximaler Ausbringung . . .	155
7.6	Integrationszenario für die Produkte der neuen Produktgeneration . . .	156
7.7	Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl der aktiven Lini- enbefähigungen pro Montagelinie . . . . .	158
8.1	Bewertung des Nutzens der Methode zur Konfiguration GPN . . . . .	166

## Tabellenverzeichnis

1.1	Berücksichtigte Entscheidungsdimensionen der Netzwerkkonfiguration	13
2.1	Notation zur Erläuterung der Lösungsverfahren	24
3.1	Abgleich der Prozessmodelle mit den Phasen der Entscheidungsfindung	35
3.2	Suchanfrage zur Identifikation relevanter Veröffentlichungen	37
3.3	Klassifizierung multikriterieller Optimierungsmodelle zur Konfiguration GPN	41
3.4	Abgleich bestehender Ansätze zur Konfiguration GPN mit den definierten Anforderungen	59
5.1	Relevante Anforderungen aus der Netzwerkmigration für die Elemente der Netzwerkstruktur	72
5.2	Differenzierungsfaktoren aus Marktsicht nach THOMAS (2013, S. 55)	78
7.1	Nomenklatur der Produktbezeichnungen	145
7.2	Betrachtetes Produktportfolio	145
7.3	Übersicht zum erfassten Lösungsraum der Netzwerkkonfiguration	148
7.4	Auslastung der Produktionsstandorte	154
7.5	Durchschnittliche Veränderung des Produktionsvolumens im Vergleich zum vorhergehenden Quartal je Montagelinie im Betrachtungszeitraum	159
8.1	Kostenbewertung einer einmaligen Methodenanwendung	164
B.1	Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur	247
C.1	Richtung der vorgesehenen Abweichung bei der erstmaligen Erhebung der technischen Parameter	255



## Modellnotation

$[GE]$	Geldeinheiten
$[PE]$	Produktionseinheiten
$[ZE]$	Zeiteinheiten

### *Indexmengen und Indizes*

$b \in B$	Menge der Beschaffungsmärkte
$d \in D$	Menge der Schichtstufen
$e \in E$	Menge der Technologien
$f \in F$	Menge der Produktfamilien
$g \in G$	Menge der Produktgenerationen
$k \in K$	Menge der Kapazitätsstufen von Produktionslinien; die Bezeichnung für eine Kapazitätsstufe $k$ repräsentiert den Faktor, mit dem die produktspezifischen Taktzeiten auf die jeweilige Kapazitätsstufe angepasst werden; es gilt $k \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}$
$k^{max} \in K^{max}$	Menge der maximalen Kapazitätsstufen von Produktionslinien; die Bezeichnung für eine maximale Kapazitätsstufe $k^{max}$ repräsentiert den Faktor, mit dem die produktspezifischen Taktzeiten auf die jeweilige maximale Kapazitätsstufe angepasst werden; es gilt $k^{max} \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}$
$l^n \in L^n$	Menge der potentiellen Produktionslinien
$l^v \in L^v$	Menge der bestehenden Produktionslinien
$l \in L$	Menge der Produktionslinien: $L^v \cup L^n$
$l^{desf} \in L^{desf}$	Menge der Produktionslinien, die von anderen Produktionslinien beliefert werden
$l^{ori} \in L^{ori}$	Menge der Produktionslinien, die Märkte oder Produktionslinien beliefern
$l^{orif} \in L^{orif}$	Menge der Produktionslinien, die andere Produktionslinien beliefern

## Modellnotation

---

$l^{orim} \in L^{orim}$	Menge der Produktionslinien, die Märkte beliefern
$m \in M$	Menge der Märkte
$p^c \in P^c$	Menge der Komponenten
$p^e \in P^e$	Menge der Endprodukte
$p \in P$	Menge der Produkte: $P^e \cup P^c$
$p^k \in P^k$	Menge der Kaufteile
$s^n \in S^n$	Menge der potentiellen Standorte
$s^v \in S^v$	Menge der bestehenden Standorte
$s \in S$	Menge der Standorte: $S^v \cup S^n$
$t \in T$	Menge der Planungsperioden im Betrachtungszeitraum [ $t^{min}, \dots, t^{max}$ ]
$t^0 \in T^0$	Menge der Planungsperioden im Betrachtungszeitraum beginnend mit Periode 0 [ $t^{min} - 1, \dots, t^{max}$ ]
$t^g \in T^G$	Menge der Planungsperioden für Generiken [ $t^{min}, \dots, t^{gmax}$ ]
$t^t \in T^T$	Menge der Planungsperioden im erweiterten Betrachtungszeitraum [ $t^{min}, \dots, t^{tmax}$ ]
$z \in Z$	Menge der Zollregionen

### Mehrdimensionale Indexmengen und Indizes

$BEF^n$	$\subseteq L \times F$ repräsentiert eine potentielle Produktionslinien-Produktfamilien Beziehung, wobei $(l, f) \in BEF^n$ genau dann wenn (gdw) Produktionslinie $l$ für die Produktfamilie $f$ befähigt werden kann
$BEF^v$	$\subseteq L \times F$ repräsentiert eine bestehende Produktionslinien-Produktfamilien Beziehung, wobei $(l, f) \in BEF^v$ gdw Produktionslinie $l$ für die Produktfamilie $f$ befähigt ist
$BEF$	$BEF^v \cup BEF^n$ repräsentiert die Menge aller bestehenden und potentiellen Produktionslinien-Produktfamilien Beziehungen
$BEG^n$	$\subseteq L \times G$ repräsentiert eine potentielle Produktionslinien-Produktgeneration Beziehung, wobei $(l, g) \in BEG^n$ gdw Produktionslinie $l$ für die Produktgeneration $g$ befähigt werden kann
$BEG^v$	$\subseteq L \times G$ repräsentiert eine bestehende Produktionslinien-Produktgenerationen Beziehung, wobei $(l, g) \in BEG^v$ gdw Produktionslinie $l$ für die Produktgeneration $g$ befähigt ist

---

$BEG$	$BEG^v \cup BEG^n$ repräsentiert die Menge aller bestehenden und potentiellen Produktionslinien-Produktgenerationen Beziehungen
$BEP^n$	$\subseteq L \times P \times F \times G$ repräsentiert eine potentielle Produktionslinien-Produkt-Produktfamilien-Produktgenerationen Beziehung, wobei $(l, p, f, g) \in BEP^n$ gdw Produktionslinie $l$ für das Produkt $p$ aus der Produktfamilie $f$ und Produktgeneration $g$ befähigt werden kann
$BEP^v$	$\subseteq L \times P \times F \times G$ repräsentiert eine bestehende Produktionslinien-Produkt-Produktfamilien-Produktgenerationen Beziehung, wobei $(l, p, f, g) \in BEP^v$ gdw Produktionslinie $l$ für das Produkt $p$ aus der Produktfamilie $f$ und Produktgeneration $g$ befähigt ist
$BEP$	$BEP^v \cup BEP^n$ repräsentiert die Menge aller bestehenden und potentiellen Produktionslinien-Produkt-Produktfamilien-Produktgenerationen Beziehungen
$BEPK$	$\subseteq L \times P \times F \times G \times K$ repräsentiert eine Produktionslinien-Produkt-Produktfamilien-Produktgenerationen-Kapazitätsstufen Beziehung, wobei $(l, p, f, g, k) \in BEPK$ gdw Produktionslinie $l$ in Kapazitätsstufe $k$ das Produkt $p$ aus der Produktfamilie $f$ und Produktgeneration $g$ herstellen kann (Indexmenge aus modellierungstechnischen Gründen erforderlich)
$BKT$	$\subseteq B \times P^k$ repräsentiert eine Beschaffungsmarkt-Kaufteil Beziehung, wobei $(b, p^k) \in BKT$ gdw Kaufteil $k$ in Beschaffungsmarkt $b$ bezogen werden kann
$BOM$	$\subseteq P^k \times P$ repräsentiert eine Rohteil-Produkt Beziehung, wobei $(p, p^k) \in BOM$ gdw Rohteil $p^k$ benötigt wird, um Produkt $p$ herzustellen
$BOP$	$\subseteq P \times P$ repräsentiert eine Produkt-Produkt Beziehung, wobei $(p_1, p_2) \in BOP$ gdw Produkt $p_2$ benötigt wird, um Produkt $p_1$ herzustellen
$BZ$	$\subseteq B \times Z$ repräsentiert eine Beschaffungsmarkt-Zollregion Beziehung, wobei $(b, z) \in BZ$ gdw Beschaffungsmarkt $m$ in Zollregion $z$ liegt

## Modellnotation

---

$DE$	$\subseteq L \times D \times K$ repräsentiert eine Produktionslinien-Schichtstufen-Kapazitätsstufen Beziehung, wobei $(l, d, k) \in DE$ gdw Produktionslinie $l$ in Schichtstufe $d$ in Kapazitätsstufe $k$ betrieben werden kann
$EDG^b$	$\subseteq B \times L$ repräsentiert eine Beschaffungsmarkt-Produktionslinien Beziehung, wobei $(b, l) \in EDG^b$ gdw zwischen dem Beschaffungsmarkt $b$ und der Produktionslinie $l$ eine Lieferbeziehung besteht
$EDG^f$	$\subseteq L \times L$ repräsentiert eine Produktionslinien-Produktionslinien Beziehung, wobei $(l_1, l_2) \in EDG^f$ gdw zwischen den Produktionslinien $l_1$ und $l_2$ eine Lieferbeziehung besteht
$EDG^m$	$\subseteq L \times M$ repräsentiert eine Produktionslinien-Markt Beziehung, wobei $(l, m) \in EDG^m$ gdw zwischen Produktionslinie $l$ und Markt $m$ eine Lieferbeziehung besteht
$LIS$	$\subseteq L \times D$ repräsentiert eine Produktionslinien-Schichtstufen Beziehung, wobei $(l, d) \in LIS$ gdw Produktionslinie $l$ in Schichtstufe $d$ betrieben werden kann
$LK$	$\subseteq L \times K$ repräsentiert eine Produktionslinien-Kapazitätsstufen Beziehung, wobei $(l, k) \in LK$ gdw wenn für Produktionslinie $l$ die Kapazitätsstufe $k$ realisiert werden kann
$LKDE$	$\subseteq L \times K \times K$ repräsentiert eine Produktionslinien-Kapazitätsstufen-Kapazitätsstufen Beziehung, wobei $(l, k_1, k_2) \in LKDE$ gdw wenn die Kapazität der Produktionslinie $l$ von der Kapazitätsstufe $k_1$ auf die Kapazitätsstufe $k_2$ rückgebaut werden kann, d. h. $k_1 < k_2$
$LKIN$	$\subseteq L \times K \times K$ repräsentiert eine Produktionslinien-Kapazitätsstufen-Kapazitätsstufen Beziehung, wobei $(l, k_1, k_2) \in LKIN$ gdw wenn die Kapazität der Produktionslinie $l$ von der Kapazitätsstufe $k_1$ auf die Kapazitätsstufe $k_2$ ausgebaut werden kann, d. h. $k_1 > k_2$
$LKMI$	$\subseteq L \times L \times K^{max}$ repräsentiert eine Produktionslinien-Produktionslinien-Kapazitätsstufen Beziehung, wobei $(l_1, l_2, k^{max}) \in LKMI$ gdw wenn die Summe der Ausbaustufen der Produktionslinien $l_1$ und $l_2$ die Kapazitätsstufe $k^{max}$ nicht unterschreiten darf
$MZ$	$\subseteq M \times Z$ repräsentiert eine Markt-Zollregion Beziehung, wobei $(m, z) \in MZ$ gdw Markt $m$ in Zollregion $z$ liegt



---

$PNS^n$	$\subseteq S \times E \times L$ repräsentiert eine potentielle Standort-Technologie-Linien Beziehung, wobei $(s, e, l) \in PNS^n$ gdw wenn an Standort $s$ die Produktionslinie $l$ mit Technologie $e$ installiert werden kann
$PNS^v$	$\subseteq S \times E \times L$ repräsentiert eine bestehende Standort-Technologie-Linien Beziehung, wobei $(s, e, l) \in PNS^v$ gdw wenn an Standort $s$ die Produktionslinie $l$ mit Technologie $e$ installiert ist
$PNS$	$PNS^v \cup PNS^n$ repräsentiert die Menge aller bestehenden und potentiellen Standort-Technologie-Linien Beziehungen
$PNSZ$	$\subseteq S \times Z$ repräsentiert eine Standort-Technologie-Linien-Zollregion Beziehung, wobei $(s, e, l, z) \in PNSZ$ gdw wenn der Standort $s$ in Zollregion $z$ liegt
$ROU^b$	$\subseteq B \times L \times P^k$ repräsentiert eine Beschaffungsmarkt-Produktionslinien-Kaufteil Beziehung, wobei $(b, l, p^k) \in ROU^b$ gdw Produktionslinie $l$ mit Kaufteil $p^k$ von Beschaffungsmarkt $b$ versorgt werden kann
$ROU^z$	$\subseteq Z \times Z \times P$ repräsentiert eine Zollregion-Zollregion-Produkt Beziehung, wobei $(z_1, z_2, p) \in ROU^z$ gdw wenn eine Transportbeziehung von Zollregion $z_1$ in Zollregion $z_2$ für Produkt $p$ besteht
$ROU^f$	$\subseteq L \times L \times P^c$ repräsentiert eine Produktionslinien-Produktionslinien-Produkt Beziehung, wobei $(l_1, l_2, p) \in ROU^f$ gdw Produkt $p$ von Produktionslinie $l_1$ zu Produktionslinie $l_2$ transportiert werden kann
$ROU^m$	$\subseteq L \times M \times P^e$ repräsentiert eine Produktionslinien-Markt-Produkt Beziehung, wobei $(l, m, p) \in ROU^m$ gdw Produkt $p$ von Produktionslinie $l$ in den Markt $m$ transportiert werden kann
$SE^n$	$\subseteq S \times E$ repräsentiert eine potentielle Standort-Technologie Beziehung, wobei $(s, e) \in SE^n$ gdw wenn an Standort $s$ die Technologie $e$ installiert werden kann
$SE^v$	$\subseteq S \times E$ repräsentiert eine bestehende Standort-Technologie Beziehung, wobei $(s, e) \in SE^v$ gdw wenn an Standort $s$ die Technologie $e$ installiert ist
$SE$	$SE^v \cup SE^n$ repräsentiert die Menge aller bestehenden und potentiellen Standort-Technologie Beziehungen

