

Ein Vier-Ebenen-Ansatz für die Planung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke: Hierarchische Dimensionierung

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

vorgelegt von
Dipl.-Wirt.-Inf. Dietrich Dürksen
33104 Paderborn

Paderborn, März 2011

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Aufgabeninhalte einer hierarchischen Dimensionierung	3
2.1 Aufgabeninhalte der einzelnen Ebenen.....	8
2.1.1 Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.....	8
2.1.2 Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.....	10
2.1.3 Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark	11
2.1.4 Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand	13
2.2 Zusammenspiel der Ebenen.....	14
2.3 Anforderungen an mögliche Methoden bzw. Verfahren.....	16
2.3.1 Anforderungen an die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten	18
2.3.2 Anforderungen an die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten	20
2.3.3 Anforderungen an die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark	21
2.3.4 Anforderungen an die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand	23
3 Stand der Technik	25
3.1 Methoden und Verfahren für die Dimensionierung	25
3.1.1 Methoden und Verfahren für die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten	25
3.1.2 Methoden und Verfahren für die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten	26

3.1.3	Methoden und Verfahren für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark.....	30
3.1.4	Methoden und Verfahren für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand.....	31
3.2	Hierarchische Planung von Produktionsnetzwerken	32
3.2.1	Elemente der hierarchischen Planung	32
3.2.2	Konzeptioneller Rahmen nach Schneeweiß	34
3.2.3	Methoden und Verfahren der hierarchischen Planung	36
4	Zu leistende Arbeit.....	41
4.1	Erstellung mathematischer Optimierungsmodelle für die einzelnen Ebenen	41
4.2	Definition eines hierarchischen Gesamtprozesses	41
5	Konzeption einer hierarchischen Dimensionierung	43
5.1	Planungsmodelle für die hierarchische Dimensionierung	43
5.1.1	Modell für die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten	44
5.1.2	Modell für die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten	52
5.1.3	Modell für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark.....	61
5.1.4	Modell für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand.....	67
5.2	Hierarchischer Gesamtplanungsprozess	74
5.2.1	Koordinationsprozesse	74
5.2.2	Ablauf der hierarchischen Dimensionierung	78
6	Validierung	81
6.1	Prototypische Umsetzung	81
6.1.1	Datenmodell	81
6.1.2	Implementierung des Planungskerns	82
6.1.3	Reduzierung und Beherrschung der Planungskomplexität.....	83
6.2	Anwendungsbeispiel für die hierarchische Dimensionierung	84
6.2.1	Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten	85

6.2.2	Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.....	91
6.2.3	Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark	95
6.2.4	Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand	100
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
8	Literaturverzeichnis	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Horizontale und vertikale Standortbeziehungen	4
Abbildung 2.2 Struktur der Planungsaufgabe der Dimensionierung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke	5
Abbildung 2.3 Aufgabenstruktur der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.....	9
Abbildung 2.4 Aufgabenstruktur der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.....	11
Abbildung 2.5 Aufgabenstruktur der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark	12
Abbildung 2.6 Aufgabenstruktur der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand.....	14
Abbildung 2.7 Zusammenspiel der Ebenen mit Beziehungen der Über- und Unterordnung.....	16
Abbildung 3.1 Struktur der hierarchischen Planung (vgl. [Sch03])	35
Abbildung 3.2 Modulare Struktur von Advanced Planning Systems (vgl. [MWR08]) ..	39
Abbildung 5.1 Darstellung eines Produktionsprozesses als Technologie (vgl. [Tim09])	44
Abbildung 5.2 Eingaben und Ergebnisse der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.....	48
Abbildung 5.3 Eingaben und Ergebnisse der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.....	56
Abbildung 5.4 Eingaben und Ergebnisse der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark	64
Abbildung 5.5 Eingaben und Ergebnisse der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand.....	70
Abbildung 5.6 Hierarchischer Planungsprozess	80
Abbildung 6.1 Aufbau der Planungskomponente	81
Abbildung 6.2 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 1 für 5 Jahre auf Quartalsbasis ..	86
Abbildung 6.3 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 2 für 5 Jahre auf Quartalsbasis ..	86
Abbildung 6.4 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 1	88
Abbildung 6.5 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 1K	89
Abbildung 6.6 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 2	90
Abbildung 6.7 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 2K	91
Abbildung 6.8 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 1 für 2 Jahre auf Monatsbasis....	92

Abbildung 6.9 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 2 für 2 Jahre auf Monatsbasis	92
Abbildung 6.10 Mengenzuordnung für Erzeugnisgruppe 1	94
Abbildung 6.11 Mengenzuordnung für Erzeugnisgruppe 2	95
Abbildung 6.12 Primärbedarfe für den Standort B im Jahr 2011	96
Abbildung 6.13 Kapazitätsauslastung der Werkzeuge – Kumulierte Darstellung für das Jahr 2011	99
Abbildung 6.14 Kapazitätsauslastung der Werkzeuge 4 und 14 – Wochensicht für die Kalenderwochen 1 bis 26 des Jahres 2011.....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1 Größenordnung des derzeitigen Produktionsnetzwerks	84
Tabelle 6.2 Maximale Produktionsmengen pro Quartal in Stück	87
Tabelle 6.3 Kapazitätsstufen in Stück pro Monat	93
Tabelle 6.4 Kapazitätsangebot der verfügbaren Werkzeuge	97
Tabelle 6.5 Übersicht: Anteil Erzeugnisse mit alternativen Technologien	98
Tabelle 6.6 Optimaler Personalbestand für den Standort B	102

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Planung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke. Sie beschäftigt sich hierzu mit der Dimensionierung und der Ausgestaltung der einzelnen Standorte bei gegebener Struktur. Die Dimensionierung wird dabei allgemein verstanden als die Festlegung aller hinsichtlich Aufnahmefähigkeit und Durchsatz geltenden Restriktionen und setzt eine entsprechende Betrachtung der Zeit voraus (vgl. [Dan01]). Bezogen auf die Planung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke bedeutet dies das Festlegen der Aufnahmefähigkeit und des Durchsatzes der Entitäten des Produktionsnetzwerks. Hierzu gehören das Festlegen des Leistungsvermögens der einzelnen Standorte sowie die Bestimmung der tatsächlichen Flüsse im Netzwerk ausgehend vom zukünftigen Leistungsbedarf. Bei der Betrachtung des Leistungsvermögens sind sowohl qualitative als auch quantitative Kapazitätsaspekte zu berücksichtigen. Die Detaillierung dieser Aspekte erfolgt durch die Auslegung der einzelnen Standorte. Hierbei sind der im Zeitverlauf benötigte Maschinen- und Personalbestand zu bestimmen.

2 Aufgabeninhalte einer hierarchischen Dimensionierung

Ein unternehmensinternes Produktionsnetzwerk sind die durch Lieferantenbeziehungen (Kanten) miteinander verbundenen Produktionsstandorte (Knoten) eines Unternehmens. Ein solches Produktionsnetzwerk ist charakterisiert durch die Verteilung der Leistungserstellung auf mehrere Produktionsstandorte. Dies führt zu komplexen logistischen Beziehungen zwischen den Standorten und daraus resultierend zu einem erhöhten Koordinationsaufwand (vgl. [KaLü06]). Nach Pausenberger können horizontale und vertikale Standortbeziehungen unterschieden werden (vgl. [Pau89]). Horizontale Beziehungen bestehen, wenn Standorte auf der gleichen Produktionsstufe angeordnet sind und gleiche oder ähnliche Produktionsprozesse durchführen können. Vertikale Beziehungen bestehen bei einer stufenweisen Verteilung der Produktion auf mehrere Standorte. Abbildung 2.1 stellt die beiden Beziehungstypen graphisch dar.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Produktionsnetzwerke mit folgenden Eigenschaften betrachtet:

- Global verteilte Produktionsstandorte
- Mehrstufige Produktion innerhalb eines Standortes sowie verteilt auf die Standorte
- Mehrproduktproduktion: Es werden verschiedenartige Produkte hergestellt
- Generelle Erzeugnisstruktur: Ein Erzeugnis kann sich aus mehreren Erzeugnissen zusammensetzen und in mehrere Erzeugnisse als Komponente eingehen
- Auftragsorientierte Produktion
- Möglichkeit alternativer Produktionsprozesse

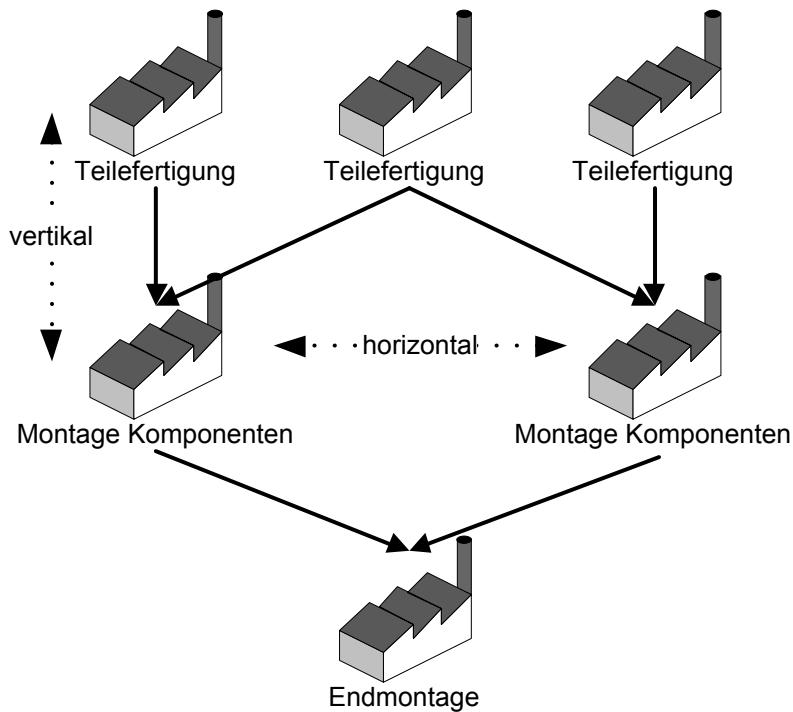


Abbildung 2.1 Horizontale und vertikale Standortbeziehungen

Ein Produktionsnetzwerk kann nicht als starres, unveränderliches Gebilde betrachtet werden, da Änderungen der Rahmenbedingungen Anpassungen des Produktionsnetzwerks erfordern. Es reicht in der Regel jedoch nicht aus, auf Änderungen der Rahmenbedingungen erst dann zu reagieren, wenn diese bereits eingetreten sind, da veranlasste Anpassungen erst zu einem späteren Zeitpunkt wirksam werden. Somit kann eine optimale Leistungserstellung in einem abgestimmten Produktionsnetzwerk nur durch frühzeitig initiierte Anpassungsmaßnahmen gewährleistet werden. Daher ist es notwendig sich schon im Voraus auf mögliche zukünftige Entwicklungen einzustellen und zu gegebener Zeit geeignete Anpassungen zu veranlassen. Das Finden geeigneter Anpassungsmaßnahmen soll dabei durch entsprechende Planung erfolgen, wobei „*Planung [...] als gedankliche Vorwegnahme künftigen Geschehens durch systematische Entscheidungsvorbereitung und Entscheidungsfällung verstanden werden [kann]. Sie beinhaltet einen Entscheidungsprozess, in dem zur Lösung eines Problems zielorientiert Alternativen zu suchen und beurteilen und auszuwählen sind. Dies geschieht unter Zugrundelegung einer monistischen oder pluralistischen Zielfunktion auf Basis einwertiger oder mehrwertiger Erwartung*“ [Hah96]. Ein Entwurf der diesen Prozess als Ergebnis dokumentiert wird als Plan bezeichnet (vgl. [Dan01]).