### Parameter

$be_f^{anz}$	Anzahl maximal parallel auf Produktionslinie $l$ befähigter Produktfamilien in Periode $t$
$beg_{lt}^{anz}$	Anzahl maximal parallel auf Produktionslinie $l$ befähigter Produktgenerationen in Periode $t$
$beP_{lt}^{anz}$	Anzahl maximal parallel auf Produktionslinie $l$ befähigter Produkte in Periode $t$
$beP_{lpfg}^{neop}$	$(l, p, f, g) \in BEP^n$ , spätestester EOP der potentiellen Befähigung von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$
$beP_{lpfg}^{nsop}$	$(l, p, f, g) \in BEP^n$ , frühest möglicher SOP der potentiellen Befähigung von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$
$beP_{lpfg}^{veop}$	$(l, p, f, g) \in BEP^v$ , spätestester EOP der Befähigung von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$
$beP_{lpfg}^{vsop}$	$(l, p, f, g) \in BEP^v$ , SOP der Befähigung von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$
$BigM$	Große Zahl (erforderlich aus modellierungstechnischen Gründen)
$cap_{ldt}^D$	$(l, d) \in LIS$ , Kapazität der Produktionslinie $l$ in der Schichtstufe $d$ ; $[ZE]$
$cyt_{lpfgt}$	$(l, p, f, g) \in BEP$ , Taktzeit für Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ , $[ZE]$
$dem_{pt}^p$	Bedarf für das Produkt $p$ in Periode $t$ ; $[PE]$
$dem_{mp^e t}$	Bedarf für das Endprodukt $p^e$ in Markt $m$ in Periode $t$ ; $[PE]$
$eop_{l_1 l_2 p^c}^{ROU^f}$	$(l_1, l_2, p^c) \in ROU^f$ , Letztmögliche Periode für die Nutzung der Transportkante von Produktionslinie $l_1$ zu $l_2$ für Produkt $p^c$
$eop_{blp^k}^{ROU^b}$	$(b, l, p^k) \in ROU^b$ , Letztmögliche Periode für die Nutzung der Transportkante von Beschaffungsmarkt $b$ zur Produktionslinie $l$ für Kaufteil $p^k$
$eop_{lmp^e}^{ROU^m}$	$(l, m, p^e) \in ROU^m$ , Letztmögliche Periode für die Nutzung der Transportkante von Produktionslinie $l$ in den Markt $m$ für Produkt $p^e$
$inv_{lpfg}^0$	$(l, p, f, g) \in BEP^V$ , Anfangsbestand für Produkt $p$ nach Produktionslinie $l$ in Periode 1; $[PE]$
$kqu_{st}$	Minimal einzuhaltende Kernmitarbeiterquote am Standort $s$ in Periode $t$
$li_{ln}^{sop}$	Frühester SOP der potentiellen Produktionslinie $l^n$

---

$lin_{l^n}^{eop}$	Spätester EOP der potentiellen Produktionslinie $l^n$
$liv_{l^v}^{eop}$	Spätester EOP der vorhandenen Produktionslinie $l^v$
$lk_{lk}^{sop}$	Periode der frühestmöglichen Nutzung der Kapazitätsstufe $k$ auf Produktionslinie $l$
$loss_{lft^g}^f$	$(l, f) \in BEF^n$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t^g$ in Anteil an Kapazität pro Periode nach Befähigung der Produktionslinie $l$ für Produktfamilie $f$
$loss_{lgt^g}^g$	$(l, g) \in BEG^n$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t^g$ in Anteil an Kapazität pro Periode nach Befähigung der Produktionslinie $l$ für Produkt $g$
$loss_{lkt^g}^{lk}$	Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t^g$ in Anteil an Kapazität pro Periode nach Umbau von Produktionslinie $l$ für Kapazitätsstufe $k$
$loss_{lpfgt^g}^p$	$(l, p, f, g) \in BEP^n$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t^g$ in Anteil an Kapazität pro Periode nach Befähigung der Produktionslinie $l$ für Produkt $p$
$lz_{bl}^b$	$(b, l) \in EDG^b$ , Lieferzeit für den Transport einer Einheit eines Kaufteils von Beschaffungsmarkt $b$ zu Produktionslinie $l$ ; [ZE]
$lz_{l_1l_2}^f$	$(l_1, l_2) \in EDG^f$ , Lieferzeit für den Transport einer Produktionseinheit von Produktionslinie $l_1$ zu Produktionslinie $l_2$ ; [ZE]
$lz_{lm}^m$	$(l, m) \in EDG^m$ , Lieferzeit für den Transport einer Produktionseinheit von Produktionslinie $l$ in den Markt $m$ ; [ZE]
$ma_{ldt}$	$(l, d) \in LIS$ , Erforderliche Anzahl an Mitarbeitern für den Betrieb der Produktionslinie $l$ in Schichtstufe $d$ in Periode $t$
$mak0_{sv}$	Anzahl an Kernmitarbeitern am Standort $s$ in Periode 0
$maxfv_{p^e t}$	Maximal zulässige Untererfüllung des Endprodukts $p^e$ in Periode $t$ ; [PE]
$maxinv_{lpfgt}$	$(l, p, f, g) \in BEP$ , Maximaler Bestand von Produkt $p$ nach Produktionslinie $l$ in Periode $t$ ; [PE]
$maxkqu_s$	Maximal mögliche Reduzierung der Kernmitarbeiterquote zwischen zwei Perioden
$mbk_{ppk}^m$	$(p, p^k) \in BOM$ , Materialbedarfskoeffizient für Produkt $p^k$ zur Herstellung einer Einheit des Produkts $p$ ; [PE]
$mbk_{p_1p_2}^p$	$(p_1, p_2) \in BOP$ , Materialbedarfskoeffizient für Produkt $p_2$ zur Herstellung einer Einheit des Produkts $p_1$ ; [PE]

## Modellnotation

---

$mincap_{lt}$	Minimal erforderliche Produktionszeit auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ ; $[ZE]$
$oeel_t$	Overall Equipment Effectiveness der Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$per_{ldt}$	Anzahl der erforderlichen Mitarbeiter für den Betrieb von Produktionslinie $l$ in Schichtmodell $d$ in Periode $t$
$t^{gmax}$	Anzahl der Perioden für Generiken
$t^{max}$	Letzte Periode des Betrachtungszeitraums
$t^{min}$	Erste Periode des Betrachtungszeitraums
$t^{tmax}$	Letzte Periode des erweiterten Betrachtungszeitraums
$trp_l^{ln}$	Periode in der relativ zum SOP einer potentiellen Produktionslinie eine Ersatzinvestition zu tätigen ist
$trp_l^{lv}$	Periode in der eine Ersatzinvestition für eine bestehende Linie zu tätigen ist
$tsh_{lt}$	Produktiv nutzbarer Zeitanteil von Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$zs$	Zinssatz
$zvf_{lf}$	$(l, f) \in BEF^n$ , zeitlicher Vorlauf für den Umbau der Produktionslinie $l$ für die Befähigung für Produktfamilie $f$
$zvg_{lg}$	$(l, g) \in BEG^n$ , zeitlicher Vorlauf für den Umbau der Produktionslinie $l$ für die Befähigung für Produktgeneration $g$
$zvk_{lk}$	$(l, k) \in LK$ , zeitlicher Vorlauf für den Umbau der Produktionslinie $l$ auf die Kapazitätsstufe $k$
$zvp_{lpfg}$	$(l, p, f, g) \in BEP^n$ , zeitlicher Vorlauf für den Umbau der Produktionslinie $l$ für die Befähigung für Produkt $p$

### Kostenparameter

$cAZM_{ldt}$	$(l, d) \in LIS$ , Faktor Kostenzuschlag für den Betrieb der Produktionslinie $l$ in Schichtstufe $d$ in Periode $t$ ; $[GE]$
$cDEM_{lpfg}^{bepn}$	$(l, p, f, g) \in BEP^n$ , Demontagekosten für die Befähigung der Produktionslinie $l$ für das Produkt $p$ ; $[GE]$
$cDEM_{lpfg}^{bepv}$	$(l, p, f, g) \in BEP^n$ Demontagekosten für die Befähigung der Produktionslinie $l$ für das Produkt $p$ ; $[GE]$
$cDEM_{se}^e$	$(s, e) \in SE$ , Demontagekosten für den Abbruch der Technologie $e$ an Standort $s$ ; $[GE]$

---

$cDEM_{lk}^{lk}$	$(l, k) \in LK$ , Demontagekosten für den Rückbau von Produktionslinie $l$ auf die Kapazitätsstufe $k$ ausgehend von der nächst höheren Kapazitätsstufe; $[GE]$
$cDEM_l^l$	Demontagekosten für den Abbruch der Produktionslinie $l$ ; $[GE]$
$cDEM_s^s$	Demontagekosten für den Abbruch des Standorts $s$ ; $[GE]$
$cFIX_{lk}^{cyl}$	$(l, k) \in LK$ , Fixkostenfaktor für den Betrieb der Produktionslinie $l$ in Kapazitätsstufe $k$ relativ zum Betrieb der Produktionslinie $l$ in Kapazitätsstufe 1; $[GE]$
$cFIX_{set}^e$	$(s, e) \in SE$ , Fixkosten für den Betrieb von Technologie $e$ an Standort $s$ in Periode $t$ ; $[GE]$
$cFIX_{lt}^l$	Fixkosten für den Betrieb von Produktionslinie $l$ in Periode $t$ ; $[GE]$
$cFIX_{st}^s$	Fixkosten für den Betrieb von Standort $s$ in Periode $t$ ; $[GE]$
$cINV_{lpfgt}$	$(l, p, f, g) \in BEP$ , Kosten für die Lagerung einer Einheit des Produkts $p$ nach Produktionslinie $l$ für eine Periode in Periode $t$ ; $[GE]$
$cIVT_{lf}^{bef}$	$(l, f) \in BEF$ , Einmalaufwand für die Befähigung der Produktionslinie $l$ für die Produktfamilie $f$ ; $[GE]$
$cIVT_{lg}^{beg}$	$(l, g) \in BEG$ , Einmalaufwand für die Befähigung der Produktionslinie $l$ für die Produktgeneration $g$ ; $[GE]$
$cIVT_{lpfg}^{bep}$	$(l, p, f, g) \in BEP^n$ , Einmalaufwand für die Befähigung der Produktionslinie $l$ für das Produkt $p$ ; $[GE]$
$cIVT_{se}^e$	$(s, e) \in SE^n$ , Einmalaufwand für die Errichtung der Technologie $e$ an Standort $s$ ; $[GE]$
$cIVT_{lk}^{lk}$	$(l, k) \in LK$ , Investitionskosten für die Erweiterung von Produktionslinie $l$ auf die Kapazitätsstufe $k$ ausgehend von der nächst niedrigeren Kapazitätsstufe; $[GE]$
$cIVT_{ln}^l$	Einmalaufwand für die Errichtung der Produktionslinie $l^n$ ; $[GE]$
$cIVT_{sn}^s$	Einmalaufwand für die Errichtung des potentiellen Standorts $s^n$ ; $[GE]$
$cKEh_{p^e}$	Maximal akzeptierte Kosten pro Einheit für das Endprodukt $p^e$ für die Bestimmung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$cKT_{bp^k_t}$	$(b, p^k) \in BKT$ , Einkaufspreis für Kaufteil $p^k$ in Beschaffungsmarkt $b$ in Periode $t$ ; $[GE]$
$cLKH_{lkt}$	$(l, k) \in LK$ , Kostensatz pro Sekunde für den Betrieb der Produktionslinie $l$ in Ausbaustufe $k$ in Periode $t$ ; $[GE]$

## Modellnotation

---

$cLTC_{ln}^{ln}$	Kosten für die anfallende Ersatzinvestition auf Produktionslinie $l^n$ ; [GE]
$cLTC_{lv}^{lv}$	Kosten für die anfallende Ersatzinvestition auf Produktionslinie $l^v$ ; [GE]
$cMA_{st}$	Kosten für einen Kernmitarbeiter an Standort $s$ in Periode $t$ ; [GE]
$cPBAB_{lk}^{lkde}$	$(l, k) \in LK$ , Anlauf- und Planungsbudget für den Rückbau von Produktionslinie $l$ auf die Kapazitätsstufe $k$ ; [GE]
$cPBAB_{lk}^{lkin}$	$(l, k) \in LK$ , Anlauf- und Planungsbudget für die Erweiterung von Produktionslinie $l$ auf die Kapazitätsstufe $k$ ; [GE]
$cPRO_{lpfgt}$	$(l, p, f, g) \in BEP$ Kosten für die Herstellung einer Einheit des Produkts $p$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ ; [GE]
$cRET_{p^e mt}$	Umsatz aus dem Absatz von Produkt $p^e$ in Markt $m$ in Periode $t$ ; [GE]
$cRW_p$	Restwert der Produktionslinie $l^n$ am Ende des Betrachtungszeitraums; [GE]
$cTAR_{z_1 z_2 pt}$	$(z_1, z_2, p) \in ROU^z$ , Zollkosten für den Transport einer Einheit von Produkt $p$ aus Zollregion $z_1$ in Zollregion $z_2$ in Periode $t$ ; [GE]
$cTVB_{blp^k t}$	$(b, l, p^k) \in ROU^b$ , Kosten für den Transport einer Einheit des Kaufteils $p^k$ aus dem Beschaffungsmarkt $b$ zur Produktionslinie $l$ in Periode $t$ ; [GE]
$cTVF_{l_1 l_2 p^c t}$	$(l_1, l_2, p^c) \in ROU^f$ , Kosten für den Transport einer Einheit der Komponente $p^c$ von Produktionslinie $l_1$ zur Produktionslinie $l_2$ in Periode $t$ ; [GE]
$cTVM_{lmp^e t}$	$(l, m, p^e) \in ROU^m$ , Kosten für den Transport einer Einheit des Endprodukts $p^e$ von Produktionslinie $l$ in den Markt $m$ in Periode $t$ ; [GE]