Zur systematischen Entscheidungsvorbereitung gehört insbesondere auch die formale Definition der Planungsaufgabe. Abbildung 2.2 zeigt die Struktur der Planungsaufgabe der Dimensionierung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke in Anlehnung an Ferstl und Sinz [FS08]. Die Außensicht einer Planungsaufgabe definiert dabei das Aufgabenobjekt, die Voreignisse, die Sach- und Formalziele sowie die Nachereignisse. Die Innensicht definiert das Lösungsverfahren.

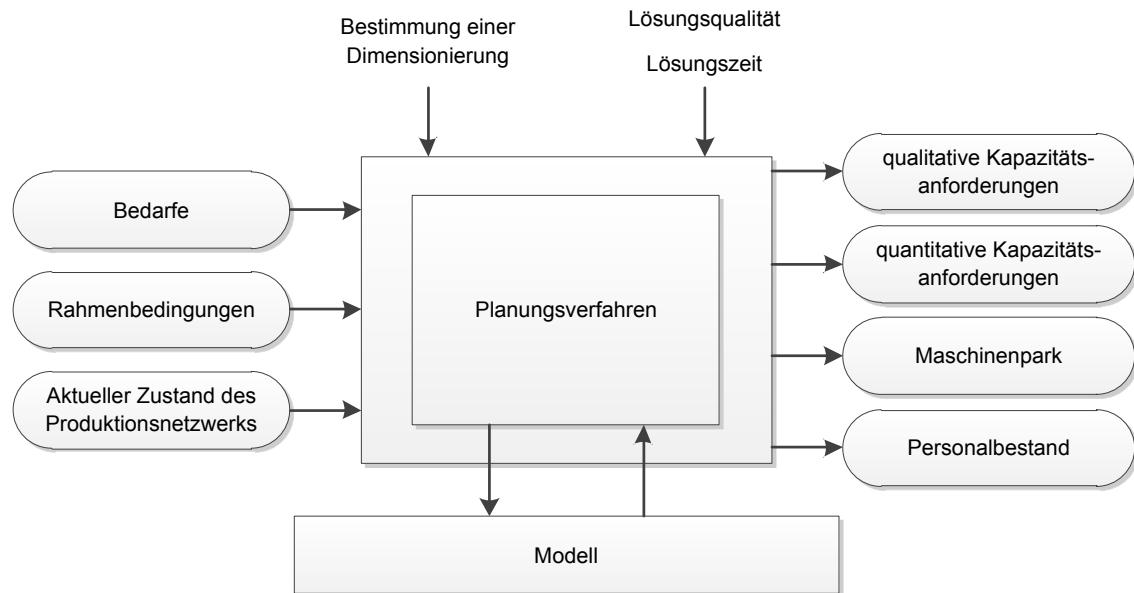


Abbildung 2.2 Struktur der Planungsaufgabe der Dimensionierung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke

Zu den Voreignissen zählt zum einen der aktuelle Systemzustand des Produktionsnetzwerks selbst, der als Ausgangspunkt der Planung zu sehen ist. Es wird hier auf einer gegebenen Netzwerkstruktur bestehend aus Standorten (Knoten) und möglichen Beziehungen (Kanten) aufgesetzt. Zum anderen sind es der aktuelle und zukünftige Zustand sowie die aktuellen und zukünftigen Anforderungen der Umwelt des Produktionsnetzwerks. Insbesondere ist hier die Marktsituation und -entwicklung, die durch die (Kunden-) Bedarfe angegeben wird, relevant. Aber auch andere Rahmenbedingungen, wie z. B. Lokalisierungsanforderungen¹ oder besondere Kundenwünsche, sind hier als Voreignisse zu nennen.

Das Sachziel ist dabei die vorausschauende Bestimmung der Dimensionierung des Produktionsnetzwerks durch die Festlegung des Leistungsvermögens der einzelnen Knoten.

¹ Lokalisierungsanforderungen sind in der Regel geforderte Mindestquoten für die im Endbestimmungsland zu erbringende Wertschöpfung

Das Leistungsvermögen setzt sich wiederum zusammen aus der Leistungsfähigkeit und der Leistungsbereitschaft des Knotens. Die Leistungsfähigkeit (auch technische bzw. qualitative Kapazität) eines Knoten wird definiert als die Menge der Produktionsaufgaben, die dieser Knoten erfüllen kann. Die Leistungsbereitschaft (auch quantitative Kapazität) bestimmt hingegen die Anzahl der Produktionsaufgaben, die ein Knoten in einem intern oder extern definierten Zeitabschnitt durchführen kann². Da die Auslegung der einzelnen Knoten Auswirkungen auf ihr Leistungsvermögen hat, sind die Bestimmung des Maschinenparks und des Personalbestandes bei der Dimensionierung umzusetzen.

Die Formalziele sind hier die Anforderungen an die Lösungsqualität des erstellten Plans und die für die Bearbeitung der Planungsaufgabe benötigte Zeit (Lösungszeit). Das Formalziel der Lösungsqualität soll sicherstellen, dass die Planung nicht nur den Sachzielen genügt, sondern auch aus unternehmerischer Sicht möglichst vorteilhaft ist. Die Bewertung der Lösungsqualität erfolgt anhand einer oder mehrerer vorher festzulegender Zielgrößen durch die Angabe einer Zielfunktion. Da der unternehmerische Erfolg in der Regel anhand monetärer Größen wie Kosten, Gewinn und Umsatz gemessen wird, ist auch hier eine monetäre Zielgröße vorzuziehen. Hier wird von einem vorgegebenen Produktionsprogramm ausgegangen, daher kann bei Erfüllung aller Bedarfe von festen Verkaufserlösen ausgegangen werden. Unter der Annahme fester Verkaufserlöse entspricht die Kostenminimierung der Gewinnmaximierung. Bei Nichterfüllung von Bedarfen gilt dies jedoch nur, wenn die entgangenen Erlöse als Opportunitätskosten in die Bewertung einfließen. Das Formalziel der Lösungszeit ist die Anforderung, dass das Lösungsverfahren innerhalb einer endlichen und im Rahmen der Planungsaufgabe akzeptablen Zeit eine geeignete Lösung findet. Typischerweise besteht zwischen den beiden Zielen Lösungsqualität und Lösungszeit ein Zielkonflikt, da eine bessere Lösung in der Regel nur durch eine längere Lösungszeit erreicht werden kann.

Das Nachereignis ist eine Dimensionierung, die die zukünftige Konfiguration sowie die Entwicklung des Produktionsnetzwerks abbildet und dabei sowohl den Sachzielen als auch den Formalzielen gerecht wird. Sie legt damit die qualitativen und quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten fest und bestimmt die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark sowie die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand. Die formale Beschreibung der Vor- und Nachereignisse erfolgt dabei durch Daten. Die Da-

² Detaillierte Ausführungen zum Leistungsvermögen von Gebrauchsgütern finden sich in [Dan09] und [Ros92]. Diese werden hier analog auf die Knoten eines Produktionsnetzwerks übertragen.

ten der Vorereignisse werden auch als Eingabedaten und die Daten der Nachereignisse als Ausgabedaten bezeichnet.

Das Planungsverfahren definiert den Entscheidungsprozess und legt dabei fest, wie Alternativen zur Lösung des Problems zu suchen und zu bewerten sind. Dabei arbeitet es auf einem Modell³ des Produktionsnetzwerks, da die Betrachtung der zukünftigen Entwicklung am realen Produktionsnetzwerk nicht möglich ist. Das Modell stellt damit das Aufgabenobjekt der Planungsaufgabe dar und bildet die im Rahmen der Planungsaufgabe relevanten Aspekte des realen Produktionsnetzwerks ab. Es beinhaltet eine formale Beschreibung des Regelwerks für das Planungsverfahren und der Größen, die der Beurteilung und Auswahl der Alternativen zugrunde liegen. Dabei stellt es auch die Beziehungen zwischen den durch Daten beschriebenen Vor- und Nachereignissen her.

Bei der Betrachtung der Planungsaufgabe und der Aufgabeninhalte der Dimensionierung lassen sich folgende vier Planungsebenen identifizieren:

- Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten
- Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten
- Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark
- Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

Die ersten zwei Ebenen gliedern die Aufgabeninhalte nach qualitativen und quantitativen Aspekten während die letzten zwei Ebenen eine sukzessive Verfeinerung und Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen darstellen. Zudem unterscheiden sich die Ebenen bezüglich ihrer zeitlichen Reichweite. Während auf Ebene der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten die langfristige Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks bestimmt wird, ist die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen nur für einen kürzeren Zeitraum möglich. Für einen noch kürzeren Zeitraum können die Anforderungen dann auf den letzten beiden Ebenen noch weiter verfeinert und in einem Maschinenpark bzw. Personalbestand umgesetzt werden.

Diese Gliederung ermöglicht es die komplexe Planungsaufgabe der Dimensionierung in mehrere weniger komplexe Teilaufgaben zu unterteilen. Die Zweckmäßigkeit einer solchen Unterteilung begründet sich zum einen durch die zeitliche und sachliche Differen-

³ „Ein Modell ist ein bewußt konstruiertes Abbild der Wirklichkeit, das auf der Grundlage einer Struktur-, Funktions- oder Verhaltensanalogie zu einem entsprechenden Original eingesetzt bzw. genutzt wird, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung am Original nicht oder zunächst nicht möglich oder zweckmäßig ist.“ [Dan01]

ziertheit der Teilaufgaben und zum anderen durch die hierdurch erzielte Reduktion der Komplexität (vgl. [Sch01] S.36). Diese wird dabei auch dadurch erreicht, dass bei langfristigen, globalen Entscheidungen eine aggregierte Sicht des Planungsproblems mit aggregierten Daten gewählt werden kann und eine detaillierte Betrachtung jeweils nur in einem kurzfristigeren und lokal begrenzten Ausschnitt des Aufgabenobjekts erfolgt. In diesem Zusammenhang spielt auch die Unsicherheit der Informationen über die Zukunft und der Detaillierungsgrad der verfügbaren Informationen eine wichtige Rolle. Die Unsicherheit nimmt mit zunehmendem Abstand zur Gegenwart zu, wobei der Detaillierungsgrad der verfügbaren Informationen abnimmt. Die hierarchische Gliederung der Planungsaufgabe berücksichtigt diesen Aspekt durch eine aggregierte Sicht bei langfristigen Planungsaufgaben und einer detaillierteren Sicht bei kurzfristigen Planungsaufgaben. Zusätzlich erlaubt die Unterteilung die Zuordnung der Teilaufgaben zu den organisatorischen Entscheidungsebenen und Entscheidungsträgern eines Unternehmens und erhöht damit die Akzeptanz der Planungsergebnisse (vgl. [Sta96]).

Im Weiteren wird auf die Aufgabeninhalte der identifizierten Ebenen der Dimensionierung im Einzelnen eingegangen. Es werden ihre Betrachtungsgegenstände, Zielstellungen sowie ihre Funktion innerhalb der Gesamtplanungsaufgabe definiert. Anschließend erfolgt in 2.2 die Darstellung des Zusammenspiels der einzelnen Ebenen im Sinne einer hierarchischen Dimensionierung. In 2.3 werden die Anforderungen an mögliche Methoden bzw. Verfahren aufgeführt.

2.1 Aufgabeninhalte der einzelnen Ebenen

2.1.1 Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten bestimmt die langfristige Leistungsfähigkeit der einzelnen Standorte und des gesamten Produktionsnetzwerks. Sie hat in erster Linie die Aufgabe den, durch das Produktionsprogramm definierten, qualitativen Kapazitätsbedarfen ein qualitatives Kapazitätsangebot gegenüberzustellen. Die Festlegung der Leistungsfähigkeit erfolgt dabei durch die Zuordnung von Produktionsprozessen zu Standorten. Damit wird für jeden Standort festgelegt, welche Erzeugnisse an diesem Standort produziert werden können. Hierdurch werden auch Entscheidungen bezüglich der Verlagerungen von Produktionsprozessen an andere Standorte getroffen.

Die Aufgabenstruktur der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Die zu erfüllenden Kapazitätsbedarfe resultieren aus

den zukünftigen Bedarfen für die Erzeugnisse des Unternehmens und stellen damit das entscheidende Voreignis der Planungsaufgabe dar. Zusätzlich sind verschiedene interne sowie externe Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Interne Rahmenbedingungen ergeben sich zum einen aus der grundlegenden strategischen Ausrichtung, z. B. mit dem Ziel der absatzmarknahmen Produktion oder der Erschließung neuer Märkte. Zum anderen sind es spezifische Richtlinien wie z. B. die Festlegung, die Produktion bestimmter Erzeugnisse zur Qualitätssicherung oder zum Schutz vor Produktpiraterie nicht ins Ausland zu verlagern. Externe Rahmenbedingungen sind in der Regel gesetzliche Bestimmungen, wie z. B. Import- und Exportbeschränkungen, oder spezielle Kundenanforderungen. Da die Planung nicht auf der grünen Wiese stattfindet, sind die bestehende Netzwerkstruktur und die aktuelle Zuordnung von Produktionsprozessen zu Standorten, als Voreignisse zu berücksichtigen.

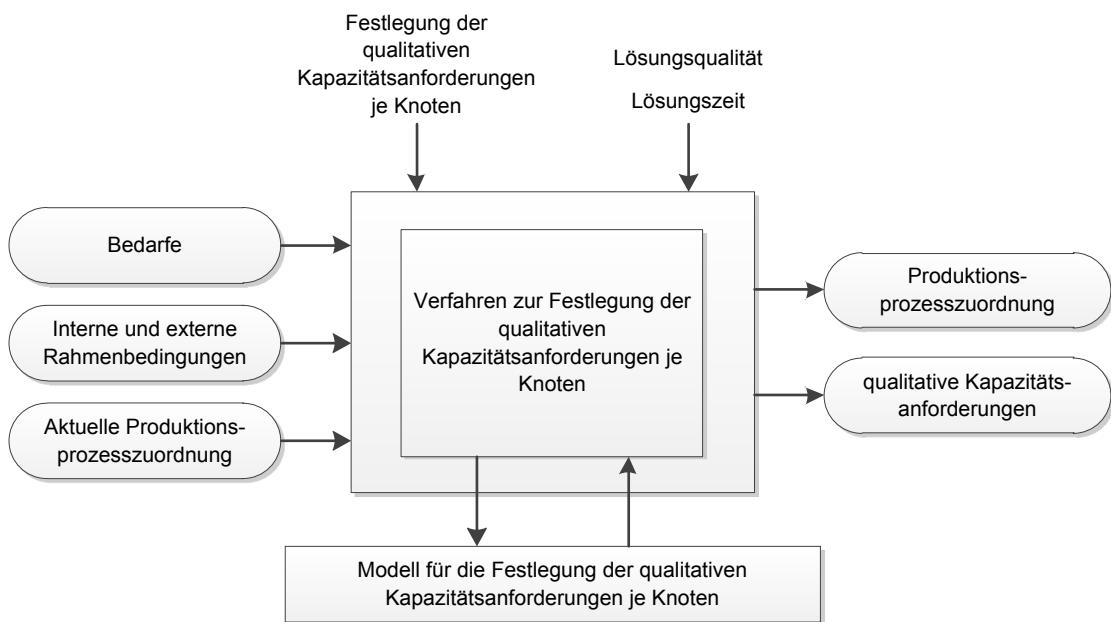


Abbildung 2.3 Aufgabenstruktur der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Das Sachziel ist hierbei die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten unter Berücksichtigung der Voreignisse, insbesondere der Bedarfe. Die Formalziele sind analog zur Gesamtplanungsaufgabe die Anforderungen an die Lösungsqualität und die Lösungszeit.

Das Nachereignis der Planungsaufgabe sind die geplante zukünftige Zuordnung der Produktionsprozesse zu den Standorten sowie die Veränderung dieser Zuordnung im Zeitverlauf. Durch diese Zuordnung erfolgt auch die Festlegung der leistungswirtschaftlichen Zusammenhänge der Produktionsstandorte.

Das Aufgabenobjekt ist ein Modell, das die Eigenschaften des realen Produktionsnetzwerks abbildet, die zu Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten zweckmäßig sind. Dieses Modell ist so zu formulieren, dass es vom Planungsverfahren zur Lösung der Planungsaufgabe genutzt werden kann. Das Planungsverfahren soll basierend auf diesem Modell eine kostenoptimale Lösung bestimmen. Dies erfolgt durch die Auswahl der kostenoptimalen Produktionsprozesszuordnung aus der im Modell festgelegten Menge erlaubter Zuordnungen. Die dabei zu berücksichtigenden Kosten und weitere Anforderungen an ein solches Verfahren sind in Kapitel 2.3.1 aufgeführt.

2.1.2 Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten hat es zur Aufgabe ausgehend vom quantitativen Leistungsbedarf eine gute bzw. optimale Verteilung der Leistungserstellung auf die Standorte zu finden. Dabei erfolgt auch die quantitative Bestimmung der Flüsse im Netzwerk. Hieraus leitet sich die Aufgabenstruktur der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten, die in Abbildung 2.4 dargestellt ist, ab. Die Bedarfe bestimmen als Voreignis den zu erbringenden quantitativen Leistungsbedarf. Weitere Voreignisse sind die aktuellen quantitativen Kapazitäten je Standort sowie die geplanten qualitativen Kapazitäten je Standort. Wie auch schon bei der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen sind auch hier interne und externe Rahmenbedingung zu berücksichtigen.

Das Sachziel dieser Teilaufgabe ist die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten. Dazu ist eine optimale Verteilung der zu produzierenden Erzeugnismengen auf die Standorte unter Berücksichtigung ihrer kapazitativen Ausgestaltungsmöglichkeiten zu finden. Dabei erfolgt auch die quantitative Bestimmung der Flüsse, d. h. der zwischen den Standorten zu transportierenden Erzeugnismengen. Damit findet hier die quantitative Ausgestaltung der leistungswirtschaftlichen Zusammenhänge des Produktionsnetzwerks statt. Die Ausgestaltung der horizontalen Beziehungen erfolgt durch die Verteilung der Mengen auf der gleichen Produktionsstufe und die der vertikalen Beziehungen durch die Bedarfsweitergabe über die Produktionsstufen. Die Formalziele sind von der Gesamtplanungsaufgabe zu übernehmen.

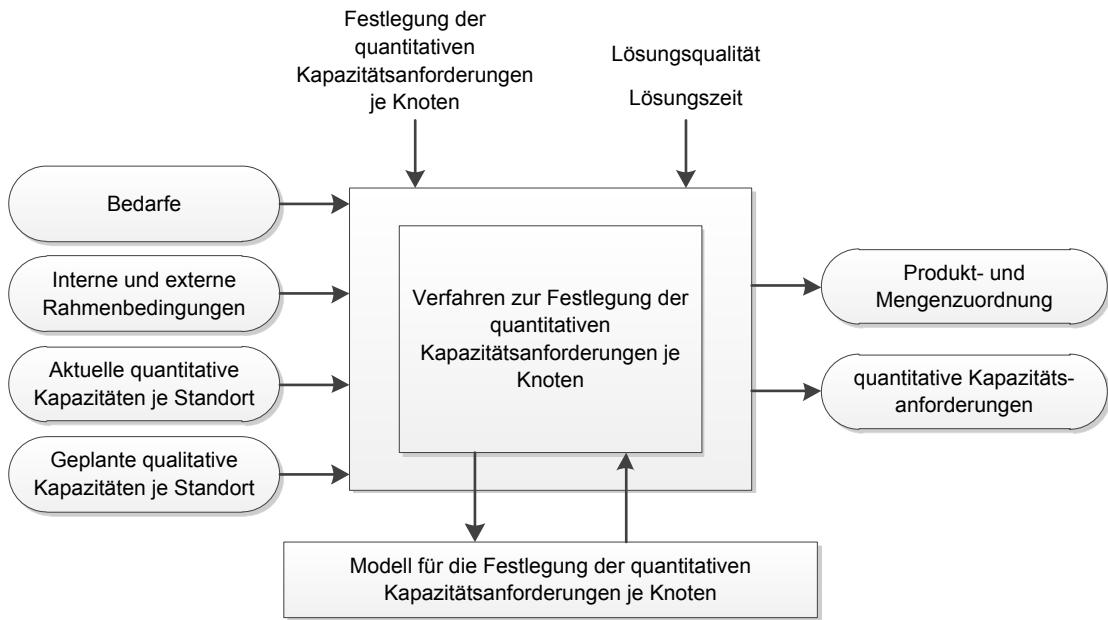


Abbildung 2.4 Aufgabenstruktur der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Das Nachereignis stellt die gefundene Verteilung der zu produzierenden Erzeugnismengen auf die Standorte und die Entwicklung der quantitativen Kapazitäten an den Standorten sowie der Flüsse im Netzwerk dar. Die Bestimmung eines optimalen Plans durch ein Planungsverfahren erfolgt dabei auf einem Modell, das die im Rahmen der Aufgabe relevanten Aspekte des Produktionsnetzwerks abbildet. Hierzu zählen die Struktur des Netzwerks und die leistungswirtschaftlichen Zusammenhänge der Entitäten sowie die kapazitativen Begrenzungen und Gestaltungsmöglichkeiten. Innerhalb des so definierten strukturellen Rahmens bestimmt das Planungsverfahren eine bezüglich der Formalziele optimale quantitative Verteilung und Abstimmung der Leistungserstellung im Produktionsnetzwerk. Die Anforderungen an ein solches Planungsverfahren sind in Kapitel 2.3.2 dargestellt.

2.1.3 Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark

Die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark hat die zur Leistungserbringung benötigten Betriebsmittel zum Planungsgegenstand. Sie geht von dem aktuellen Maschinenbestand und den damit verbundenen Produktionskapazitäten eines Standortes aus und setzt die Zuordnung der Bedarfe zu den Standorten und die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten voraus. Sie

verfolgt dabei das Ziel die vorliegenden Bedarfe kostengünstig zu befriedigen und dabei die zukünftige Entwicklung des Maschinenbestandes möglichst kostengünstig zu gestalten. Dazu ist die optimale Zuordnung der zu fertigenden Primär- und Sekundärbedarfe zu den verfügbaren Maschinen zu finden. In diesem Zusammenhang erfolgt zudem die Abwägung zwischen Eigenfertigung und Fremdvergabe an einen externen Lieferanten (Make-or-Buy-Entscheidung). Diese Entscheidung ist selbstverständlich nur für Erzeugnisse zu treffen, für die eine Fremdvergabeoption tatsächlich existiert. Stehen für die zu fertigenden Erzeugnisse innerhalb eines Standortes alternative Fertigungsprozesse zur Verfügung, ist hier ebenfalls eine kostengünstige Auswahl zu treffen. Die Struktur dieser Planungsaufgabe ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Wie schon bei den zuvor beschriebenen Planungsaufgaben gelten auch hier die Formalziele Lösungsqualität und Lösungszeit. Zur Überführung dieser Planungsaufgabe in ein Verfahren bedarf es eines Modells, das die hierfür relevanten Aspekte eines Standortes, wie z. B. den aktuellen Maschinenbestand sowie die möglichen zukünftige Entwicklungen, wiedergibt und so den gültigen Lösungsraum definiert.