### Parameter für die Normierung der Zielgrößen

$EAW^{min}$	Untergrenze Einmalaufwand ; [GE]
$EAW^{max}$	Obergrenze Einmalaufwand ; [GE]
$FL^{min}$	Untergrenze Flexibilität
$FL^{max}$	Obergrenze Flexibilität
$KW^{min}$	Untergrenze Kapitalwert; [GE]
$KW^{max}$	Obergrenze Kapitalwert; [GE]
$LU^{min}$	Untergrenze Lieferzuverlässigkeit

---

$LU^{max}$	Obergrenze Lieferzuverlässigkeit
$LG^{min}$	Untergrenze Liefergeschwindigkeit; [ZE]
$LG^{max}$	Obergrenze Liefergeschwindigkeit; [ZE]
$RE^{min}$	Untergrenze Remanenzrisiko
$RE^{max}$	Obergrenze Remanenzrisiko
$LAW^{min}$	Untergrenze Laufende Aufwendungen; [GE]
$LAW^{max}$	Obergrenze Laufende Aufwendungen; [GE]

*Parameter für die Zielprogrammierung*

$GW^{EAW}$	Gewichtungsfaktor Einmalaufwand
$GW^{FL}$	Gewichtungsfaktor Flexibilität
$GW^{KW}$	Gewichtungsfaktor Kapitalwert
$GW^{LU}$	Gewichtungsfaktor Lieferzuverlässigkeit
$GW^{LG}$	Gewichtungsfaktor Liefergeschwindigkeit
$GW^{RE}$	Gewichtungsfaktor Remanenzrisiko
$GW^{LAW}$	Gewichtungsfaktor Laufende Aufwendungen
$EAW^{oS}$	Obere Schranke Zielgröße Einmalaufwand
$FL^{uS}$	Untere Schranke Zielgröße Flexibilität
$KW^{uS}$	Untere Schranke Zielgröße Kapitalwert
$LU^{uS}$	Untere Schranke Zielgröße Lieferzuverlässigkeit
$LG^{oS}$	Obere Schranke Zielgröße Liefergeschwindigkeit
$RE^{oS}$	Obere Schranke Zielgröße Remanenzrisiko
$LAW^{oS}$	Obere Schranke Zielgröße Laufende Aufwendungen
$ZW^{EAW}$	Zielvorgabe Einmalaufwand; [GE]
$ZW_t^{FL}$	Zielvorgabe Flexibilität in Periode $t$
$ZW^{KW}$	Zielvorgabe Kapitalwert; [GE]
$ZW_p^{LU}$	Zielvorgabe Lieferzuverlässigkeit für Produkt $p$
$ZW^{LG}$	Zielvorgabe Liefergeschwindigkeit; [ZE]
$ZW_t^{RE}$	Zielvorgabe Remanenzrisiko
$ZW^{LAW}$	Zielvorgabe Laufende Aufwendungen; [GE]

*Kontinuierliche Entscheidungsvariablen*

$fAZH_{ldt}$	$\geq 0$ , $(l, d) \in LIS$ , Erforderliche Arbeitszeit auf Linie $l$ in Schichtstufe $d$ in Periode $t$
--------------	--

## Modellnotation

---

$fBAZH_{ldt}$	$\geq 0, (l, d) \in LIS$ , Erforderliche Arbeitszeit für die Produktion des Basisvolumens auf Linie $l$ in Schichtstufe $d$ in Periode $t$
$fBINV_{lpfgt^0}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Lagerbestand des Basisvolumens von Produkt $p$ nach Produktionslinie $l$ in Periode $t^0$
$fBPV_{lpfgt}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Anzahl produzierter Einheiten des Basisvolumens von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ als Basisvolumen für die Berechnung der Flexibilität
$fBPVA_{lpfgkt}$	$\geq 0, (l, p, f, g, k) \in BEPK$ , Anzahl produzierter Einheiten des Basisvolumens von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Kapazitätsstufe $k$ in Periode $t$ als Basisvolumen für die Berechnung der Flexibilität
$fBTV_{l_1l_2p^ct}$	$\geq 0, (l_1, l_2, p^c) \in ROU^f$ , Anzahl transportierter Einheiten des Basisvolumens von Produkt $p^c$ von Produktionslinie $l_1$ zu Produktionslinie $l_2$ in Periode $t$
$fBTV_{lmp^et}$	$\geq 0, (l, m, p^e) \in ROU^m$ , Anzahl transportierter Einheiten des Basisvolumens von Produkt $p^e$ in Markt $m$ von Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$fFIX_{lt}^{lk}$	$\geq 0$ , Faktor zur Multiplikation der Fixkosten der Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Abhängigkeit der Kapazitätsstufe
$fFIX_{lt}^l$	$\geq 0$ , Faktor zur Multiplikation der Fixkosten der Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Abhängigkeit der Kapazitätsstufe sowie unter Berücksichtigung des Linienbetriebs
$fFL_t$	Faktor um den die Marktversorgung für alle Produkte mit einem Bedarf größer 0 in Periode $t$ erhöht werden kann
$fFLAZH_{ldt}$	$\geq 0, (l, d) \in LIS$ , Erforderliche Arbeitszeit für die Produktion des Zusatzvolumens auf Linie $l$ in Schichtstufe $d$ in Periode $t$
$fFLINV_{lpfgt^0}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Lagerbestand des Zusatzvolumens von Produkt $p$ nach Produktionslinie $l$ in Periode $t^0$
$fFLPV_{lpfgt}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Anzahl zusätzlich produzierbarer Einheiten von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$fFLPVA_{lpfgkt}$	$\geq 0, (l, p, f, g, k) \in BEPK$ , Anzahl zusätzlich produzierbarer Einheiten von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Kapazitätsstufe $k$ in Periode $t$



---

$fFLTV_{l_1 l_2 p^c}^f$	$\geq 0, (l_1, l_2, p^c) \in ROU^f$ , Anzahl transportierter Einheiten des Zusatzvolumens von Produkt $p^c$ von Produktionslinie $l_1$ zu Produktionslinie $l_2$ in Periode $t$
$fFLTV_{l m p^e}^m$	$\geq 0, (l, m, p^e) \in ROU^m$ , Anzahl transportierter Einheiten des Zusatzvolumens von Produkt $p^e$ in Markt $m$ von Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$fFV_{pt}$	$\geq 0, p \in P$ , Anzahl nicht produzierter Einheiten des Produkts $p$ in Periode $t$
$fINV_{l p f g t}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Lagerbestand von Produkt $p$ nach Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$fLOSS_{lt}$	$\geq 0, l \in L$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Anteil an Kapazität pro Periode
$fLOSS_{l f t}^f$	$\geq 0, (l, f) \in BEF^n$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Anteil an Kapazität pro Periode durch Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produktfamilie $f$
$fLOSS_{l g t}^g$	$\geq 0, (l, g) \in BEG^n$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Anteil an Kapazität pro Periode durch Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produktgeneration $g$
$fLOSS_{l k_1 k_2 t}^{lk}$	$\geq 0, (l, k_1, k_2) \in LKIN$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Anteil an Kapazität pro Periode durch Erweiterung von Produktionslinie $l$ von Kapazitätsstufe $k_1$ auf Kapazitätsstufe $k_2$
$fLOSS_{l p f g t}^p$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP^n$ , Kapazitätsverlust auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Anteil an Kapazität pro Periode durch Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produkt $p$
$fLU_{pt}$	Lieferzuverlässigkeit von Produkt $p$ in Periode $t$
$fMA_{lt}$	$\geq 0$ , Erforderliche Anzahl an Mitarbeitern für den Betrieb von Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$fMAF_{st}$	$\geq 0$ , Anzahl an Leiharbeitskräften am Standort $s$ in Periode $t$
$fMAK_{st^0}$	$\geq 0$ , Anzahl an Kernmitarbeitern an Standort $s$ in Periode $t^0$
$fMARE_{st}$	$\geq 0$ , Verursachte Remanenzkosten durch die Unterauslastung von Kernmitarbeitern an Standort $s$ in Periode $t$
$fPV_{l p f g t}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Anzahl produzierter Einheiten von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$

## Modellnotation

---

$fPVA_{lpfgkt}$	$\geq 0, (l, p, f, g, k) \in BEPK$ , Anzahl produzierter Einheiten von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Kapazitätsstufe $k$ in Periode $t$
$fRAZH_{ldt}$	$\geq 0, (l, d) \in LIS$ , Erforderliche Arbeitszeit auf Linie $l$ in Schichtstufe $d$ in Periode $t$ im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos
$fRE_t$	Verhältnis aus den im Remanenzfall abgesetzten Einheiten und dem prognostizierten Marktbedarf in Periode $t$
$fRINV_{lpfgt^0}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Lagerbestand von Produkt $p$ nach Produktionslinie $l$ in Periode $t^0$ im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos
$fRPV_{lpfgt}$	$\geq 0, (l, p, f, g) \in BEP$ , Anzahl produzierter Einheiten von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos
$fRPVA_{lpfgkt}$	$\geq 0, (l, p, f, g, k) \in BEPK$ , Anzahl produzierter Einheiten von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Kapazitätsstufe $k$ in Periode $t$ im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos
$fRTV_{blp^kt}^b$	$\geq 0, (b, l, p^k) \in ROU^b$ , Anzahl transportierter Einheiten von Kaufteil $p^k$ aus Beschaffungsmarkt $b$ zu Produktionslinie $l$ in Periode $t$ im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos
$fRTV_{l_1l_2p^ct}^f$	$\geq 0, (l_1, l_2, p^c) \in ROU^f$ , Anzahl transportierter Einheiten von Produkt $p^c$ von Produktionslinie $l_1$ zu Produktionslinie $l_2$ in Periode $t$ im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos
$fRTV_{lmp^ct}^m$	$\geq 0, (l, m, p^e) \in ROU^m$ , Anzahl transportierter Einheiten von Produkt $p^e$ in Markt $m$ von Produktionslinie $l$ in Periode $t$ im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos
$fTV_{blp^kt}^b$	$\geq 0, (b, l, p^k) \in ROU^b$ , Anzahl transportierter Einheiten von Kaufteil $p^k$ aus Beschaffungsmarkt $b$ zu Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$fTV_{l_1l_2p^ct}^f$	$\geq 0, (l_1, l_2, p^c) \in ROU^f$ , Anzahl transportierter Einheiten von Produkt $p^c$ von Produktionslinie $l_1$ zu Produktionslinie $l_2$ in Periode $t$
$fTV_{lmp^ct}^m$	$\geq 0, (l, m, p^e) \in ROU^m$ , Anzahl transportierter Einheiten von Produkt $p^e$ in Markt $m$ von Produktionslinie $l$ in Periode $t$
$fTV^{z_1z_2p}$	$\geq 0, (z_1, z_2, p) \in ROU^z$ , Anzahl transportierter Einheiten von Produkt $p$ aus Zollregion $z_1$ in Zollregion $z_2$ in Periode $t$

---

*Binäre Entscheidungsvariablen*

$bBEF_{lft}^{sop}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, f) \in BEF^n$ , 1 wenn Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produktfamilie $f$ in Periode $t$ in Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bBEF_{lft}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, f) \in BEF$ 1 wenn Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produktfamilie $f$ in Periode $t$ in Betrieb ist, 0 sonst
$bBEG_{lgt}^{sop}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, g) \in BEG^n$ , 1 wenn Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produktgeneration $g$ in Periode $t$ in Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bBEG_{lgt}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, g) \in BEG$ , 1 wenn Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produktgeneration $g$ in Periode $t$ in Betrieb ist, 0 sonst
$bBEP_{lpfgt}^{eop}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, p, f, g) \in BEP$ , 1 wenn Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produkt $p$ in Periode $t$ außer Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bBEP_{lpfgt}^{sop}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, p, f, g) \in BEP$ , 1 wenn Befähigung von Produktionslinie $l$ für Produkt $p$ in Periode $t$ in Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bBEP_{lpfgt}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, p, f, g) \in BEP$ , 1 wenn Befähigung von Produkt $p$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ aktiviert ist, 0 sonst
$bCYT_{lkt}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, k) \in LK$ , 1 wenn Ausbaustufe $k$ auf Produktionslinie $l$ in Periode $t$ genutzt wird, 0 sonst
$bCYTDE_{lk_1k_2t}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, k_1, k_2) \in LKDE$ 1 wenn Produktionslinie $l$ in Periode $t$ von Kapazitätsstufe $k_1$ auf Kapazitätsstufe $k_2$ rückgebaut wird, 0 sonst
$bCYTIN_{lk_1k_2t}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, k_1, k_2) \in LKIN$ , 1 wenn Produktionslinie $l$ in Periode $t$ von Kapazitätsstufe $k_1$ auf Kapazitätsstufe $k_2$ erweitert wird, 0 sonst
$bFV_{p^e t}$	$\in \{0, 1\}$ , 1 wenn Marktbedarf für Produkt $p^e$ in Periode $t$ nicht vollständig erfüllt wird, 0 sonst
$bGET_{set}^{eop}$	$\in \{0, 1\}$ , $(s, e) \in SE$ , 1 wenn Technologie $e$ am Standort $s$ in Periode $t$ außer Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bGET_{set}^{sop}$	$\in \{0, 1\}$ , $(s, e) \in SE^n$ , 1 wenn Technologie $e$ am Standort $s$ in Periode $t$ in Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bGET_{set}$	$\in \{0, 1\}$ , $(s, e) \in SE$ 1 wenn Technologie $e$ am Standort $s$ in Periode $t$ in Betrieb ist, 0 sonst

## Modellnotation

---

$bLI_{lt}^{eop}$	$\in \{0, 1\}$ , 1 wenn Produktionslinie $l$ in Periode $t$ außer Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bLI_{l^nt}^{sop}$	$\in \{0, 1\}$ , 1 wenn Produktionslinie $l^n$ in Periode $t$ in Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bLIS_{ldt}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, d) \in LIS$ , 1 wenn auf Produktionslinie $l$ Schichtstufe $d$ in Periode $t$ genutzt wird, 0 sonst
$bLISFL_{ldt}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, d) \in LIS$ , 1 wenn auf Produktionslinie $l$ Schichtstufe $d$ in Periode $t$ genutzt wird für die Produktion von Zusatzbedarfen, 0 sonst
$bLISR_{ldt}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, d) \in LIS$ , 1 wenn auf Produktionslinie $l$ Schichtstufe $d$ in Periode $t$ genutzt wird im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos, 0 sonst
$bLIT_{lt}$	$\in \{0, 1\}$ , 1 wenn Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Betrieb ist, 0 sonst
$bPER_{ldkt}$	$\in \{0, 1\}$ , $(l, d, k) \in DE$ , 1 wenn Produktionslinie $l$ in Periode $t$ in Schichtstufe $d$ und Ausbaustufe $k$ betrieben wird, 0 sonst
$bRP_{l^nt}$	$\in \{0, 1\}$ , $l^n \in L^n$ , 1 wenn Ersatzinvest auf Produktionslinie $l^n$ in Periode $t$ anfällt, 0 sonst
$bSTT_{st}^{eop}$	$\in \{0, 1\}$ , 1 wenn Standort $s$ in Periode $t$ außer Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bSTT_{s^vt}^{sop}$	$\in \{0, 1\}$ , 1 wenn Standort $s^v$ in Periode $t$ in Betrieb genommen wird, 0 sonst
$bSTT_{st}$	$\in \{0, 1\}$ , 1 wenn Standort $s$ in Periode $t$ in Betrieb ist, 0 sonst

### Entscheidungsvariablen für die Zielprogrammierung

$\delta^{EAW+}$	$\geq 0$ , Positive Abweichung von der Zielvorgabe für den Einmalaufwand
$\delta^{EAW-}$	$\geq 0$ , Negative Abweichung von der Zielvorgabe für den Einmalaufwand
$\delta_t^{FL+}$	$\geq 0$ , Positive Abweichung von der Zielvorgabe für die Flexibilität in Periode $t$
$\delta_t^{FL-}$	$\geq 0$ , Negative Abweichung von der Zielvorgabe für die Flexibilität in Periode $t$
$\delta^{KW+}$	$\geq 0$ , Positive Abweichung von der Zielvorgabe für den Kapitalwert

---

$\delta^{KW-}$	$\geq 0$ , Negative Abweichung von der Zielvorgabe für den Kapitalwert
$\delta^{LAW+}$	$\geq 0$ , Positive Abweichung von der Zielvorgabe für die laufenden Aufwendungen
$\delta^{LAW-}$	$\geq 0$ , Negative Abweichung von der Zielvorgabe für die laufenden Aufwendungen
$\delta_{pt}^{LU+}$	$\geq 0$ , Positive Abweichung von der Zielvorgabe für die Lieferzuverlässigkeit
$\delta_{pt}^{LU-}$	$\geq 0$ , Negative Abweichung von der Zielvorgabe für die Lieferzuverlässigkeit für Produkt $p$ in Periode $t$
$\delta^{LG+}$	$\geq 0$ , Positive Abweichung von der Zielvorgabe für die Liefergeschwindigkeit für Produkt $p$ in Periode $t$
$\delta^{LG-}$	$\geq 0$ , Negative Abweichung von der Zielvorgabe für die Liefergeschwindigkeit
$\delta_t^{RE+}$	$\geq 0$ , Positive Abweichung von der Zielvorgabe für das Remanenzrisiko in Periode $t$
$\delta_t^{RE-}$	$\geq 0$ , Negative Abweichung von der Zielvorgabe für das Remanenzrisiko in Periode $t$

### *Entscheidungsdrücke*

$DKE$	Demontagekosten für Technologien; $[GE]$
$DKE^{ab}$	Demontagekosten für Technologien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$DKL$	Demontagekosten für Produktionslinien; $[GE]$
$DKL^{ab}$	Demontagekosten für Produktionslinien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$DKP$	Demontagekosten für Befähigungen von Produktionslinien für Produkte; $[GE]$
$DKP^{ab}$	Demontagekosten für Befähigungen von Produktionslinien für Produkte, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$DKS$	Demontagekosten für Standorte; $[GE]$
$DKS^{ab}$	Demontagekosten für Standorte, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$EAW$	Zielgröße Einmalaufwand $[GE]$
$EAW^{ab}$	Zielgröße Einmalaufwand, abgezinst auf Periode 1 $[GE]$
$FKE$	Fixkosten für den Betrieb von Technologien; $[GE]$

## Modellnotation

---

$FKE^{ab}$	Fixkosten für den Betrieb von Technologien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$FKE^r$	Fixkosten für den Betrieb von Technologien im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$FKL$	Fixkosten für den Betrieb von Produktionslinien; $[GE]$
$FKL^{ab}$	Fixkosten für den Betrieb von Produktionslinien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$FKL^r$	Fixkosten für den Betrieb von Produktionslinien im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$FKS$	Fixkosten für den Betrieb von Standorten; $[GE]$
$FKS^{ab}$	Fixkosten für den Betrieb von Standorten, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$FKS^r$	Fixkosten für den Betrieb von Standorten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$IKA$	Ersatzinvestitionskosten für Produktionslinien; $[GE]$
$IKA^{ab}$	Ersatzinvestitionskosten für Produktionslinien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$IKE$	Investitionskosten für Technologien; $[GE]$
$IKE^{ab}$	Investitionskosten für Technologien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$IKF$	Investitionskosten für die Befähigung von Produktionslinien für Produktfamilien; $[GE]$
$IKF^{ab}$	Investitionskosten für die Befähigung von Produktionslinien für Produktfamilien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$IKG$	Investitionskosten für die Befähigung von Produktionslinien für Produktgenerationen; $[GE]$
$IKG^{ab}$	Investitionskosten für die Befähigung von Produktionslinien für Produktgenerationen, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$IKL$	Investitionskosten für Produktionslinien; $[GE]$
$IKL^{ab}$	Investitionskosten für Produktionslinien, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$IKP$	Investitionskosten für die Befähigung von Produktionslinien für Produkte; $[GE]$
$IKP^{ab}$	Investitionskosten für die Befähigung von Produktionslinien für Produkte, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$IKR$	Investitionskosten für Kapazitätsrückbau; $[GE]$

---

$IKR^{ab}$	Investitionskosten für Kapazitätsrückbau, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$IKS$	Investitionskosten für Standorte; [GE]
$IKS^{ab}$	Investitionskosten für Produktionsstandorte, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$IKV$	Investitionskosten für Kapazitätserweiterungen; [GE]
$IKV^{ab}$	Investitionskosten für Kapazitätserweiterungen, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$KTk$	Kaufteilkosten; [GE]
$KTk^{ab}$	Kaufteilkosten, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$KTk^r$	Kaufteilkosten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; [GE]
$KW$	Zielgröße Kapitalwert [GE]
$LAK$	Lagerkosten; [GE]
$LAK^{ab}$	Lagerkosten, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$LAK^r$	Lagerkosten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; [GE]
$LAW$	Zielgröße Laufende Aufwendungen; [GE]
$LAW^{ab}$	Zielgröße Laufende Aufwendungen, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$LAW^r$	Zielgröße Laufende Aufwendungen im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; [GE]
$LG$	Zielgröße Liefergeschwindigkeit; [ZE]
$LOK$	Lohnkosten; [GE]
$LOK^{ab}$	Lohnkosten, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$LOK^r$	Lohnkosten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; [GE]
$NU^{EAW}$	Nutzwert für die Zielgröße Einmalaufwand
$NU_t^{FL}$	Nutzwert für die Zielgröße Flexibilität in Periode $t$
$NU^{KW}$	Nutzwert für die Zielgröße Kapitalwert
$NU^{LAW}$	Nutzwert für die Zielgröße laufende Aufwendungen
$NU^{LG}$	Nutzwert für die Zielgröße Liefergeschwindigkeit
$NU_{pt}^{LU}$	Nutzwert für die Zielgröße Liefertreue für Produkt $p$ in Periode $t$
$NU_t^{RE}$	Nutzwert für die Zielgröße Remanenzrisiko in Periode $t$
$PAE$	Planungs- und Anlaufbudget für Kapazitätserweiterungen; [GE]

## Modellnotation

---

$PAE^{ab}$	Planungs- und Anlaufbudget für Kapazitätserweiterungen, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$PAR$	Planungs- und Anlaufbudget für Kapazitätsrückbau; $[GE]$
$PAR^{ab}$	Planungs- und Anlaufbudget für Kapazitätsrückbau, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$PFK$	Proportionale Fertigungskosten; $[GE]$
$PFK^{ab}$	Proportionale Fertigungskosten, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$PFK^r$	Proportionale Fertigungskosten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$REW$	Restwert von Produktionslinien am Ende des Betrachtungszeitraums; $[GE]$
$REW^{ab}$	Restwert von Produktionslinien am Ende des Betrachtungszeitraums, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$TKB$	Kosten für den Transport von Kaufteilen zu Produktionsstandorten; $[GE]$
$TKB^{ab}$	Kosten für den Transport von Kaufteilen zu Produktionsstandorten, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$TKB^r$	Kosten für den Transport von Kaufteilen zu Produktionsstandorten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$TKW$	Kosten für den Transport von Komponenten zwischen Produktionsstandorten; $[GE]$
$TKW^{ab}$	Kosten für den Transport von Komponenten zwischen Produktionsstandorten, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$TKW^r$	Kosten für den Transport von Komponenten zwischen Produktionsstandorten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$TKM$	Kosten für den Transport von Endprodukten zu Märkten; $[GE]$
$TKM^{ab}$	Kosten für den Transport von Endprodukten zu Märkten, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$
$TKM^r$	Kosten für den Transport von Endprodukten zu Märkten im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; $[GE]$
$UAK$	Kosten für die Bezahlung nicht vollständig ausgelasteter Kernmitarbeiter; $[GE]$
$UAK^{ab}$	Kosten für die Bezahlung nicht vollständig ausgelasteter Kernmitarbeiter, abgezinst auf Periode 1; $[GE]$



---

$UAK^r$	Kosten für die Bezahlung nicht vollständig ausgelasteter Kern- mitarbeiter im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; [GE]
$UMS$	Umsatz; [GE]
$UMS^{ab}$	Umsatz, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$ZOK$	Zollkosten; [GE]
$ZOK^{ab}$	Zollkosten, abgezinst auf Periode 1; [GE]
$ZOK^r$	Zollkosten, abgezinst auf Periode 1 im Grenzfall zur Berechnung des Remanenzrisikos; [GE]



## **Anhang**



## A Ergänzungen zur Formulierung des mathematischen Optimierungsmodells

Im Rahmen der Vorstellung des mathematischen Optimierungsmodells zur Netzwerk-configuration wurde zur Vermeidung von Wiederholungen auf die mehrfache Vorstellung von analogen Berechnungen verzichtet. Aus Gründen der Vollständigkeit werden diese in Abschnitt 5.2 nicht aufgeführten Formeln im Folgenden vorgestellt.

### A.1 Festlegung der Netzwerkstruktur

Im Folgenden werden die Nebenbedingungen für die Festlegung der Netzwerkstruktur erläutert, die zur Vermeidung von Wiederholungen nicht Teil der Ausführungen in Abschnitt 5.2.2 sind.

#### A.1.1 Betrieb von Produktionsstandorten

Die Modellierung der Zeitpunkte der Inbetriebnahme  $bSTT_{s^nt}^{sop}$  und Außerbetriebnahme  $bSTT_{st}^{eop}$  von Standorten erfolgt analog zu Produktionslinien. Die zugehörigen Formeln werden im Folgenden vorgestellt. Mit Ungleichung A.1 wird sichergestellt, dass die Booleanvariable für die Standortnutzung  $bSTT_{s^nt}$  nur dann den Wert 1 annehmen kann, wenn der zugehörige potentielle Standort  $s^n$  einen SOP hat, d. h.  $bSTT_{s^nt}^{sop} = 1$  gilt.

$$\sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bSTT_{s^nt} \leq \sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bSTT_{ln_t}^{sop} \cdot BigM \quad \forall s^n \in SN, tt \in T \quad (A.1)$$

Um sicherzustellen, dass ein Standort nur maximal einmal in Betrieb genommen wird, wird mit folgender Ungleichung A.2 gefordert, dass die Summe der Booleanvariable  $bSTT_{s^nt}^{sop}$  über den gesamten Betrachtungszeitraum kleiner oder gleich 1 sein muss.

$$\sum_{t \in T} bSTT_{ln_t}^{sop} \leq 1 \quad \forall s^n \in SN \quad (A.2)$$

Durch die in Formel A.3 abgebildete Forderung, dass der Wert der Booleanvariable  $bSTT_{s^nt}^{sop}$  für jeden potentiellen Standort  $s^n$  in jeder Zeitperiode  $t$  kleiner oder gleich der Booleanvariable  $bSTT_{s^nt}$  sein muss, wird sichergestellt, dass sich ein Produktionsstandort in der SOP-Periode in Betrieb befindet.

$$bSTT_{s^nt}^{sop} \leq bSTT_{s^nt} \quad \forall s^n \in SN, t \in T \quad (\text{A.3})$$

Analog wird mit den Ungleichungen A.4 bis A.7 sichergestellt, dass die Booleanvariable  $bSTT_{st}^{eop}$  für einen Produktionsstandort  $s$  in der Periode  $t$  genau dann den Wert 1 annimmt, wenn der Standort in dieser Zeitperiode außer Betrieb genommen wird.