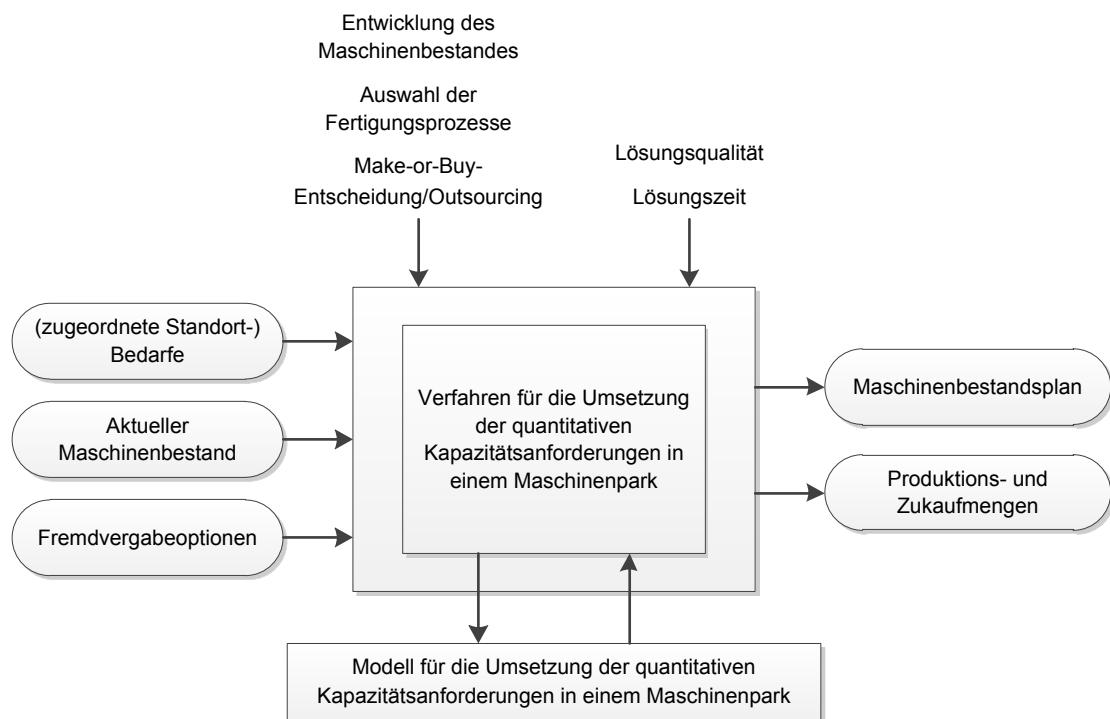


Abbildung 2.5 Aufgabenstruktur der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark

Die gültigen Alternativen innerhalb des Lösungsraums sind anhand einer Zielfunktion unter Berücksichtigung verschiedener Kostengrößen zu bewerten und die günstigste ist

auszuwählen. Die Anforderungen an ein solches Verfahren und die dabei zu berücksichtigenden Kosten werden in Kapitel 2.3.3 aufgeführt.

Die ausgewählte Lösung stellt das Nachereignis dar. Sie wird zum einen in einem Maschinenbestandsplan und zum anderen in einem Plan der Produktions- und Fremdbezugsmengen sowie der Zuordnung der Produktionsmengen zu den Maschinen festgehalten.

2.1.4 Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

Im letzten Schritt der Dimensionierung geht es auf dieser Ebene um die Umsetzung der zuvor bestimmten quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand. Damit ist der Planungsgegenstand dieser Ebene die menschliche Arbeit am Objekt, d. h. das zur Leistungserbringung benötigte Personal. Nach Günther und Tempelmeier besteht die Aufgabe der Personalbestandsplanung darin „*ausgehend von einer gegebenen Anfangsbelegschaft [...] [festzuhalten], welcher Mehr- und Minderbedarf an Personal im Verlauf eines zumeist mittelfristigen Betrachtungshorizontes auftritt*“ [GüTe05]. Dabei sind zur Abdeckung des erwarteten Kapazitätsbedarfs geeignete personelle Ressourcen zur Verfügung zu stellen (vgl. [GüTe05]).

Abbildung 2.6 gibt die Struktur der Planungsaufgabe wider. Wie schon bei der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenbestand, gehen auch hier die dem Standort zugeordneten Bedarfe in die Planung als Voreignis ein. Weitere Voreignisse sind zum einem der aktuelle Personalbestand und die Personalqualifikationen. Zum anderen sind es auch die Planungsergebnisse der vorherigen Ebene, die durch einen Maschinenbestandplan und durch die Vorgabe der fremdbeschafften Erzeugnisse (Kaufteile) angegeben sind. Die Voreignisse definieren die Anfangsbelegschaft sowie den zu erfüllenden Kapazitätsbedarf. Basierend hierauf ist das Sachziel dieser Planungsaufgabe die Bestimmung der optimalen Entwicklung des Personalbestandes und der Personalqualifikationen unter Berücksichtigung der Formalziele Lösungsqualität und Lösungszeit.

Zur Lösung der Planungsaufgabe durch ein Verfahren bedarf es wiederum eines geeigneten Modells, das neben den Eigenschaften des betrachteten Produktionssystems insbesondere auch die bezüglich des Produktionspersonals gültigen Restriktionen abbildet. Hierzu gehören unter anderem die Verfügbarkeit von Personal mit der benötigten Qualifikation, Möglichkeiten der Personalerweiterung und -qualifizierung sowie die Kosten, die hierbei anfallen. Die dabei abzubildenden Anforderungen und zu berücksichtigenden Kosten werden in Kapitel 2.3.4 näher betrachtet.

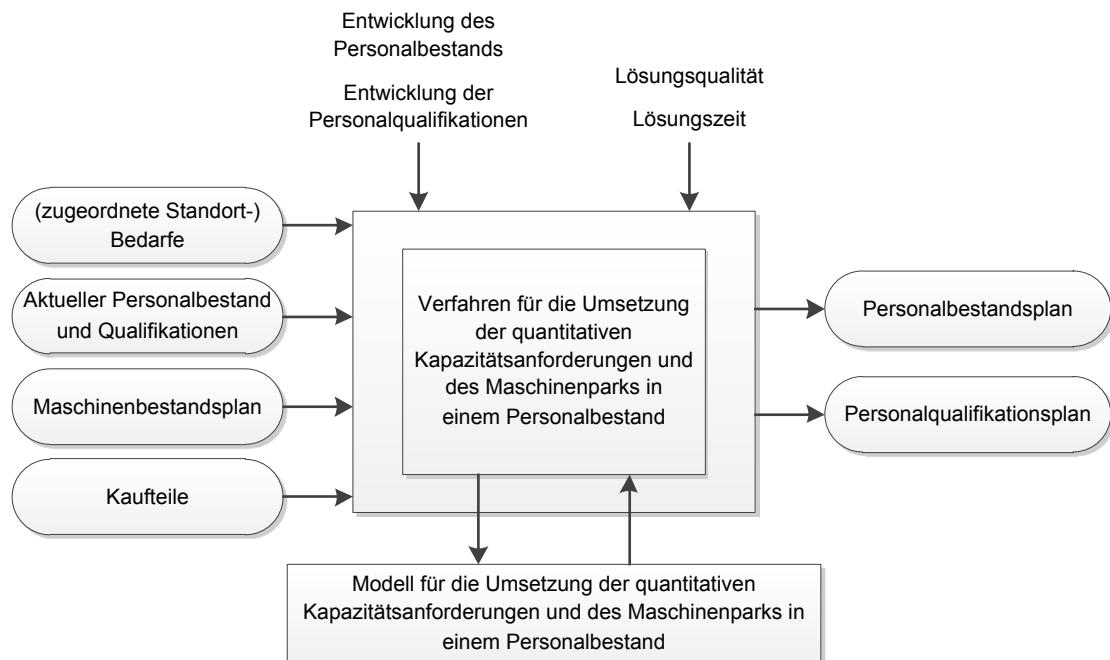


Abbildung 2.6 Aufgabenstruktur der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

Das Ergebnis der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand wird zum einen im Mitarbeiterbestandsplan, der die Entwicklung des Mitarbeiterbestandes über den Zeitverlauf wiedergibt, und zum anderen im Mitarbeiterqualifikationsplan, der die Entwicklung der Mitarbeiterqualifikation wiedergibt, festgehalten. Der Mitarbeiterbestandsplan und der Mitarbeiterqualifikationsplan stellen somit das Nachereignis dar.

2.2 Zusammenspiel der Ebenen

Die hierarchische Zerlegung der gesamten Planungsaufgabe in leichter lösbare Teilaufgaben, wie sie hier für die hierarchische Dimensionierung erfolgt, ist die Grundidee der hierarchischen Planung. Dabei sind die Teilaufgaben durch Koordinationsmechanismen mit einander zu verknüpfen, um eine zulässige und möglichst gute Lösung der Gesamtaufgabe zu ermöglichen (vgl. [Sta96]). Da das Vorhandensein eindeutiger Beziehungen von Über- und Unterordnung der einzelnen Planungsebenen die Voraussetzung für eine hierarchische Zerlegung ist (vgl. [Rie79]), sind diese bei der Umsetzung der Koordinationsprozesse einzubeziehen und geeignet abzubilden. Eine detaillierte Darstellung der Elemente hierarchischer Planung findet sich unter 3.2.1.

Die grundsätzliche hierarchische Struktur der Gesamtplanungsaufgabe und das Zusammenspiel der Ebenen ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Auf der obersten Ebene der Hierarchie findet die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen statt. Diese dient dann als Vorgabe für die untergeordnete Ebene, die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten, und definiert den Rahmen für die hier zu treffenden Entscheidungen. Sind nun die quantitativen Kapazitätsanforderungen festgelegt, dienen sie wiederum als Vorgabe für die Planung der weiter untergeordneten Ebenen. Ausgehend hiervon erfolgt auf Ebene 3 die Umsetzung dieser in einem Maschinenpark, der zusammen mit den quantitativen Kapazitätsanforderungen als Vorgabe in die Ebene 4 eingeht und dort in einen Personalbestand umgesetzt wird.

Bis hierher stellt dies eine vereinfachte Form der hierarchischen Planung als sequentielle Top-Down-Planung dar. Um möglichst gute Lösungen des Gesamtproblems zu erhalten, bedarf es jedoch einer Erweiterung um Rückkopplungsprozesse für die Umsetzung der vollständigen Koordinationsmechanismen. So kann es sein, dass die Vorgaben der übergeordneten Ebenen, auf der untergeordneten Ebene keine zufriedenstellende Lösung ermöglicht und somit als Reaktion eine Rückmeldung an die übergeordnete Ebene erfordert. Damit wird der Einfluss der untergeordneten Ebene auf die übergeordnete Ebene dargestellt. Für die Umsetzung der beschriebenen Beziehungen der Über- und Unterordnung der Planaufgaben sind daher geeignete Koordinationsprozesse zwischen den einzelnen Ebenen zu definieren.

Während auf den oberen zwei Ebenen der Hierarchie eine Betrachtung aller Knoten, also des gesamten Produktionsnetzwerks, notwendig ist, kann auf den unteren Ebenen, aufgrund der vorgegebenen Kapazitätsanforderungen je Konten, auf die netzwerkweite Betrachtung verzichtet werden. Planungsaufgaben, für die keine zentrale Betrachtung notwendig ist, können und sollten dezentral geplant werden, um dabei das Fachwissen des Personals am Standort nutzen zu können (vgl. [Sta08]). Daher sind die Planungsaufgaben der Ebenen 3 und 4 jeweils für jeden Standort durchzuführen. In diesem Zusammenhang spielen die jeweiligen Planungshorizonte, die genutzte Aggregation sowie die Verantwortlichkeiten für die Planungsaufgaben eine wichtige Rolle. Allgemein gilt, dass je weiter die Auswirkungen der Entscheidungen reichen, desto höher ist die Stellung des Entscheiders und desto eher werden die Entscheidungen zentral getroffen (vgl. [FM03]). Aufgrund der längeren Planungshorizonte der Ebenen 1 und 2 sowie ihrer Auswirkungen auf das gesamte Produktionsnetzwerk sind diese zentral zu planen.

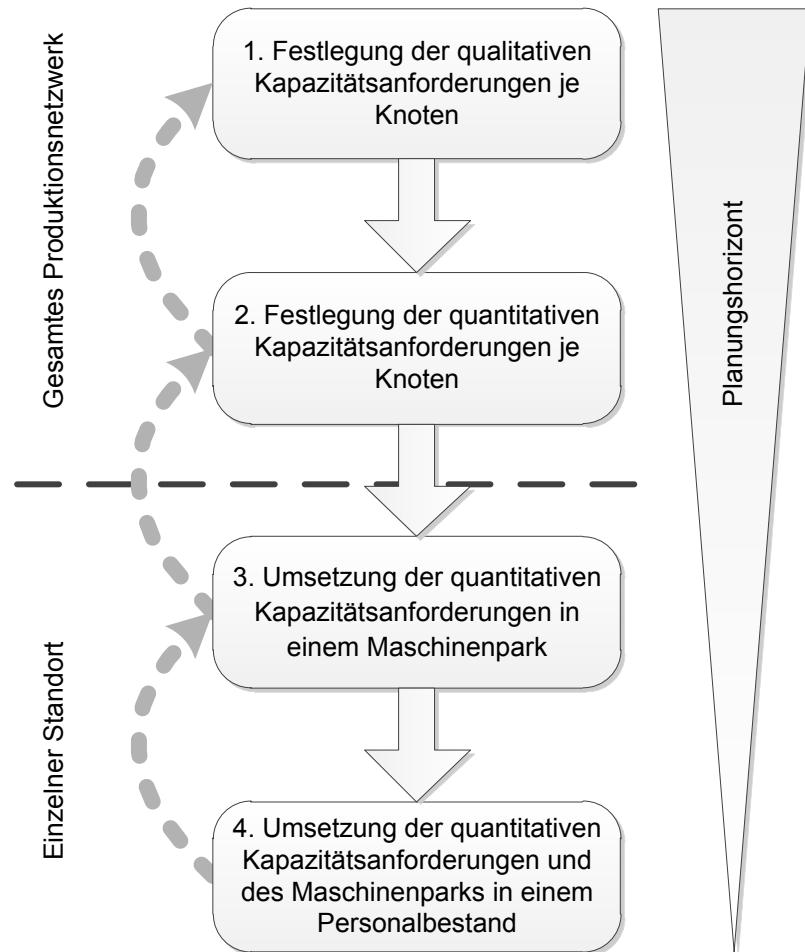


Abbildung 2.7 Zusammenspiel der Ebenen mit Beziehungen der Über- und Unterordnung

2.3 Anforderungen an mögliche Methoden bzw. Verfahren

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, bedarf es zur Lösung jeder Planungsaufgabe eines Planungsverfahrens und eines Modells der Planungsaufgabe. Das Planungsverfahren sowie das Modell sollen hier neben der Erfüllung der Planungsaufgabe auch für die Überführung der Planungsaufgabe in ein rechnergestütztes Planungssystem verwendet werden können. Im Zuge der Erstellung eines solchen rechnergestütztes Planungssystems, das die zuvor beschriebenen Aufgabeninhalte einer hierarchischen Dimensionierung abbildet und das Zusammenspiel der Planungsebenen ermöglicht, sollen hier die Anforderungen an mögliche Methoden bzw. Verfahren aufgeführt werden. Trotz der Unterteilung der Planungsaufgabe in vier Ebenen ist bei der Umsetzung in ein Planungssystem darauf zu achten, dass ein durchgängiger Gesamtplanungsprozess realisiert wird. Daher werden hier zunächst die Anforderungen an das Gesamtverfahren aufgeführt bevor anschließend pro Ebene die Anforderungen an ein Verfahren vorgestellt werden.

Die vorgestellte Unterteilung des Gesamtplanungsproblems in hierarchisch angeordnete Teilprobleme erlaubt es, die einzelnen Planungsaufgaben den Entscheidungsebenen und Planungsverantwortlichen des zu planenden Unternehmens zuzuordnen und so die Akzeptanz der Planungsergebnisse zu erhöhen. Hierzu heißt es bei Stadler in Bezug auf die hierarchische Produktionsplanung (abgekürzt HPP): „*Wesentlich für die HPP ist die eindeutige Zuordnung der Planungsebenen zu den Entscheidungsebenen der betrachteten betrieblichen Organisation, einerseits, um den Erfahrungsschatz der Entscheidungsträger auf den einzelnen Entscheidungsebenen einbeziehen zu können, und andererseits, um die Akzeptanz der HPP zu erhöhen.*“ [Sta96]. Die Notwendigkeit hierzu besteht insbesondere bei rechnergestützten Planungssystemen, da viele Planer befürchten durch Maschinen ersetzt zu werden. Fleischmann, Mayr und Wagner beschreiben diese Problematik in Bezug auf Advanced Planning Systeme (vgl. [FMW08] S.86). Sie stellen heraus, dass Planungssysteme immer nur Entscheidungsunterstützungssysteme sind, die menschliche Planer unterstützen, da sie nur auf Modellen basieren, die nur eine Näherung der Realität darstellen und sie daher menschlichen Wissens, Erfahrung und Fähigkeiten bedürfen, um die Lücke zwischen Modell und Wirklichkeit zu schließen. Die hierarchische Führungs- und Entscheidungsstruktur eines Unternehmens findet ihre Entsprechung in der hierarchischen Strukturierung des Gesamtplanungsproblems der Planung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke. Jedem der Teilprobleme sind daher Planungs- und Entscheidungsverantwortliche zuzuordnen, wobei jeweils der Planungs- und der Entscheidungsverantwortliche nicht die gleiche Person sein müssen. Der Planungsverantwortliche trägt die Verantwortung für die Daten, die Funktion und die Ergebnisse des Planungssystems, wohingegen der Entscheidungsverantwortliche die Entscheidung über die Umsetzung der Ergebnisse trifft (vgl. [FMW08] S.86).

Bei der Unterteilung der Planungsaufgaben und beim Festlegen der Verantwortlichkeiten ist zudem eine geeignete Balance zwischen zentraler netzwerkweiter Planung und verteilter Planung einzelner Standorte zu finden. Lücke und Luczak stellen in diesem Zusammenhang heraus, dass produzierende Unternehmen mit verteilten Produktionsstandorten neue oder erweiterte Planungsprozesse benötigen und dabei eine Kombination aus lokaler Autonomie der Produktionsstandorte und globaler Koordination finden müssen (vgl. [LüLu03]).

Da in einem unternehmensinternen Produktionsnetzwerk in der Regel eine standortübergreifende, mehrstufige Mehrproduktproduktion vorgefunden werden kann, ist sowohl bei der Modellbildung als auch bei der Problemlösung darauf zu achten, dass dieser Aspekt geeignet abgebildet und berücksichtigt wird. Insbesondere ist sowohl bei der Planung des gesamten Netzwerks als auch innerhalb eines Standortes eine mehrstufige Bedarfsweitergabe umzusetzen, um so die vertikale Abstimmung der Produktion zu

ermöglichen. Im Rahmen der horizontalen Abstimmung sind alternative Produktionsprozesse geeignet abzubilden.

2.3.1 Anforderungen an die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Die primäre Anforderung an die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten besteht darin, die Erfüllung des gegebenen Produktionsprogramms zur ermöglichen. Auch wenn auf dieser Ebene die Planung der qualitativen Kapazität im Vordergrund steht, kann der quantitative Aspekt nicht vollständig vernachlässigt werden. So ist es z. B. möglich, dass die Zuordnung eines Produktionsprozesses nur zu einem Standort nicht zur Erfüllung des vollständigen Produktionsprogramms ausreicht und somit eine redundante Zuordnung dieses Produktionsprozesses zu mehreren Standorten notwendig macht. Um diesen Aspekt berücksichtigen zu können, ist es daher notwendig auch quantitative Kapazitätsobergrenzen zu berücksichtigen. Eine Kapazitätsobergrenze kann sowohl für einzelne Produktionsprozesse oder auch für eine Gruppe von Produktionsprozessen existieren. Die quantitativen Kapazitätsobergrenzen spielen auch bei der Berücksichtigung länderspezifischer Lokalisierungsanforderungen eine wichtige Rolle, da erst sie bei einer getroffenen Produktionsprozesszuordnung eine Aussage über die Erfüllbarkeit der geforderten Lokalisierungsquoten ermöglichen.

Bei der Zuordnung der Produktionsprozesse ist zu berücksichtigen, dass ein Produktionsprozess nicht jedem beliebigen Standort zugewiesen werden darf. Aufgrund des gegebenen Netzwerks, seiner Struktur und weiterer Einschränkungen ist die Zuordnung nur zu einer definierten Menge von Standorten möglich. Zudem sollten zu viele und zu häufige Änderungen der Zuordnung vermieden werden, da es insbesondere in der Anlaufphase einer neuen Zuordnung zu Produktivitäts- und Qualitätseinbußen kommen kann.

Im Rahmen eines Planungsverfahrens sind Lösungsalternativen zu finden, zu bewerten und zu vergleichen. Die Bewertung und der Vergleich der gefundenen Lösungen können hier anhand von verschiedenen Kostengrößen erfolgen. Dabei sind in erster Linie die fixen Kosten für eine getroffene Zuordnung von Produktionsprozessen zu Standorten und die einmaligen Kosten, die bei der Veränderung der Zuordnung anfallen, zu berücksichtigen. Die fixen Kosten setzen sich aus allen laufenden Kosten, die notwendig sind, um einen Produktionsprozess an einem Standort durchführen zu können, zusammen. Darunter fallen die diesem Produktionsprozess anteilig zuzuordnenden laufenden Kosten für Grundstücke, Gebäude, Maschinen, Personal sowie Logistik und Transport. Bei Veränderung der Zuordnung von Produktionsprozessen, z. B. bei der Verlage-

rung der Produktion eines oder mehrerer Erzeugnisse von einem Standort zu einem anderen, fallen einmalig Kosten für diese Veränderung an. Diese können sich je nach Umfang der Veränderung deutlich unterscheiden. So ist die Neuzuordnung eines Produktionsprozesses zu einem Standort, an dem bereits ähnliche Produktionsprozesse durchgeführt werden, nur mit geringen Anpassungskosten, z. B. für die Anpassung bestehender Maschinen, verbunden. Dagegen können z. B. bei der Verlagerung einer ganzen Erzeugnisgruppe an den Standort, dem die Produktionsprozesse für diese Erzeugnisse zugeordnet werden, Kosten für die Anschaffung neuer Maschinen, die Erweiterung von Gebäuden oder sogar den Erwerb neuer Grundstücke anfallen. Zudem können Kosten für das Einstellen von neuem Personal oder das Qualifizieren des bestehenden Personals zur Durchführung der neuen Produktionsprozesse anfallen. Zusätzlich sind bei der Einführung neuer Produktionsprozesse an einem Standort in der Regel Anlaufkosten, die aufgrund von geringerer Produktivität und Qualität im Einführungszeitraum entstehen, zu berücksichtigen. Des Weiteren können an dem Standort, dem diese Produktionsprozesse entzogen werden, ebenfalls Kosten entstehen, z. B. für Abfindungen bei Personalentlassungen. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Kostenarten ist auf dieser Ebene jedoch nicht zweckmäßig. Die zusammengefasste Berücksichtigung durch die zwei Kostengruppen „fixe Kosten“ und „Änderungskosten“ ist hier ausreichend und entspricht dem auf dieser Ebene geforderten Detaillierungsgrad.