$$bSTT_{st-1} - bSTT_{st} \leq bSTT_{st}^{eop} \quad \forall s \in S, t \in \{T \mid t \geq 2\} \quad (\text{A.4})$$

$$bSTT_{st+1} + bSTT_{st}^{eop} \leq 1 \quad \forall s \in S, t \in \{T \mid t < t^{max}\} \quad (\text{A.5})$$

$$bSTT_{st} \geq bSTT_{st}^{eop} \quad \forall s \in S, t \in \{T \mid t < t^{max}\} \quad (\text{A.6})$$

$$\sum_{t \in T} bSTT_{st}^{eop} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (\text{A.7})$$

## A.1.2 Betrieb von Technologien

Technologien stellen gemäß der Modellbildung keine eigenständigen Knoten eines Produktionsnetzwerks sondern Eigenschaften von Produktionslinien dar. Der Betrieb von Technologien an Produktionsstandorten bildet die Voraussetzung für den Betrieb von Produktionslinien und damit der Herstellung von Produkten. Dementsprechend darf eine Produktionslinie  $l$  in einer Periode  $t$  wie in Formel A.8 dargestellt nur dann betrieben werden, wenn sich die zugehörige Standort-Technologie Beziehung  $(s, e)$  in dieser Periode in Betrieb befindet.

$$\sum_{(s,e,l) \in PNS} bLIT_{lt} \leq bGET_{set} \cdot BigM \quad \forall (s, e) \in SE, t \in T \quad (\text{A.8})$$

Gleichzeitig darf sich eine Standort-Technologie Beziehung  $(s, e)$  in einer Periode  $t$  nur dann in Betrieb befinden, falls für diese Standort-Technologie Beziehung  $(s, e)$  in dieser Periode  $t$  mindestens eine zugehörige Produktionslinie  $l$  betrieben wird (vgl. Nebenbedingung A.9).

$$bGET_{set} \leq \sum_{(s,e,l) \in PNS} bLIT_{lt} \cdot BigM \quad \forall (s, e) \in SE, t \in T \quad (\text{A.9})$$

Mit Ungleichung A.10 wird sichergestellt, dass die Booleanvariable für die Technologie-nutzung  $bGET_{set}$  nur dann den Wert 1 annehmen kann, wenn die zugehörige potentielle Standort-Technologie Beziehung  $(s, e)$  einen SOP hat, d. h.  $bGET_{set}^{SOP} = 1$  gilt.

$$\sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bGET_{set} \leq \sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bGET_{set}^{SOP} \cdot BigM \quad \forall (s, e) \in SE^n, tt \in T \quad (A.10)$$

Um sicherzustellen, dass eine Standort-Technologie Beziehung nur maximal einmal in Betrieb genommen wird, wird mit folgender Ungleichung A.11 gefordert, dass die Summe der Booleanvariable  $bGET_{set}^{SOP}$  über den gesamten Betrachtungszeitraum kleiner oder gleich 1 sein muss.

$$\sum_{t \in T} bGET_{set}^{SOP} \leq 1 \quad \forall (s, e) \in SE^n \quad (A.11)$$

Durch die in Formel A.12 abgebildete Forderung, dass der Wert der Booleanvariable  $bGET_{set}^{SOP}$  für jede potentielle Standort-Technologie Beziehung  $(s, e)$  in jeder Zeitperiode  $t$  kleiner oder gleich der Booleanvariable  $bGET_{set}$  sein muss, wird sichergestellt, dass sich eine Standort-Technologie Beziehung in der SOP-Periode in Betrieb befindet.

$$bGET_{set}^{SOP} \leq bGET_{set} \quad \forall (s, e) \in SE^n, t \in T \quad (A.12)$$

Analog wird mit den Ungleichungen A.13 bis A.16 sichergestellt, dass die Booleanvariable  $bGET_{set}^{eop}$  für eine Standort-Technologie Beziehung  $(s, e)$  in der Periode  $t$  genau dann den Wert 1 annimmt, wenn die Standort-Technologie Beziehung in dieser Zeitperiode außer Betrieb genommen wird.

$$bGET_{set-1} - bGET_{set} \leq bGET_{set}^{eop} \quad \forall (s, e) \in SE, t \in \{T | t \geq 2\} \quad (A.13)$$

$$bGET_{set+1} + bGET_{set}^{eop} \leq 1 \quad \forall (s, e) \in SE, t \in \{T | t < t^{max}\} \quad (A.14)$$

$$bGET_{set} \geq bGET_{set}^{eop} \quad \forall (s, e) \in SE, t \in \{T | t < t^{max}\} \quad (A.15)$$

$$\sum_{t \in T} bGET_{set}^{eop} \leq 1 \quad \forall (s, e) \in S \quad (A.16)$$

### A.1.3 Befähigungsplanung für Produktgenerationen

Die Zeitpunkte der Inbetriebnahme von Befähigungen für Produktgenerationen fließen in die Berechnung des Kapitalwerts ein. Durch die Formeln A.17 bis A.19 wird sichergestellt, dass die Variable  $bBEG_{lgt}^{SOP}$  in der SOP-Periode den Wert 1 annimmt.

$$\sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bBEG_{lgt} \leq \sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bBEG_{lgt}^{sop} \cdot BigM \quad \forall (l, g) \in BEG^n, tt \in T \quad (A.17)$$

$$\sum_{t \in T} bBEG_{lgt}^{sop} \leq 1 \quad \forall (l, g) \in BEG^n \quad (A.18)$$

$$bBEG_{lgt}^{sop} \leq bBEG_{lgt} \quad \forall (l, g) \in BEG^n, t \in T \quad (A.19)$$

### A.1.4 Befähigungsplanung für Produktfamilien

Die Befähigung einer Produktionslinie für ein Produkt setzt die Befähigung für die zugehörige Produktfamilie voraus. Formal lässt sich dieser Zusammenhang derart ausdrücken, dass die Booleanvariable  $bBEP_{lpfgt}$ , die eine Befähigung einer Produktionslinie  $l$  für ein Produkt  $p$  anzeigt, das der Produktfamilie  $f$  und Produktgeneration  $g$  angehört, nur dann den Wert 1 annehmen kann, wenn auch die analoge Booleanvariable  $bBEF_{lft}$  für die Befähigung der Produktfamilie  $f$  in Periode  $t$  den Wert 1 annimmt (vgl. Formel A.20).

$$bBEP_{lpfgt} \leq bBEF_{lft} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in T \quad (A.20)$$

Analog zu Produktbefähigungen bildet der Betrieb einer Produktionslinie  $l$  die Voraussetzung für die Befähigung dieser Produktionslinie für eine Produktfamilie  $f$ , wie in Ungleichung A.21 ausgedrückt.

$$bLIT_t \geq bBEF_{lft} \quad \forall (l, f) \in BEF, t \in T \quad (A.21)$$

Die Zeitpunkte der Inbetriebnahme von Befähigungen für Produktfamilien fließen in die Berechnung des Kapitalwerts ein. Durch die Formeln A.22 bis A.24 wird sichergestellt, dass die Variable  $bBEF_{lft}^{sop}$  in der SOP-Periode den Wert 1 annimmt.

$$\sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bBEF_{lft} \leq \sum_{t \in \{T | t \leq tt\}} bBEF_{lft}^{sop} \cdot BigM \quad \forall (l, f) \in BEF^n, tt \in T \quad (A.22)$$

$$\sum_{t \in T} bBEF_{lft}^{sop} \leq 1 \quad \forall (l, f) \in BEF^n \quad (A.23)$$

$$bBEF_{lft}^{sop} \leq bBEF_{lft} \quad \forall (l, f) \in BEF^n, t \in T \quad (A.24)$$



## A.2 Anforderungen aus der Netzwerkmigration

Im Folgenden werden die Formeln für die Implementierung der Anforderungen aus der Netzwerkmigration vorgestellt, die zur Vermeidung von Wiederholungen nicht Teil der Ausführungen in Abschnitt 5.2.3 sind.

### A.2.1 Betrieb von Produktionsstandorten

#### NM.2: Berücksichtigung des zeitlichen Vorlaufs von Migrationsmaßnahmen

Zur Einhaltung des zeitlichen Vorlaufs für die Eröffnung von Standorten ist sicherzustellen, dass sich potentielle Standorte  $s^n$  in der Periode  $t^{min}$  nicht in Betrieb befinden und die Booleanvariable  $bSTT_{s^n t}$  folglich den Wert 0 annimmt (vgl. Formel A.25).

$$bSTT_{s^n t^{min}} \equiv 0 \quad \forall s^n \in SN \quad (A.25)$$

**NM.4: Keine Wiederinbetriebnahme von Netzwerkelementen** Mit den nachfolgenden Formeln A.26 und A.27 wird sichergestellt, dass keine Wiederinbetriebnahme von Produktionsstandorten nach erstmaliger Stilllegung erfolgt. Für bestehende Produktionsstandorte  $s^v$  ist die Forderung ausreichend, dass die Variable  $bSTT_{s^v t}$  für einen Produktionsstandort in der Periode  $t$  nicht größer als in der Periode  $t-1$  sein darf (vgl. Formel A.26). In Bezug auf potentielle Produktionsstandorte  $s_n$  ist zu fordern, dass die Summe des Betrags aus der Differenz der Variable  $bSTT_{s^n t}$  zu den Zeitpunkten  $t+1$  und  $t$  über alle Perioden den Wert 2 nicht überschreitet (vgl. Formel A.27).

$$bSTT_{s^v t} \leq bSTT_{s^v t-1} \quad \forall s^v \in SV, t \in \{T \mid t \geq 2\} \quad (A.26)$$

$$\sum_{t \in \{T \mid t < t^{max}\}} |bSTT_{s^n t+1} - bSTT_{s^n t}| \leq 2 \quad \forall s^n \in SN \quad (A.27)$$

### A.2.2 Betrieb von Technologien

#### NM.2: Berücksichtigung des zeitlichen Vorlaufs von Migrationsmaßnahmen

Zur Einhaltung des erforderlichen zeitlichen Vorlaufs der Eröffnung von Technologien an Produktionsstandorten sicherzustellen, dass sich potentielle Standort-Technologie

Beziehungen in der Periode  $t^{min}$  nicht in Betrieb befinden und die Booleanvariable  $bGET_{set}$  folglich den Wert 0 annimmt (vgl. Formel A.28).

$$bGET_{set}^{min} \equiv 0 \quad \forall (s, e) \in SE^n \quad (\text{A.28})$$

**NM.4: Keine Wiederinbetriebnahme von Netzwerkelementen** Mit den nachfolgenden Formeln A.29 und A.30 wird sichergestellt, dass keine Wiederinbetriebnahme von Standort-Technologie Beziehungen nach erstmaliger Stilllegung erfolgt. Für bestehende Standort-Technologie Beziehungen  $(s, e)$  mit  $(s, e) \in SE^v$  ist die Forderung ausreichend, dass die Variable  $bGET_{set}$  für eine Standort-Technologie Beziehung in der Periode  $t$  nicht größer als in der Periode  $t - 1$  sein darf (vgl. Formel A.29). In Bezug auf potentielle Standort-Technologie Beziehungen  $(s, e)$  mit  $(s, e) \in SE^n$  ist zu fordern, dass die Summe des Betrags aus der Differenz der Variable  $bGET_{set}$  zu den Zeitpunkten  $t + 1$  und  $t$  über alle Perioden den Wert 2 nicht überschreitet (vgl. Formel A.30).

$$bGET_{set} \leq bGET_{set-1} \quad \forall (s, e) \in SE^v, t \in \{T \mid t \geq 2\} \quad (\text{A.29})$$

$$\sum_{t \in \{T \mid t < t^{max}\}} |bGET_{set+1} - bGET_{set}| \leq 2 \quad \forall (s, e) \in SE^n \quad (\text{A.30})$$

### A.2.3 Befähigungsplanung für Produktgenerationen

**NM.5: Berücksichtigung der techn. Fähigkeiten von Netzwerkelementen** Im Zuge der Befähigungsplanung ist sicherzustellen, dass die maximale Variantenkazität einer Produktionslinie für Produktgenerationen, also die Anzahl an Produktgenerationen für die eine Produktionslinie in einer Periode befähigt sein kann, nicht überschritten wird. Mit nachfolgender Ungleichung A.31 wird die Anzahl der parallel in Betrieb befindlichen Befähigungen für Produktgenerationen auf den linien- und periodenspezifischen Maximalwert  $beg_{lt}^{anz}$  begrenzt.

$$\sum_{(l,g) \in BEG} bBEG_{lgt} \leq beg_{lt}^{anz} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{A.31})$$

**NM.6: Berücksichtigung von migrationsbedingten Kapazitätsverlusten** Die Befähigung einer Produktionslinie  $l$  für eine neue Produktgeneration  $g$  erfordert im Allgemeinen einen Linienumbau und eine damit verbundene Produktionsunterbrechung

inkl. anschließender Hochlaufkurve für die Linienausbringung. Mit Formel A.32 werden die Kapazitätsverluste  $fLOSS_{lgt}^g$  in den Perioden nach der Realisierung einer Produktgenerationenbefähigung berücksichtigt.

$$fLOSS_{lgt-zvg_{lg}-1}^g \equiv \sum_{t^g \in \{T^G | t^g < t \wedge t-t^g \leq t^{max}\}} bBEG_{lgt-t^g}^{sop} \cdot loss_{lgt^g}^g$$

$$\forall (l, g) \in BEG^n, t \in \left\{ T^T \mid t > zvg_{lg} + 1 \wedge t \leq t^{max} + zvg_{lg} + 1 \right\} \quad (A.32)$$

## A.2.4 Befähigungsplanung für Produktfamilien

**NM.5: Berücksichtigung der techn. Fähigkeiten von Netzwerkelementen** Im Zuge der Befähigungsplanung ist sicherzustellen, dass die maximale Variantenkapazität einer Produktionslinie für Produktfamilien, also die Anzahl an Produktfamilien für die eine Produktionslinie in einer Periode befähigt sein kann, nicht überschritten wird. Mit Ungleichung A.33 wird die Anzahl der parallel in Betrieb befindlichen Befähigungen für Produktfamilien auf den linien- und periodenspezifischen Maximalwert  $bef_{lt}^{anz}$  begrenzt.

$$\sum_{(l,f) \in BEF} bBEF_{lft} \leq bef_{lt}^{anz} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (A.33)$$

**NM.6: Berücksichtigung von migrationsbedingten Kapazitätsverlusten** Die Befähigung einer Produktionslinie  $l$  für eine neue Produktfamilie  $f$  erfordert im Allgemeinen einen Linienumbau und eine damit verbundene Produktionsunterbrechung inkl. anschließender Hochlaufkurve für die Linienausbringung. Mit Formel A.34 werden die Kapazitätsverluste  $fLOSS_{lgt}^f$  in den Perioden nach der Realisierung einer Produktfamilienbefähigung berücksichtigt.

$$fLOSS_{lft-zvf_{lf}-1}^f \equiv \sum_{t^g \in \{T^G | t^g < t \wedge t-t^g \leq t^{max}\}} bBEF_{lft-t^g}^{sop} \cdot loss_{lft^g}^f$$

$$\forall (l, f) \in BEF^n, t \in \left\{ T^T \mid t > zvf_{lf} + 1 \wedge t \leq t^{max} + zvf_{lf} + 1 \right\} \quad (A.34)$$

## A.3 Anforderung aus dem Netzwerkbetrieb

Analog zum Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf* (vgl. Abschnitt 5.2.4) muss für die beiden anderen Betriebspunkte *Produktion bei maximaler*

*Ausbringung* und *Produktion gemäß Remanenzfall* der Netzwerkbetrieb modelliert werden. Die hierfür herangezogenen Formeln werden im Folgenden erläutert. Sie sind analog zu den in Abschnitt 5.2.4 vorgestellten mathematischen Formulierungen.

Wie in Abschnitt 5.2.5.1 erläutert, setzt sich das Transportvolumen in Märkte im Betriebspunkt *Produktion bei maximaler Ausbringung* aus dem Basisvolumen  $fBTV_{lmp^e_t}^m$  und dem Flexibilitätsvolumen  $fFLTV_{lmp^e_t}^m$  zusammen. Ersteres beschreibt die Marktversorgung mit Produkten gemäß dem prognostiziertem Marktbedarf und zweiteres stellt die über diesen Bedarf hinausgehende mögliche Marktversorgung dar. Diese Logik gilt in analoger Weise für alle betriebsrelevanten Größen wie bspw. Arbeitszeiten oder Lagerbestände. Die jeweiligen Variablen folgen einem analogen Aufbau und unterscheiden sich wie die Variablen für die Transportvolumina durch die Buchstaben B für Basis und FL für Flexibilität.

**NB.1: Einhaltung der maximalen Kapazität** Zur Modellierung des Netzwerkbetriebs muss sichergestellt werden, dass die für die Produktion erforderliche Zeit  $fBAZH_{ldt} + fFLAZH_{ldt}$  bzw.  $fRAZH_{ldt}$  auf Produktionslinie  $l$  in Schichtstufe  $d$  in Periode  $t$  die maximal zur Verfügung stehende Zeit nicht überschreitet. Diese berechnet sich nachdem in Abbildung 5.3 vorgestellten Schema aus der Multiplikation der Anlagenlaufzeit  $cap_{ldt}^D$  mit der OEE  $oe_{lt}$  sowie der Verluste aus der Netzwerkmigration  $fLOSS_{lt}$ . Letzterer gibt an, welcher Zeitanteil einer Periode für die Realisierung von Migrationsmaßnahmen erforderlich ist. Da sich dieser auf die Gesamtverfügbarkeit innerhalb einer Periode bezieht (vgl. Abbildung 5.3) müssen die Verluste  $fLOSS_{lt}$  wie in den Formeln A.35 und A.36 implementiert, durch den in dieser Periode produktiv nutzbaren Zeitanteil  $tsh_{lt}$  dividiert werden. Die Höhe der Verluste  $fLOSS_{lt}$  berechnet sich unabhängig vom Betriebspunkt nach der Formel 5.52.

$$fBAZH_{ldt} + fFLAZH_{ldt} \leq cap_{ldt}^D \cdot oe_{lt} \cdot \frac{tsh_{lt} - fLOSS_{lt}}{tsh_{lt}} \quad \forall (l, d) \in LIS, t \in T \quad (\text{A.35})$$

$$fRAZH_{ldt} \leq cap_{ldt}^D \cdot oe_{lt} \cdot \frac{tsh_{lt} - fLOSS_{lt}}{tsh_{lt}} \quad \forall (l, d) \in LIS, t \in T \quad (\text{A.36})$$

Die für die Produktion in den Betriebspunkten *Produktion bei maximaler Ausbringung* bzw. *Produktion gemäß Remanenzfall* erforderlichen Zeiten  $fFLAZH_{ldt}$  und  $fBAZH_{ldt}$  bzw.  $fRAZH_{ldt}$  auf Produktionslinie  $l$  in Schichtstufe  $d$  und Periode  $t$  ergeben sich gemäß den Formeln A.37 bis A.39 aus der Multiplikation der zugehörigen Produk-

tionsvolumina  $fFLPV_{l_{pfgt}}$ ,  $fBPV_{l_{pfgt}}$  bzw.  $fRPV_{l_{pfgt}}$  je Produktbefähigung mit der zugehörigen Taktzeit  $cyt_{l_{pfgt}}$  sowie der in der Periode aktiven Kapazitätsstufe  $k$ .

$$\sum_{(l,d) \in LIS} fFLAZH_{ldt} \equiv \sum_{(l,p,f,g,k) \in BEPK} fFLPV_{l_{pfgt}} \cdot bCYT_{lkt} \cdot k \cdot cyt_{l_{pfgt}} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (A.37)$$

$$\sum_{(l,d) \in LIS} fBAZH_{ldt} \equiv \sum_{(l,p,f,g,k) \in BEPK} fBPV_{l_{pfgt}} \cdot bCYT_{lkt} \cdot k \cdot cyt_{l_{pfgt}} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (A.38)$$

$$\sum_{(l,d) \in LIS} RAZH_{ldt} \equiv \sum_{(l,p,f,g,k) \in BEPK} fRPV_{l_{pfgt}} \cdot bCYT_{lkt} \cdot k \cdot cyt_{l_{pfgt}} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (A.39)$$

Die erforderlichen Arbeitszeiten  $fFLAZH_{ldt}$ ,  $fBAZH_{ldt}$  und  $fRAZH_{ldt}$  weisen einen Bezug zur Schichtstufe  $d$  auf und dürfen dementsprechend in der Periode  $t$  nur dann einen Wert größer 0 annehmen, wenn die zugehörige Schichtstufe aktiv ist, d. h.  $bLISFL_{ldt}$  bzw.  $bLISR_{ldt}$  gleich 1 gilt (vgl. Ungleichungen A.40 und A.41).

$$fFLAZH_{ldt} + fBAZH_{ldt} \leq bLISFL_{ldt} \cdot BigM \quad \forall (l,d) \in LIS, t \in T \quad (A.40)$$

$$fRAZH_{ldt} \leq bLISR_{ldt} \cdot BigM \quad \forall (l,d) \in LIS, t \in T \quad (A.41)$$

Um zu vermeiden, dass einzelne Schichten in einer Zeitperiode mehrfach genutzt werden, wird mit den Nebenbedingungen A.42 und A.43 sichergestellt, dass für jede Produktionslinie  $l$  in jeder Zeitperiode  $t$  für jeden Betriebspunkt maximal eine Schichtmodellstufe aktiviert ist.

$$\sum_{(l,d) \in LIS} bLISFL_{ldt} \leq 1 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (A.42)$$

$$\sum_{(l,d) \in LIS} bLISR_{ldt} \leq 1 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (A.43)$$

Mit den Ungleichungen A.44 und A.45 wird die Nutzung von nicht in Betrieb befindlichen Produktionslinien unterbunden. Dies wird mit der Formulierung der Forderung erreicht, dass die Summe der Booleanvariable  $bLISFL_{ldt}$  bzw.  $bLISR_{ldt}$  für die Betriebspunkte *Produktion bei maximaler Ausbringung* bzw. *Produktion gemäß Remanenzfall* über alle Schichtstufen in Periode  $t$  für die Produktionslinie  $l$  nur dann einen Wert

größer 0 annehmen kann, wenn die Produktionslinie  $l$  in dieser Periode in Betrieb ist, die Booleanvariable  $bLIT_{lt}$  also dementsprechend den Wert 1 hat.

$$\sum_{(l,d) \in LIS} bLISFL_{ldt} \leq bLIT_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{A.44})$$

$$\sum_{(l,d) \in LIS} bLISR_{ldt} \leq bLIT_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{A.45})$$

### NB.2: Einhaltung des minimalen Betriebspunkts von Netzwerkelementen

Für alle aktiven Produktionslinien  $l$  muss die Betriebszeit in jeder Periode  $t$  den Minimalwert  $mincap_{lt}$  überschreiten. Diese Forderung ist neben dem Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf* für den Betriebspunkt *Produktion gemäß Remanenzfall* (Formel A.46) zu formulieren. Für die Berechnung der Flexibilität erübrigt sich diese Forderung, da nach einer maximalen Linienauslastung gestrebt wird.

$$\sum_{(l,p,f,g,k) \in BEPK} fRPV_{lpfgt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot k \cdot cy_{lpfgt} \geq mincap_{lt} \cdot bLIT_{lt} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{A.46})$$

**NB.3: Sicherstellung der Materialflusserhaltung** Für jede Linie muss in jeder Periode der Zufluss an Kaufteilen und Komponenten, deren Transformation in Komponenten bzw. Endprodukte sowie die Materialabflüsse korrespondieren. Wie in Nebenbedingungen A.47 bis A.49 formal dargestellt, muss in jedem Betriebspunkt die Summe der an Produktionslinie  $l_2$  von allen Produktionslinien  $l_1$ , die  $l_2$  beliefern können, angelieferten Einheiten von Komponente  $p_1$  in jeder Periode  $t$  dem Verbrauch der Komponente  $p_1$  auf  $l_2$  entsprechen. Dieser ergibt sich aus der Multiplikation des Produktionsvolumens  $fRPV_{l_2p_2fgt}$  bzw.  $fBPV_{l_2p_2fgt}$  und  $fFLPV_{l_2p_2fgt}$  aller Produkte  $p_2$ , zu deren Herstellung die Komponente  $p_1$  benötigt wird, mit dem zugehörigen Materialbedarfskoeffizienten  $mbk_{p_2p_1}^p$ .

$$\sum_{(l_1, l_2, p_1) \in ROU^f} fRTV_{l_1 l_2 p_1 t}^f \equiv \sum_{(p_2, p_1) \in BOP} \sum_{(l_2, p_2, f, g) \in BEP} mbk_{p_2 p_1}^p \cdot fRPV_{l_2 p_2 f g t} \quad \forall t \in T, l_2 \in L^{desf}, p_1 \in P^c \quad (\text{A.47})$$

$$\sum_{(l_1, l_2, p_1) \in ROU^f} fBTV_{l_1 l_2 p_1 t}^f \equiv \sum_{(p_2, p_1) \in BOP} \sum_{(l_2, p_2, f, g) \in BEP} mbk_{p_2 p_1}^p \cdot fBPV_{l_2 p_2 f g t}$$

$$\forall t \in T, l_2 \in L^{desf}, p_1 \in P^c \quad (A.48)$$

$$\sum_{(l_1, l_2, p_1) \in ROU^f} fFLTV_{l_1 l_2 p_1 t}^f \equiv \sum_{(p_2, p_1) \in BOP} \sum_{(l_2, p_2, f, g) \in BEP} mbk_{p_2 p_1}^p \cdot fFLPV_{l_2 p_2 f g t}$$

$$\forall t \in T, l_2 \in L^{desf}, p_1 \in P^c \quad (A.49)$$

Analog der Materialflusserhaltung für Komponenten muss diese für Kaufteile für den Betriebspunkt *Produktion gemäß Remanenzfall* formuliert werden (vgl. Formel A.50). Die Menge der an Linie  $l$  in Periode  $t$  angelieferten Kaufteile  $p^k$  muss dem Verbrauch auf  $l$  in  $t$  zur Herstellung von Produkten  $p$  entsprechen. Da Kaufteile nicht als limitierende Größe in die Berechnung der Flexibilität einfließen, erübrigt sich die Formulierung dieser Restriktion für den Betriebspunkt *Produktion bei maximaler Ausbringung*.

$$\sum_{(b, l, p^k) \in ROU^b} fRTV_{bl p^k t}^b \equiv \sum_{(p, p^k) \in BOM} \sum_{(l, p, f, g) \in BEP} mbk_{pp^k}^b \cdot fRPV_{lp f g t}$$

$$\forall t \in T, l \in L, p^k \in P^k \quad (A.50)$$

Nach Gewährleistung der Übereinstimmung von Materialzuflüssen von Kaufteilen und Komponenten mit dem Verbrauch gilt es sicherzustellen, dass die Produktion auf den Produktionslinien für alle Betriebspunkte mit den Materialabflüssen korrespondiert. Da Lager im Modell gedanklich nach den Produktionslinien angeordnet werden, ist in diesem Zusammenhang zusätzlich der Auf- und Abbau von Lagerbeständen zu berücksichtigen. Wie in den Formeln A.51 bis A.53 dargestellt, muss die Summe aus dem Produktionsvolumen für Produkt  $p$  in Periode  $t$  und dem Lagerbestand für  $p$  zum Ende der Vorperiode  $t-1$  der Summe aus allen Materialabflüssen von Produkt  $p$  in  $t$  und dem Lagerbestand am Ende der Periode  $t$  entsprechen.