Insgesamt ergeben sich für das Verfahren folgende Anforderungen:

- **Sicherstellen der Bedarfserfüllung:** Die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen muss die Erfüllung der zukünftigen Bedarfe ermöglichen.
- **Mehrstufig konsistente Bedarfsweitergabe:** Sekundärbedarfe sind standortübergreifend über alle Produktionsstufen zu bestimmen und bei der Planung zu berücksichtigen.
- **Berücksichtigung alternativer Produktionsprozesse:** Für die Herstellung eines Erzeugnisses können alternative Produktionsprozesse zur Verfügung stehen und müssen daher geeignet abgebildet und bei der Planung berücksichtigt werden.
- **Berücksichtigung der Netzwerkstruktur:** Die gegebene Netzwerkstruktur bestehend aus Standorten und möglichen Beziehungen ist zu berücksichtigen.
- **Berücksichtigung von Einschränkungen der Produktionsprozesszuordnung:** Die erlaubten Zuordnungen von Produktionsprozessen zu Standorten können z. B. durch strategische Vorgaben oder die technische Umsetzbarkeit eingeschränkt sein.

- **Einhaltung länderspezifischen Lokalisierungsanforderungen:** Die Zuordnung der Prozesse muss die Einhaltung länderspezifischer Lokalisierungsquoten ermöglichen.

2.3.2 Anforderungen an die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Die quantitative Erfüllung des Produktionsprogramms zu ermöglichen ist die oberste Anforderung an die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderung je Knoten. Unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Standorte, sind hierzu die Bedarfsmengen auf die Standorte zu verteilen. Dabei sind die Bedarfe auftragsbezogen zu betrachten, um z. B. auch auftragsabhängige Lokalisierungsanforderungen berücksichtigen und einhalten zu können. Die Bestimmung der quantitativen Kapazitätsanforderungen hat dabei stufenweise zu erfolgen, da auch am Realsystem in der Regel keine kontinuierliche Anpassung der Kapazität möglich ist, sondern diese nur stufenweise erfolgen kann. So können z. B. zur Kapazitätserweiterung benötigte Maschinen nur in ganzen Stückzahlen angeschafft und genutzt werden. Da hier das gesamte Produktionsnetzwerk betrachtet wird, sind bei der Zuordnung der Bedarfsmengen zu den Standorten und bei der Bewertung dieser Zuordnung auch die quantitativen Flüsse (Transportmengen) zwischen den Standorten zu bestimmen und zu berücksichtigen.

Die Bewertung und Auswahl der Alternativen erfolgt auf Basis der relevanten Kosten. Hierzu zählen alle beeinflussten variablen, d. h. mengenabhängigen Kostengrößen wie die Produktions- und Transportkosten pro produzierter bzw. transportierter Mengeneinheit eines Erzeugnisses. Des Weiteren sind hier die fixen bzw. sprungfixen Kosten für das Bereitstellen der geforderten Kapazitäten zu berücksichtigen. Diese sind insofern als fix bzw. sprungfix anzusehen, da sich die Produktionskapazitäten wie bereits erwähnt in der Regel nicht beliebig verändern lassen, sondern nur stufenweise bereitgestellt und angepasst werden können.

Bei der Veränderung der bereitgestellten Kapazitäten fallen in der Regel zusätzlich einmalig Anpassungskosten an. Diese können sowohl bei Kapazitätserweiterungen, z. B. für die Anschaffung und Inbetriebnahme neuer Maschinen, als auch bei Kapazitätsreduktion, z. B. für Abfindungen bei Personalentlassungen, anfallen. Die sukzessive Umsetzung der hier bestimmten quantitativen Kapazitätsanforderungen auf Maschinen und Personal erfolgt auf den nächsten zwei Ebenen.

Insgesamt ergeben sich für das Verfahren folgende Anforderungen:

- **Sicherstellen der Bedarfserfüllung:** Die zukünftigen Bedarfsmengen sind geeignet auf die Produktionsstandorte zu verteilen.
- **Stufenweise Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen:** Änderungen der quantitativen Kapazität sind nur in vorgegebenen Stufen möglich.
- **Mehrstufig konsistente Bedarfsweitergabe:** Sekundärbedarfe sind standortübergreifend über alle Produktionsstufen zu bestimmen und bei der Planung zu berücksichtigen.
- **Berücksichtigung alternativer Produktionsprozesse:** Für die Herstellung eines Erzeugnisses können alternative Produktionsprozesse zur Verfügung stehen und müssen daher geeignet abgebildet und bei der Planung berücksichtigt werden.
- **Berücksichtigung der Netzwerkstruktur:** Die Netzwerkstruktur bestehend aus Standorten und möglichen Beziehungen ist zu berücksichtigen.
- **Einhaltung von Transportzeiten:** Bei der stufenweisen Verteilung der Bedarfe auf mehrere Standorte sind notwendige Transportzeiten zwischen den Standorten einzuhalten.
- **Berücksichtigung von Einschränkungen der Bedarfszuordnung:** Die erlaubten Zuordnungen von (auftragsabhängigen) Bedarfen zu Standorten können z. B. durch interne Vorgaben oder Kundenwünsche eingeschränkt sein.
- **Einhaltung auftragsspezifischer Lokalisierungsanforderungen:** Bei der Zuordnung der Bedarfe sind auftragsspezifische Lokalisierungsquoten einzuhalten.

2.3.3 Anforderungen an die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark

Bei der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark findet eine separate Betrachtung der einzelnen Standorte statt. Auswirkungen auf andere Standorte sind nicht Teil dieser Betrachtung, weshalb Situationen, die Einfluss auf andere Standorte haben können zu vermeiden sind. Daher sind insbesondere die dem Standort zugeordneten Bedarfe zu erfüllen, um die auf den übergeordneten Ebenen netzwerkweit abgestimmte Leistungserbringung umzusetzen. Auch innerhalb eines Standortes findet in der Regel ein mehrstufiger Produktionsprozess statt, daher muss hier ein Planungsverfahren eine mehrstufige Produktion berücksichtigen können. Bei der Einplanung der Bedarfsmengen zu den Maschinen sind vom Erzeugnis abhängige Rüst- und Bearbeitungszeiten zu beachten. Da für ein Erzeugnis mehrere alternative Produktionsprozesse existieren können, muss innerhalb der Planung die Auswahl des zu verwendenden Produktionsprozesses erfolgen. Ebenso ist hier für Erzeugnisse, die auch

bei einem externen Lieferanten fremdbeschafft werden können, die Entscheidung bezüglich Eigenfertigung oder Fremdvergabe zu treffen.

Für die Bewertung und den Vergleich möglicher Lösungen durch ein Planungsverfahren sind insbesondere die fixen und variablen Kosten für die Nutzung der Gebrauchsfaktoren Maschinen zu betrachten. Fixe Kosten sind dabei sämtliche Kosten, die unabhängig vom Grad der tatsächlichen Nutzung für einen Gebrauchsfaktor anfallen. Zu den variablen Kosten zählen die Kosten der Produktion unter Nutzung einer Maschine und die Kosten für das Rüsten der Maschine in Abhängigkeit von der für die Produktion bzw. für das Rüsten benötigten Zeit. Falls die Anschaffung weiterer Maschinen als Möglichkeit bei der zukünftigen Entwicklung berücksichtigt werden soll, sind zusätzlich Anschaffungskosten in die Bewertung aufzunehmen.

Im Zusammenhang mit der Make-or-Buy-Entscheidung sind die Kosten der Eigenfertigung mit denen der Fremdbeschaffung zu vergleichen. Daher sind die Einkaufspreise der Erzeugnisse, für die eine Fremdvergabeoption besteht, in die Kostenbetrachtung einzubeziehen.

Falls die Erfüllung einiger Bedarfe weder durch Eigenfertigung noch durch Fremdbeschaffung möglich ist, sind die Fehlmengen mit einem Fehlmengenkostensatz zu bewerten. Dieser Kostensatz ist entweder eine vertraglich festgelegte Strafzahlung, die bei Nichterfüllen der Auftragsmenge anfällt oder er ergibt sich als Opportunitätskostensatz für entgangene Gewinne.

Für das Verfahren ergeben sich folgende Anforderungen:

- **Sicherstellen der Bedarfserfüllung:** Die zukünftigen Bedarfsmengen sind geeignet auf die Maschinen des jeweils betrachteten Standortes zu verteilen.
- **Mehrstufig konsistente Bedarfsweitergabe:** Sekundärbedarfe sind über alle Produktionsstufen zu bestimmen und bei der Planung zu berücksichtigen.
- **Berücksichtigung alternativer Produktionsprozesse:** Für die Herstellung eines Erzeugnisses können alternative Produktionsprozesse zur Verfügung stehen und müssen daher geeignet abgebildet und bei der Planung berücksichtigt werden.
- **Berücksichtigung von Kapazitätsgrenzen:** Maschinen haben gegebene Kapazitäten, die bei der Planung einzuhalten sind.
- **Berücksichtigung von Fremdvergabeoptionen:** Die Make-Or-Buy-Entscheidung ist für Erzeugnisse, die auch fremdbeschafft werden können, zu treffen.

2.3.4 Anforderungen an die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

Wie schon bei der Ebene zuvor ist auch bei der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand jeder Standort separat zu betrachten. Daher gilt auch hier die Erfüllung der zugewiesen Bedarfsmengen als oberste Anforderung an ein Planungsverfahren. Ebenso sind dabei die mehrstufige Produktion, Rüst- und Bearbeitungszeiten sowie alternative Produktionsprozesse zu berücksichtigen. Dagegen werden der Maschinenpark sowie die Make-Or-Buy-Entscheidung als gegeben angenommen. Stattdessen sind hier die Mitarbeiter und ihre Qualifikationen zu betrachten. Dafür sind die Verfügbarkeit von Personal mit bestimmten Qualifikationen, die Möglichkeiten der Personalbestandsveränderungen und das Erlernen neuer Qualifikationen abzubilden. Die durchzuführenden Produktionsprozesse unterscheiden sich bezüglich der für ihre Durchführung benötigten Qualifikation und Einsatzzeit. Basierend darauf ist der optimale Personalbestand zu bestimmen. Dabei sind auch die begrenzten Grundarbeitszeiten der Mitarbeiter sowie die begrenzte Möglichkeit von Überstunden zu beachten.