$$fRPV_{l_1 p f g t} + fRINV_{l_1 p f g t-1}$$

$$\equiv \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} fRTV_{l_1 l_2 p t}^f + \sum_{(l_1, m, p) \in ROU^m} fRTV_{l_1 m p t}^m + fRINV_{l_1 p f g t}$$

$$\forall t \in T, (l_1, p, f, g) \in \{BEP \mid l_1 \in L^{ori}\} \quad (A.51)$$

$$\begin{aligned}
& fBPV_{l_1 p f g t} + fBINV_{l_1 p f g t - 1} \\
& \equiv \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} fBTV_{l_1 l_2 p t}^f + \sum_{(l_1, m, p) \in ROU^m} fBTV_{l_1 m p t}^m + fBINV_{l_1 p f g t} \\
& \forall t \in T, (l_1, p, f, g) \in \{BEP \mid l_1 \in L^{ori}\} \tag{A.52}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& fFLPV_{l_1 p f g t} + fFLINV_{l_1 p f g t - 1} \\
& \equiv \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} fFLTV_{l_1 l_2 p t}^f + \sum_{(l_1, m, p) \in ROU^m} fFLTV_{l_1 m p t}^m + fFLINV_{l_1 p f g t} \\
& \forall t \in T, (l_1, p, f, g) \in \{BEP \mid l_1 \in L^{ori}\} \tag{A.53}
\end{aligned}$$

Wird bei der Dateneingabe fehlerhafterweise eine ausgehende Transportkante von Produktionslinie  $l$  für Produkt  $p$  vorgesehen, jedoch keine zugehörige Linienbefähigung, kann ohne Verletzung der Restriktionen A.51 bis A.53 der Fall eintreten, dass eine gewisse Menge von Produkt  $p$  von Produktionslinie  $l$  zu anderen Produktionslinien bzw. Absatzmärkten ohne zugehöriges Produktionsvolumen transportiert wird. Zur Vermeidung dieser Verletzung der Materialflussenerhaltung werden die Nebenbedingungen A.54 bis A.56 eingeführt. Diese stellen sicher, dass das Produktionsvolumen für jedes Produkt  $p$  in jeder Periode  $t$  unter Berücksichtigung der Lagerbestandsveränderung dem ausgehenden Transportvolumen aller Linien von Produkt  $p$  in Periode  $t$  entspricht.

$$\begin{aligned}
& \sum_{(l, p, f, g) \in \{BEP \mid l \in L^{ori}\}} fRPV_{l p f g t} + fRINV_{l p f g t - 1} - fRINV_{l p f g t} \\
& \equiv \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} fRTVF_{l_1 l_2 p t} + \sum_{(l_1, b, p) \in ROU^m} fRTV_{l_1 b p t}^m \quad \forall t \in T, p \in P \tag{A.54}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{(l, p, f, g) \in \{BEP \mid l \in L^{ori}\}} fBPV_{l p f g t} + fBINV_{l p f g t - 1} - fBINV_{l p f g t} \\
& \equiv \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} fBTV_{l_1 l_2 p t}^f + \sum_{(l_1, b, p) \in ROU^m} fBTV_{l_1 b p t}^m \quad \forall t \in T, p \in P \tag{A.55}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{(l, p, f, g) \in \{BEP \mid l \in L^{ori}\}} fFLPV_{l p f g t} + fFLINV_{l p f g t - 1} - fFLINV_{l p f g t} \\
& \equiv \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} fFLTV_{l_1 l_2 p t}^f + \sum_{(l_1, b, p) \in ROU^m} fFLTV_{l_1 b p t}^m \quad \forall t \in T, p \in P \tag{A.56}
\end{aligned}$$



**NB.4: Modellierung der Lagerhaltung** Die Modellierung der Lagerhaltung erfordert in Ergänzung zur Einbeziehung in den Restriktionen zur Materialflusserhaltung die korrekte Berücksichtigung der zu Beginn des Betrachtungszeitraums vorhandenen Lagerbestände sowie die Einhaltung der maximalen Lagerkapazität. Mit folgenden Nebenbedingungen A.57 und A.58 werden den Lagerbeständen der einzelnen Produkte  $fRINV_{lpfgt^{min-1}}$  bzw.  $fBINV_{lpfgt^{min-1}}$  in der Periode  $t^{min} - 1$  die zugehörigen, vom Betriebspunkt unabhängigen Anfangsbestände  $inv_{lpfg}^0$  zugewiesen.

$$fRINV_{lpfgt^{min-1}} \equiv inv_{lpfg}^0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^v \quad (A.57)$$

$$fBINV_{lpfgt^{min-1}} \equiv inv_{lpfg}^0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^v \quad (A.58)$$

Unter der Annahme, dass in den Perioden vor dem Beginn des Betrachtungszeitraums kein Lagerbestand aufgebaut wurde für eine über den prognostizierten Bedarf hinausgehende Produktion, wird der zugehörige Anfangsbestand  $fFLINV_{lpfgt^{min-1}}$  mit der folgenden Nebenbedingung A.59 auf den Wert 0 gesetzt.

$$fFLINV_{lpfgt^{min-1}} \equiv 0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP \quad (A.59)$$

Im Gegensatz zu vorhandene kann für potentielle Linienbefähigungen, wie in den Formeln A.60 und A.61 dargestellt, kein Anfangsbestand vorhanden sein.

$$fRINV_{lpfgt^{min-1}} \equiv 0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^p \quad (A.60)$$

$$fBINV_{lpfgt^{min-1}} \equiv 0 \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP^p \quad (A.61)$$

Lager weisen eine maximale Kapazität auf, die es im Rahmen der Modellierung des Netzbetriebes einzuhalten gilt. Die Lagerbestände in den Betriebspunkten *Produktion gemäß Remanenzfall*  $fRINV_{lpfgt}$  und *Produktion bei maximaler Ausbringung*  $fBINV_{lpfgt} + fFLINV_{lpfgt}$  dürfen die Grenze  $maxinv_{lpfgt}$  gemäß folgenden Nebenbedingungen A.62 und A.63 in keiner Periode  $t$  überschreiten.

$$fRINV_{lpfgt} \leq maxinv_{lpfgt} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in T \quad (A.62)$$

$$fBINV_{lpfgt} + fFLINV_{lpfgt} \leq maxinv_{lpfgt} \quad \forall (l, p, f, g) \in BEP, t \in T \quad (A.63)$$

## A.4 Kapitalwert

Der Kapitalwert berechnet sich nach folgender in Abschnitt 5.2.5.1 vorgestellten Formel A.64.

$$KW = UMS^{ab} + REW^{ab} - (EAW^{ab} + LAW^{ab}) \quad (A.64)$$

Die einzelnen Summanden in Formel A.64 berechnen sie wie folgt:

$$UMS^{ab} = \sum_{t \in T} \sum_{(l,m,p) \in ROU^m} cRET_{pmt} \cdot fTV_{lmp}^m / (1+z)^{t-1} \quad (A.65)$$

$$REW^{ab} = \sum_{(l^n \in L^n)} bLIT_{l^n, t^{max}} \cdot cRW_{l^n} / (1+z)^{t^{max}-1} \quad (A.66)$$

$$\begin{aligned} EAW^{ab} = & \\ & IKL^{ab} \sum_{l^n \in L^n} \sum_{t \in T} bLI_{l^n}^{sop} \cdot cIVT_{l^n}^l / (1+z)^{t-1} \\ & + IKE^{ab} \sum_{(s,e) \in SE^n} \sum_{t \in T} bGET_{set}^{sop} \cdot cIVT_{se}^e / (1+z)^{t-1} \\ & + IKS^{ab} \sum_{s^n \in S^n} \sum_{t \in T} bSTT_{s^n}^{sop} \cdot cIVT_{s^n}^s / (1+z)^{t-1} \\ & + DKL^{ab} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} bLI_{lt}^{eop} \cdot cDEM_l^l / (1+z)^{t-1} \\ & + DKE^{ab} \sum_{(s,e) \in SE} \sum_{t \in T} bGET_{set}^{eop} \cdot cDEM_{se}^e / (1+z)^{t-1} \\ & + DKS^{ab} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} bSTT_{st}^{eop} \cdot cDEM_s^s / (1+z)^{t-1} \\ & + IKA^{ab} \sum_{(l^n, t, c) \in LTC^{l^n}} \sum_{t' \in T} bRP_{l^n t c t'} \cdot c / (1+z)^{t'-1} \\ & + \sum_{(l^v, t, c) \in LTC^{l^v}} bLIT_{l^v, t} \cdot c / (1+z)^{t-1} \\ & + IKP^{ab} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP^n} \sum_{t \in T} bBEP_{lpfg}^{nsop} \cdot cIVT_{lpfg}^{bep} / (1+z)^{t-1} \\ & + IKF^{ab} \sum_{(l,f) \in BEFN} \sum_{t \in T} BEF_{lft}^{sop} \cdot cIVT_{lf}^{bef} / (1+z)^{t-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +IKG^{ab} \sum_{(l,g) \in BEGN} \sum_{t \in T} bBEG_{lgt}^{sop} \cdot cIVT_{lg}^{beg} / (1+z)^{t-1} \\
& +DKP^{ab} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP^n} \sum_{t \in T} bBEP_{lpfgt}^{eop} \cdot cDEM_{lpfg}^{bepn} / (1+z)^{t-1} \\
& \quad + \sum_{(l,p,f,g) \in BEP^n} \sum_{t \in T} bBEP_{lpfgt}^{eop} \cdot cDEM_{lpfg}^{bepv} / (1+z)^{t-1} \\
& +IKV^{ab} \sum_{(l,k_1,k_2) \in LKIN} \sum_{t \in T} bCYTIN_{lk_1k_2t} \\
& \quad \cdot \sum_{(l,k) \in \{LK | k < k_1 \wedge k \geq k_2\}} cIVT_{lk} / (1+z)^{t-1} \\
& +IKR^{ab} \sum_{(l,k_1,k_2) \in LKDE} \sum_{t \in T} bCYTDE_{lk_1k_2t} \\
& \quad \cdot \sum_{(l,k) \in \{LK | k > k_1 \wedge k \leq k_2\}} cDEM_{l,k}^{lk} / (1+z)^{t-1} \\
& +PAE^{ab} \sum_{(l,k_1,k_2) \in LKIN} \sum_{t \in T} bCYTIN_{lk_1k_2t} \cdot cPBAB_{lk_2}^{lkin} / (1+z)^{t-1} \\
& +PAR^{ab} \sum_{(l,k_1,k_2) > \in LKDE} \sum_{t \in T} bCYTDE_{lk_1k_2t} \cdot cPBAB_{lk_2}^{lkde} / (1+z)^{t-1} \quad (A.67)
\end{aligned}$$

LAW<sup>ab</sup> =

$$\begin{aligned}
& PFK^{ab} \sum_{t \in T} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} cPRO_{lpfgt} \cdot fPV_{lpfgt} / (1+z)^{t-1} \\
& +LOK \sum_{t \in T} \sum_{(l,d,k) \in DE} fAZH_{ldt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot cLKH_{lat} \cdot cAZM_{lsh_t} / (1+z)^{t-1} \\
& +UAK \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} fMARE_{st} / (1+z)^{t-1} \\
& +TKB + \sum_{t \in T} \sum_{(b,l,p^k) \in ROU^b} cTVBM_{blp^k t} \cdot fTV_{blp^k t}^b / (1+z)^{t-1} \\
& +TKW \sum_{t \in T} \sum_{(l_1,l_2,p) \in ROU^f} cTVF_{l_1l_2pt} \cdot fTV_{l_1l_2pt}^f / (1+z)^{t-1} \\
& +TKM + \sum_{t \in T} \sum_{(l,m,p) \in ROU^m} cTVM_{lmp t} \cdot fTV_{lmp t}^m / (1+z)^{t-1} \\
& +KTK \sum_{t \in T} \sum_{(b,l,r) \in ROU^b} cKT_{brt} \cdot fTV_{blrt}^b / (1+z)^{t-1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +LAK \sum_{t \in T} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} cINV_{lpgt} \cdot fINV_{lpgt} / (1+z)^{t-1} \\
& +FKL \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} fFIX_{lt}^l \cdot cFIX_{lt}^l / (1+z)^{t-1} \\
& +FKE \sum_{(s,e) \in SE} \sum_{t \in T} bGET_{set} \cdot cFIX_{set}^e / (1+z)^{t-1} \\
& +FKS \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} bSTT_{st} \cdot cFIX_{st}^s / (1+z)^{t-1} \\
& +ZOK \sum_{(z_1, z_2, p) \in ROU^z} \sum_{t \in T} cTAR_{z_1 z_2 pt} \cdot fTV_{z_1 z_2 pt}^z / (1+z)^{t-1} \tag{A.68}
\end{aligned}$$

## A.5 Remanenzrisiko

Die laufenden Aufwendungen im Betriebspunkt *Produktion gemäß Remanenzfall* berechnen sich gemäß nachfolgender Formel A.69 analog zu den laufenden Aufwendungen im Betriebspunkt *Produktion gemäß prognostiziertem Bedarf*.

$$\begin{aligned}
LAW^r = & \\
& PFK^r \sum_{t \in T} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} cPRO_{lpgt} \cdot fRPV_{lpgt} \\
& +LOK^r \sum_{t \in T} \sum_{(l,d,k) \in DE} fRAZH_{ldt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot cLKH_{lkt} \cdot cAZM_{ldt} \\
& +UAK^r \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} fRMARE_{st} \\
& +TKB^r \sum_{t \in T} \sum_{(b,l,p^k) \in ROU^b} cTVB_{blp^k t} \cdot fRTV_{blp^k t}^b \\
& +TKW^r \sum_{t \in T} \sum_{(l_1, l_2, p) \in ROU^f} cTVF_{l_1 l_2 pt} \cdot fRTV_{l_1 l_2 pt}^f \\
& +TKM^r \sum_{t \in T} \sum_{(l,m,p) \in ROU^m} cTVM_{lmp t} \cdot fRTV_{lmp t}^m \\
& +KTK^r \sum_{t \in T} \sum_{(b,l,p^k) \in ROU^b} cKT_{bp^k t} \cdot fRTV_{blp^k t}^b \\
& +LAK^r \sum_{t \in T} \sum_{(l,p,f,g) \in BEP} cINV_{lpgt} \cdot fRINV_{lpgt}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +FKL^r \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} fFIX_{lt}^l \cdot cFIX_{lt}^l \\
& +FKE^r \sum_{(s,e) \in SE} \sum_{t \in T} bGET_{set} \cdot cFIX_{set}^e \\
& +FKS^r \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} bSTT_{st} \cdot cFIX_{st}^s \\
& +ZOK^r \sum_{(z_1, z_2, p) \in ROU^z} \sum_{t \in T} cTAR_{z_1 z_2 pt} \cdot fRTV_{z_1 z_2 pt}^z \tag{A.69}
\end{aligned}$$

Die Berechnung der Zollkosten für die Materialflüsse  $fRTV_{z_1 z_2 pt}^z$  von Zollregion  $z_1$  in Zollregion  $z_2$  für Kaufteile, Komponenten und Endprodukte erfolgt gemäß Restriktion A.70 durch die Aufsummierung des Transportvolumens auf allen zollregionüberschreitenden Transportkanten.

$$\begin{aligned}
fRTV_{z_1 z_2 pt}^z \equiv & \sum_{(l,m,p^e) \in \{ROU^m \mid (s,e,l,z_1) \in PNSZ \wedge (m,z_2) \in MZ\}} fRTV_{lmp^e t}^m \\
& + \sum_{(l,m,p^e) \in \{ROU^f \mid (s_1,e_1,l_1,z_1) \in PNSZ \wedge (s_2,e_2,l_2,z_2) \in PNSZ\}} fRTV_{l_1 l_2 p^e t}^f \\
& + \sum_{(l,m,p^k) \in \{ROU^b \mid (b,z_1) \in BZ \wedge (s,e,l,z_2) \in PNSZ\}} fRTV_{blp^k t}^b \\
& \forall (z_1, z_2, p) \in ROU^z, t \in T \tag{A.70}
\end{aligned}$$

Zur Berechnung der Entscheidungsvariable  $fRMARE_{st}$  im *Produktion gemäß Remanenzfall* dient die nachfolgende Formel A.71. Diese gewährleistet, dass die Summe der Kosten für nicht ausgelastete Kernmitarbeiter  $fRMARE_{st}$  und die aufgrund der Produktion anfallenden Lohnkosten mindestens so hoch ist, wie die Personalkosten zur Bezahlung der Kernmitarbeiter.

$$\begin{aligned}
& \sum_{(s,e,l) \in PNS} \sum_{(l,d,k) \in DE} fRAZH_{ldt} \cdot bCYT_{lkt} \cdot cLKH_{lkt} + fRMARE_{st} \\
& \geq fMAK_{st} \cdot cMA_{st} \quad \forall s \in S, t \in T \tag{A.71}
\end{aligned}$$



## B Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in das Datenmodell zur Netzwerkkonfiguration

In folgender Tabelle B.1 ist die vollständige Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die in Abschnitt 6.1.3.2 vorgestellte allgemeine Struktur des Datenmodells zur Netzwerkkonfiguration dargestellt. Sowohl Index- als auch Modellparametermengen können Informationen zum aktuellen und zukünftigen Produktionsnetzwerk beinhalten. So bezieht sich der maximale Bestand von Produkt  $p$  nach Produktionslinie  $l$   $\max inv_{l|p|fgt}$  mit  $(l, p, f, g) \in BEP$  bspw. sowohl auf den maximalen Bestand nach bereits vorhandenen Produktionslinien  $l^v$  als auch potentiellen Linien  $l^n$ . Die Index- und Modellparametermengen sind in Tabelle B.1 dementsprechend teilweise zweifach zugewiesen.

Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur

	Aktuelles Netzwerk			Zukünftiges Netzwerk		
	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell
$b \in B$	X			X		
$d \in D$	X			X		
$e \in E$	X			X		
$k \in K$	X			X		
$l^n \in L^n$				X		

Fortsetzung auf nächster Seite

**B**

*Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur (Fortsetzung)*

	Aktuelles Netzwerk			Zukünftiges Netzwerk		
	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell
$l^v \in L^v$	X					
$m \in M$	X			X		
$s^n \in S^n$				X		
$s^v \in S^v$	X					
$z \in Z$	X			X		
$BEF^n$				X		
$BEF^v$	X					
$BEG^n$				X		
$BEG^v$	X					
$BEP^n$				X		
$BEP^v$	X					
$BKT$	X			X		
$BZ$	X			X		
$DE$	X			X		
$EDG^b$	X			X		
$EDG^f$	X			X		
$EDG^m$	X			X		
$LIS$	X			X		
$LK$	X			X		
$LKDE$	X			X		

*Fortsetzung auf nächster Seite*



Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur (Fortsetzung)

	Aktuelles Netzwerk			Zukünftiges Netzwerk		
	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell
$LKIN$	X			X		
$LKMI$	X			X		
$MZ$	X			X		
$PNS^n$				X		
$PNS^v$	X					
$PNSZ$	X			X		
$ROU^b$	X			X		
$ROU^z$	X			X		
$ROU^f$	X			X		
$ROU^m$	X			X		
$SE^n$				X		
$SE^v$	X					
$bef_{lt}^{anz}$		X			X	
$befn_{lf}^{art}$					X	
$beg_{lt}^{anz}$		X			X	
$begn_{lg}^{art}$					X	
$bep_{lt}^{anz}$		X			X	
$bep_{lpfg}^{neop}$					X	
$bep_{lpfg}^{nsop}$					X	
$bep_{lpfg}^{veop}$		X				

Fortsetzung auf nächster Seite

*Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur (Fortsetzung)*

	Aktuelles Netzwerk			Zukünftiges Netzwerk		
	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell
$be p_{l p f g}^{v s o p}$		X				
$be p_{l p f g}^{a r t}$					X	
$cap_{l d t}^D$		X			X	
$cyt_{l p f g t}$		X			X	
$eo p_{l_1 l_2 p^c}^{R O U^f}$		X			X	
$eo p_{b l p^k}^{R O U^b}$		X			X	
$eo p_{l m p^r}^{R O U^m}$		X			X	
$inv_{l p f g}^0$		X				
$kqu_{st}$		X			X	
$li_{l n}^{s o p}$					X	
$lin_{l n}^{e o p}$					X	
$liv_{l v}^{e o p}$		X				
$lk_{l k}^{s o p}$		X			X	
$loss_{l f t^g}^f$					X	
$loss_{l g t^g}^g$					X	
$loss_{l k t^g}^{l k}$		X			X	
$loss_{l p f g t^g}^P$		X			X	
$lz_{b l}^b$		X			X	
$lz_{l_1 l_2}^f$		X			X	
$lz_{l m}^m$		X			X	

*Fortsetzung auf nächster Seite*

Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur (Fortsetzung)

	Aktuelles Netzwerk			Zukünftiges Netzwerk		
	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell
$ma_{l dt}$		X			X	
$mak0_{sv}$		X				
$maxinv_{l p f g t}$		X			X	
$maxkq_{us}$		X			X	
$mincap_{l t}$		X			X	
$oe_{l t}$		X			X	
$sop_{b l p^k}^{ROU^b}$					X	
$sop_{l_1 l_2 p^c}^{ROU^F}$					X	
$sop_{l m p^e}^{ROU^m}$					X	
$trp_{l n}^{l n}$					X	
$trp_{l v}^{l v}$		X				
$tsh_{l t}$		X			X	
$zvf_{l f}$					X	
$zvg_{l g}$					X	
$zvl_{l k}$					X	
$zvp_{l p f g}$					X	
$cAZM_{l dt}$			X			X
$cDEM_{l p f g}^{bepn}$						X
$cDEM_{l p f g}^{bepv}$			X			
$cDEM_{se}^e$			X			X

Fortsetzung auf nächster Seite

**B**

*Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur (Fortsetzung)*

	Aktuelles Netzwerk			Zukünftiges Netzwerk		
	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell
$cDEM_{lk}^{lk}$			X			X
$cDEM_l^l$			X			X
$cDEM_s^s$			X			X
$cFIX_{lk}^{cyt}$			X			X
$cFIX_{set}^e$			X			X
$cFIX_{lt}^l$			X			X
$cFIX_{st}^s$			X			X
$cINV_{lpgt}$			X			X
$cIVT_{lf}^{bef}$						X
$cIVT_{lg}^{beg}$						X
$cIVT_{lpg}^{bep}$						X
$cIVT_{se}^e$						X
$cIVT_{lk}^{lk}$						X
$cIVT_{ln}^l$						X
$cIVT_{sn}^s$						X
$cKEh_{pe}$						X
$cKT_{bpkt}$			X			X
$cLKH_{lkt}$			X			X
$cLTC_{ln}^{ln}$						X
$cLTC_{lv}^{lv}$			X			

*Fortsetzung auf nächster Seite*

Tabelle B.1: Einordnung der Modellparameter und Indexmengen in die Datenmodellstruktur (Fortsetzung)

	Aktuelles Netzwerk			Zukünftiges Netzwerk		
	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell	Netzwerkelemente	Parametrierung NE	Kostenmodell
$cMA_{st}$			X			X
$cPBAB_{lk}^{lexde}$						X
$cPBAB_{lk}^{lexin}$						X
$cPRO_{l_p fgt}$			X			X
$cRET_{p^e mt}$			X			X
$cRW_{lp}$						X
$cTAR_{z_1 z_2 pt}$			X			X
$cTVB_{bl p^k t}$			X			X
$cTVF_{l_1 l_2 p^e t}$			X			X
$cTVM_{lmp^e t}$			X			X



## C Richtung der vorgesehenen Abweichung bei der erstmaligen Erhebung der technischen Parameter

Folgende Tabelle C.1 beinhaltet für alle technischen Parameter mit Bezug auf das zukünftige Produktionsnetzwerk die vorgesehene Richtung der Abweichung bei der erstmaligen Datenerhebung.

*Tabelle C.1: Richtung der vorgesehenen Abweichung bei der erstmaligen Erhebung der technischen Parameter*

Technischer Parameter	Richtung der Abweichung
$be f_{lt}^{anz}$	↑
$be f n_{lf}^{art}$	→
$be g_{lt}^{anz}$	↑
$be g n_{lg}^{art}$	→
$be p_{lt}^{anz}$	↑
$be p_{lpfg}^{neop}$	→
$be p_{lpfg}^{nsop}$	←
$be p n_{lpfg}^{art}$	→
$cap_{ldt}^D$	↑
$cy l_{pfgt}$	↓
$eo p_{l_1 l_2 p^c}^{ROU^f}$	→
$eo p_{bl p^k}^{ROU^b}$	→

*Fortsetzung auf nächster Seite*

Tabelle C.1: Richtung der vorgesehenen Abweichung bei der erstmaligen Erhebung der technischen Parameter (Fortsetzung)

Technischer Parameter	Richtung der Abweichung
$eoP_{lmp^e}^{ROU^m}$	→
$kqu_{st}$	↓
$li_{ln}^{sop}$	←
$lin_{ln}^{eop}$	→
$lk_{lk}^{sop}$	←
$loss_{lftg}^f$	↓
$loss_{lgtg}^g$	↓
$loss_{lktg}^{lk}$	↓
$loss_{lpfgt}^p$	↓
$lz_{bl}^b$	↓
$lz_{l_1l_2}^f$	↓
$lz_{lm}^m$	↓
$ma_{ldt}$	↓
$maxinv_{lpfgt}$	↑
$maxkqu_s$	↓
$mincap_{lt}$	↑
$oe_{lt}$	↑
$sop_{blp^k}^{ROU^b}$	←
$sop_{l_1l_2p^c}^{ROU^f}$	←
$sop_{lmp^e}^{ROU^m}$	←
$trp_{ln}^{ln}$	→

Fortsetzung auf nächster Seite



---

*Tabelle C.1: Richtung der vorgesehenen Abweichung bei der erstmaligen Erhebung der technischen Parameter (Fortsetzung)*

Technischer Parameter	Richtung der Abweichung
$tsh_{lt}$	↑
$zvf_{lf}$	↓
$zvg_{lg}$	↓
$zvl_{lk}$	↓
$zvp_{lpg}$	↓

↑: Wert zu hoch

↓: Wert zu niedrig

←: Zeitangabe zu früh

→: Zeitangabe zu spät



## Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke untersucht wurden. Deren Ergebnisse sind in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Nachfolgend sind die Studienarbeiten chronologisch aufgelistet:

- |               |   |
|---------------|---|
| GILLEN, S.    | Quantifizierung der Wandlungsfähigkeit globaler Produktionsnetzwerke, Masterarbeit, 2014, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzepts sowie in den Abschnitt 5.1.2.2. |
| BALLUFF, S.   | Bewertung von Produktallokationspotenzialen in globalen Produktionsnetzwerken, Semesterarbeit, 2014, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzepts.                     |
| PORSTNER, V.  | Identifikation und Bewertung biologischer Analogien zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke, 2015, Masterarbeit, eingeflossen in die Definition des Gesamtkonzepts. |
| QUITTERER, N. | Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke - Bedeutung und Lösungsansätze, Semesterarbeit, 2015, eingeflossen in die Abschnitte 1.1 und 3.2.                               |
| HELFRICH, C.  | Entwicklung eines Kennzahlensystems zur Bewertung von Produktionsnetzwerkalternativen, Masterarbeit, 2015, eingeflossen in die Abschnitte 5.1.2 und 6.1.1.                  |
| KOHL, M.      | Datenerhebung bei der Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke, Semesterarbeit, 2015, eingeflossen in die Abschnitte 2.1.2, 6.1.3 und 6.2.                               |

## Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

---

- SCHREIBER, M. Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke mittels multikriterieller Optimierung, Masterarbeit, 2016, eingeflossen in die Abschnitte 3.3.2 und 5.2.
- QUITTERER, N. Verifikation und Validierung multikriterieller Optimierungsmodelle zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke, Masterarbeit, 2016, eingeflossen in die Verifikation und Validierung des in Abschnitt 5.2 vorgestellten mathematischen Optimierungsmodells.
- SCHOLZ, S. Bewertung von Vorgehensmodellen zur Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke, Masterarbeit, 2017, eingeflossen in die Kapitel 7 und 8.