Neben den Produktionskosten, die auch schon auf der übergeordneten Ebene berücksichtigt werden, stellen die Kosten für Personal die Zielgröße dar, anhand derer die Bewertung der verfügbaren Alternativen und die Auswahl der kostengünstigsten Option erfolgt. Dabei können Kosten für die Beschäftigung von Personal, für die Qualifizierung von Personal und für die Veränderung des Personalbestandes unterschieden werden. Zu den Kosten für die Beschäftigung von Personal zählen in erster Linie Löhne und Lohnnebenkosten. Die Kosten für Personalqualifizierung ergeben sich zum einen direkt aus den Kosten der jeweiligen Qualifizierungsmaßnahme und zum anderen indirekt durch die Nichtverfügbarkeit des zu qualifizierenden Mitarbeiters während der Qualifizierungsmaßnahme. Kosten für die Veränderung des Personalbestandes fallen für die Akquise von Personal an, aber auch bei Entlassungen, z. B. für Abfindungen.

Für das Verfahren sind folgende Anforderungen umzusetzen:

- **Sicherstellen der Bedarfserfüllung:** Die zukünftigen Bedarfsmengen sind geeignet auf die Maschinen des jeweils betrachteten Standortes zu verteilen.
- **Mehrstufig konsistente Bedarfsweitergabe:** Sekundärbedarfe sind über alle Produktionsstufen zu bestimmen und bei der Planung zu berücksichtigen.
- **Berücksichtigung alternativer Produktionsprozesse:** Für die Herstellung eines Erzeugnisses können alternative Produktionsprozesse zur Verfügung stehen

und müssen daher geeignet abgebildet und bei der Planung berücksichtigt werden.

- **Berücksichtigung von Kapazitätsgrenzen:** Maschinen haben gegebene Kapazitäten, die bei der Planung einzuhalten sind.
- **Berücksichtigung der Personalverfügbarkeit:** Die Verfügbarkeit von bereits beschäftigtem Personal sowie mögliche Personalerweiterungen sind durch das Verfahren zu berücksichtigen.
- **Berücksichtigung der Personalqualifikation:** Mitarbeiter besitzen Qualifikationen zur Durchführung bestimmter Produktionsprozesse und sie haben die Möglichkeit weitere Qualifikationen zu erlernen.
- **Berücksichtigung der Grundarbeitszeit und möglicher Überstunden:** Die Einsatzzeit eines Mitarbeiters ist durch seine Grundarbeitszeit und mögliche Überstunden begrenzt.

3 Stand der Technik

3.1 Methoden und Verfahren für die Dimensionierung

Im Folgenden erfolgt eine Vorstellung von Arbeiten, die sich mit Methoden und Verfahren für die Dimensionierung auseinandersetzen. Die in den Arbeiten beschriebenen Ansätze werden hierzu in die in Kapitel 2 definierten Ebenen gegliedert. Arbeiten, die Aspekte verschiedener Ebenen berücksichtigen, werden daher auch mehrfach betrachtet.

3.1.1 Methoden und Verfahren für die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Qualitative Kapazitätsanforderungen finden in verschiedenen Arbeiten in der Regel als Teil eines weiter gefassten Planungsverfahrens Berücksichtigung. So beschäftigt sich Bundschuh z. B. mit der modellgestützten strategischen Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie und entwickelt hierfür ein Basismodell, das modular die Planung der Standorte, der Belegung, der Logistik bzw. des Materialflusses, der Werksstruktur, der Technologien bzw. Anlagen sowie des Personals ermöglichen soll (vgl. [Bun08]). Dieses Modell ist jedoch nicht für die simultane Planung aller aufgelisteten Entscheidungsfelder vorgesehen, sondern es dient als Gesamtmodell dessen Bestandteile modular verwendet werden können, um daraus je nach Planungsaufgabe und Detaillierungsgrad spezifische Modellvarianten zu generieren. Qualitative Kapazitätsaspekte auf Ebene des Produktionsnetzwerks finden in dem Gesamtmodell durch die Zuordnung von Anlagen zu Standorten Berücksichtigung und werden dabei der Standortplanung zugeordnet. Auf jeder Anlage kann eine bestimmte Menge verschiedener Produkte gefertigt werden. Somit erfolgt in dem Modell die Festlegung der Leistungsfähigkeit der Standorte anhand der ihnen zugeordneten Anlagen. In die Zielfunktion des Modells fließen die hierbei relevanten Kostengrößen ein. Hierzu zählen die fixen Kosten für den Betrieb einer Anlage sowie die Kosten für die Inbetriebnahme einer neuen Anlage.

Eine andere Möglichkeit qualitative Kapazitätsaspekte zu berücksichtigen wird von Friese vorgestellt. Er entwickelt in seiner Arbeit einen Ansatz zur „*Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie*“ [Fri08]. Dabei betrachtet er die Planung von Produktionsnetzwerken insbesondere unter dem Aspekt der Nutzung von Flexibilitätspotentialen zur optimalen Planung der Kapazitätsstrategien für das betrachtete Produktionsnetzwerk. Hierfür definiert er ein zweistufiges stochastisches Optimierungsmodell. Die Entscheidungen der ersten Stufe um-

fassen die qualitative Zuordnung der Produkte zu Fertigungslinien sowie die Festlegung der initialen quantitativen Kapazitäten der Linien. Diese Entscheidungen stellen das primäre Ergebnis des Verfahrens dar. Da diese Entscheidungen jedoch nicht einzeln für sich, sondern vor dem Hintergrund zukünftiger Bedarfsverläufe und möglicher Anpassungen des Produktionsnetzwerks erfolgen sollen, stellen die Entscheidungen der zweiten Stufe in dem Modell die Antizipation der quantitativen Kapazitätsanpassungen über den Zeitverlauf für mehrere mögliche Bedarfsszenarien dar. Diese Bedarfsszenarien werden für die zweite Stufe ausgehend von einer Marktprognose mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation generiert und im Modell mit berücksichtigt, um so die Unsicherheit der Bedarfsdaten abzubilden. Der Einsatz dieses Modells zur Planung eines realen Produktionsnetzwerks erfordert aufgrund der hohen Komplexität⁴ einen hohen Aggregationsgrad der Eingabedaten, um die Lösbarkeit des Modells sicherzustellen. Dies führt jedoch zu einem Transparenz- und Informationsverlust und kann zu einer Fehlinterpretation der Ergebnisse sowie zu Fehlentscheidungen führen.

Ein Verfahren zur strategischen Standort- und Produktionsplanung eines Produktionsnetzwerks mit mehreren Standorten wird von Kriesel vorgestellt (vgl. [Kri05]). Er unterscheidet dabei die Bereiche Strategische Planung, Standortplanung und Produktionsgestaltung. Im Bereich der Produktionsgestaltung erfolgt die Zuordnung von Produkten zu Ressourcen, die Dimensionierung der Ressourcen und Zuordnung der Ressourcen zu Produktionsflächen. Da sich jede Produktionsfläche an einem bestimmten Standort befindet, erfolgt damit die Festlegung der Leistungsfähigkeit der Standorte. Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Bedarfsentwicklung fließen durch die integrierte Betrachtung alternativer Szenarien, die mit Wahrscheinlichkeiten gewichtet werden, in das Verfahren ein. Das innerhalb des Verfahrens genutzte Modell ist jedoch derart komplex, dass es für den praxisnahen Einsatz in der Regel nicht geeignet ist.

3.1.2 Methoden und Verfahren für die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen ist in der Regel das Hauptaugenmerk gängiger Verfahren zur Produktionsnetzwerkoptimierung. Ein solches Verfahren findet sich bei Henrich, der ein Netzwerkoptimierungsmodell für den strategischen Kapazitätsplanungsprozess eines Automobilherstellers vorstellt (vgl. [Hen02], [FFH06]). Die Planung der benötigten quantitativen Kapazitäten erfolgt durch die Zuordnung der Fahrzeugmodelle und Produktionsmengen zu Produktionsstandorten des

⁴ Die Komplexität eines realen Produktionsnetzwerks wird hier durch den stochastischen Planungsansatz noch vervielfacht.

Fahrzeugherstellers. Da nicht jedes Fahrzeugmodell jedem Standort zugeordnet werden darf, werden für jedes Fahrzeugmodell die erlaubten Produktionsstandorte als strategische Vorgaben in die Planung einbezogen und schränken so den gültigen Lösungsraum stark ein. Die Zuordnung der Produktionsmenge erfolgt dabei unter Berücksichtigung von Kapazitätsgrenzen für die an jedem Standort verfügbaren Technologien Rohbau, Lackiererei und Montage. Im Rohbau gelten dabei produktspezifische Kapazitätsgrenzen, während in der Lackiererei die Kapazitätsgrenzen produktübergreifend über alle an einem Standort produzierten Fahrzeugmodelle und in der Montage produktübergreifend über alle auf einer Montagelinie produzierten Fahrzeugmodelle definiert sind. Neben der Bestimmung der Produktionsmengen dient das Modell zusätzlich der Bestimmung der Flüsse im Netzwerk anhand der Beschaffungs- und Vertriebsmengen unter Berücksichtigung verschiedener Beschaffungs- und Vertriebsmärkte. Während das Modell bei der Beschaffung die Erfüllung von Local Content Anforderungen sicherstellt, berücksichtigt es beim Vertrieb die dabei anfallenden Zölle. Auf der Beschaffungsseite werden sowohl externe Lieferanten für fremdbeschaffte Vorprodukte und Rohstoffe als auch interne Lieferanten (z. B. Motorenwerke) für eigengefertigte Vorprodukte in die Planung einbezogen. Das Modell soll die vollständige Befriedigung der Nachfrage unter Minimierung der dabei anfallenden Beschaffungs-, Produktions- und Distributionskosten sicherstellen. Es enthält nur eine einstufige Betrachtung der Produktion, da alle betrachteten Standorte gleiche oder ähnliche Produktionsprozesse ausführen können und damit auf der gleichen Produktionsstufe angeordnet sind. Damit es zwar die Planung der horizontalen Standortbeziehungen innerhalb des Produktionsnetzwerks, vertikale Standortbeziehungen werden aber nur indirekt durch die Festlegung der Beschaffungsmengen mitgeplant. Diese Betrachtung mag für die Planung eines Automobilherstellers ausreichend sein, da ein Großteil der eigenen Wertschöpfung in der Endfertigung erfolgt und viele Komponenten nicht in Eigenfertigung sondern durch externe Lieferanten hergestellt werden. Sie ist jedoch im Rahmen der hier betrachteten Dimensionierung nicht ausreichend, da auch die Abstimmung der vertikalen Standortbeziehungen Berücksichtigung finden soll.

Das von Henrich entwickelte Modell wird von Ferber aufgegriffen und um Investitionsentscheidungen erweitert. Die eingeführten Erweiterungen ermöglichen die Planung stufenweiser Kapazitätserweiterungen für die einzelnen Technologien der Produktionsstandorte unter Berücksichtigung eines beschränkten Investmentbudgets (vgl. [Fer05], [FFH06]). Hierdurch ist eine detailliertere und realistischere Kapazitätsplanung möglich, da reale Kapazitätserweiterungen in der Regel auch nur stufenweise, z. B. durch die Inbetriebnahme einer neuen Anlage, möglich sind. Um Investitionen möglichst realitätsnah planen zu können, erlaubt das Modell zum einen die Verteilung der Investitionsausgaben auf mehrere Perioden vor und nach der Inbetriebnahme der Erweiterungen.

Zum anderen werden sämtliche Kosten in der Zielfunktion im Sinne der Kapitalwertrechnung auf ihren Barwert diskontiert. Die zukünftige Entwicklung ist insbesondere aufgrund des langen Planungshorizonts mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Um die Lieferfähigkeit trotz langfristiger Bedarfsschwankungen dennoch sicherzustellen, erfolgt die Berücksichtigung von Flexibilitätsreserven durch Abzug dieser von der technisch möglichen Maximalkapazität. Außerdem wird eine Normalkapazität definiert. Das ist die Kapazität die im regulären Schichtmodell, in der Regel einem Zwei-Schicht-Modell, zur Verfügung steht. Für die Kapazitätsnutzung oberhalb der Normalkapazität fallen höhere Kosten an. Zudem muss eine Minimalauslastung gewährleistet sein. Neben den Flexibilitätsreserven erfolgt eine weitere Berücksichtigung von Unsicherheiten ausschließlich außerhalb des Modells durch die Verwendung der Szenariotechnik. Wie schon bei Henrich ist in dem Modell von Ferber nur eine horizontale Abstimmung der Standorte vorgesehen.

Kauder wiederum greift die Arbeit von Ferber auf und erweitert sie um Flexibilitätsaspekte nach Jordan und Graves (vgl. [Jor95]) mit dem Ziel der Bestimmung effizienter und flexibler Netzwerkkonfigurationen (vgl. [Kau08]). Dabei werden wie bei Ferber für ein gegebenes Produktionsnetzwerk, einen Planungshorizont von mehreren Jahren und unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der Automobilindustrie die Zuordnung der Produkte zu den Produktionsstandorten, die notwendigen Kapazitäten sowie die zu tätigen Investitionen geplant. Zusätzlich soll bei der Zuordnung von Produkten zu Standorten eine möglichst hohe Flexibilität des Netzwerks sichergestellt werden. Dazu wird die Zuordnungsstruktur einer Kette, die nach Jordan und Graves eine hohe Flexibilität des Netzwerks realisiert, angestrebt. Da das so erweiterte Modell zu komplex für einen Standardsolver ist, werden von Kauder zusätzlich zwei Verfahren der Lokalen Suche entwickelt, die geeignet sind das Modell in akzeptabler Zeit und mit der geforderten Güte zu lösen.

Ein anderer Ansatz wird von Bihlmaier et al. vorgestellt. Sie präsentieren sowohl ein deterministisches Modell als auch darauf aufbauend ein zweistufiges stochastisches Modell zur strategischen und taktischen Produktionsnetzwerkplanung (vgl. [BKO08]). Zu den strategischen Entscheidungen zählen sie die Zuordnung von Produkten zu Standorten und das Festlegen der technischen Kapazität, während sie die Bestimmung der Produktions- und Transportmengen sowie der organisatorischen Kapazität zu den taktischen Entscheidungen zählen. Die Festlegung der quantitativen Kapazität erfolgt durch die Auswahl einer Kapazitätsstufe für jeden Standort. Eine solche Kapazitätsstufe definiert dabei die am Standort verfügbare Kapazität produktunabhängig für alle an diesem Standort gefertigten Produkte. Jedes Produkt hingegen hat einen spezifischen Kapazitätsverbrauch. Die vorgestellten Modelle erlauben zudem die Abbildung einer

standortübergreifenden mehrstufigen Produktion und berücksichtigen die hierdurch auftretenden Flüsse im Netzwerk. Die Planung erfolgt dabei mit dem Ziel der Kostenminimierung, daher werden sämtliche Entscheidungsgrößen mit Kosten bewertet und in der Zielfunktion auf ihren Barwert diskontiert. Das zweistufige stochastische Modell erweitert das deterministische Modell um stochastische Einflüsse durch die Berücksichtigung szenarioabhängiger Bedarfe. Die strategischen Entscheidungen stellen dabei die erste Stufe und die taktischen Entscheidungen die zweite Stufe dar. Diese Unterteilung ermöglicht den Einsatz der Dekomposition nach Benders zur schnelleren Lösung des Modells, weil die taktischen Entscheidungen nur durch kontinuierliche Variablen dargestellt werden. Da die organisatorischen Kapazitätsanpassungen nur eine linearisierte Approximation der Personalplanung darstellen, wird ebenfalls eine Erweiterung des deterministischen Modells zur detaillierten Personalplanung vorgestellt. Diese Erweiterung wird in Abschnitt 3.1.4 näher beschrieben. Die Validierung der Modelle erfolgt anhand eines künstlichen Beispiels und eines realen Beispiels aus der Automobilindustrie. Bei dem realen Beispiel werden drei Fahrzeugmodelle mit je drei Varianten über zwei Produktlebenszyklen und drei Standorte betrachtet.

Das in Abschnitt 3.1.1 bereits aufgeführte Optimierungsmodell von Bundschuh (vgl. [Bun08]) enthält auch die Modellierung quantitativer Kapazitätsaspekte durch die kapazitive Ausgestaltung der Anlagen sowie die Planung der Materialflüsse im Netzwerk. Auf Netzwerkebene wird dabei eine aggregierte Betrachtung der Anlagen vorgeschlagen. Dabei werden ausschließlich ganze Anlagen oder Anlagenmodule betrachtet, jedoch nicht ihre detaillierte Ausgestaltung. Die Kapazitätsplanung erfolgt bei dieser Betrachtung durch die Auswahl der Anlagen, Entscheidungen bezüglich der Inbetriebnahme und Stilllegung von Anlagen sowie die Festlegung der Schichtmodelle. Auf Netzwerkebene kann auch auf die Schichtmodellplanung verzichtet werden und stattdessen mit Maximalkapazitäten geplant werden. Das vorgestellte Basismodell enthält jedoch eine detaillierte Modellierung der Anlagenkapazitätsplanung, auf die in Abschnitt 3.1.3 näher eingegangen wird.

Obwohl die Anpassung der quantitativen Kapazitäten über den Zeitverlauf nicht das primäre Ziel des Verfahrens von Friese (vgl. [Fri08]) ist, sondern eine notwendige Antizipation im Rahmen der Bestimmung der Flexibilität und der initialen Kapazität darstellt, könnte sie prinzipiell auch für die Planung der quantitativen Kapazitäten verwendet werden. Dies wird an den Analysen zum Planungsbeispiel bei Friese deutlich. Hier präsentiert er die Ergebnisse der Kapazitätsanpassung für das Basisszenario. Die Kapazitätsanpassungen sind dabei sowohl technisch durch stufenweisen Ausbau der Linien als auch organisatorisch durch die Änderung des Schichtmodells oder die Verschiebung von Arbeitskräften zwischen Linien möglich. Somit kann das Modell bzw. Teile davon

auch für die Kapazitätsanpassungsplanung für ein bestimmtes Bedarfsszenario genutzt werden.

3.1.3 Methoden und Verfahren für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark

Die detaillierte Version der Anlagenplanung im Modell von Bundschuh erlaubt neben den Entscheidungen bezüglich Inbetriebnahme, Betrieb und Stilllegung von Anlagen auch deren kapazitive Ausgestaltung [Bun08]. Dabei kann die Erweiterung und Verkleinerung von Anlagen abhängig vom Kapazitätsbedarf durch die Zuordnung von Arbeitssystemtypen zu Anlagen und Arbeitssystemen zu Arbeitssystemtypen geplant werden. Die jeweils installierte Kapazität eines Arbeitssystemtyps ergibt sich als Produkt der Anzahl Arbeitssysteme und einer Leistungskennzahl. Zusätzlich kann die Kapazität durch das Festlegen des Schichtmodells an den Bedarf angepasst werden.

Einen weiteren Ansatz zur Planung der Maschinenkapazitäten liefert Tonigold, der sich mit der „*Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten*“ [Ton07] beschäftigt. Er stellt hierfür zum einen ein Modell für die Programm- und Ressourcenplanung und zum anderen ein Modell für die Ressourcen- und Prozessplanung auf. Die Programm- und Ressourcenplanung erfolgt dabei mit dem Ziel der Minimierung der Lebenszykluskosten eines mehrstufigen Fertigungssystems. Dazu wird die kostenoptimale Kapazitätsanpassung der Anlagen bzw. Fertigungslinien an die Marktgegebenheiten bestimmt. Kapazitätsveränderungen sind dabei stufenweise sowohl durch technische als auch durch organisatorische Systemanpassungen möglich. Neben dem Aufbau eigener Kapazitäten wird zusätzlich auch die Möglichkeit von Fremdbezug berücksichtigt. Das Modell der Ressourcen- und Prozessplanung ist ein statisches Modell für die Optimierung der Struktur des Fertigungssystems und ist daher im Rahmen dieser Arbeit nicht relevant.

Die Planung des optimalen Maschinenbestandes ist ebenfalls Bestandteil des von Timm entwickelten Verfahrens zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen (vgl. [Tim09]). In seiner Arbeit leitet er zunächst die durchzuführenden Teilaufgaben ab. Anhand ihrer zeitlichen Reichweite und der Abhängigkeiten untereinander, gliedert er die Teilaufgaben in vier Partialmodelle, die durch Koordinationsprozesse zu einem hierarchischen Planungsprozess verbunden werden und so zur Lösung der Gesamtaufgabe verwendet werden können. Sein erstes Modell dient dabei der Auswahl zwischen alternativen Fertigungsprozessen, der Optimierung

des Maschinenbestandes und dem Treffen der Make-Or-Buy-Entscheidung. Produktionsprozesse werden in diesem Modell durch Technologien als Input-Output-Prozess abgebildet. Hierbei wird nicht nur der Zusammenhang zwischen den in den Produktionsprozess eingehenden und den durch den Produktionsprozess hergestellten Erzeugnissen hergestellt, sondern es werden auch die zur Durchführung des Produktionsprozesses verwendeten Ressourcen zugeordnet. Damit ist zum einen die Nutzung mehrerer Ressourcen in einem Produktionsprozess abbildbar. Zum anderen ist es möglich die Abhängigkeiten zwischen der Optimierung des Maschinenbestandes und der Auswahl zwischen alternativen Fertigungsprozessen herzustellen. Gleichzeitig erfolgt zudem die Abwägung zwischen Eigenfertigung und Fremdbeschaffung. Teile, die bei gleicher Qualität günstiger fremdbeschafft werden können, werden als Kaufteile identifiziert und bei der Planung des Maschinenbestandes nicht berücksichtigt. Das Modell berücksichtigt alternative Szenarien, um so implizit Unsicherheiten der zukünftigen Bedarfe abzubilden. Das entwickelte Modell ist insbesondere für die Planung einer mehrstufigen Produktion geeignet, da es die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Produktionsstufen berücksichtigt und geeignet abbildet. Das zweite Partialmodell dient der Mitarbeiterplanung und wird in Abschnitt 3.1.4 näher erläutert.

3.1.4 Methoden und Verfahren für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

Im Basismodell von Bundschuh sind ebenfalls Bestandteile zur Personalplanung enthalten (vgl. [Bun08]). Dabei wird zwischen Primärpersonal, das an der Produktion unmittelbar beteiligt ist, Sekundärpersonal, das nur mittelbar an der Produktion beteiligt ist, und Overheadpersonal für dispositive Aufgaben unterschieden. Die Planung des Primärpersonals erfolgt dabei in Abhängigkeit zur Anlagenplanung, wobei der Personalbedarf anhand von arbeitssystemtypspezifischen Personalbesetzungs faktoren bestimmt wird, wohingegen die Planung des Sekundär- und Overheadpersonals anhand von kennzahlenbasierten Verfahren erfolgt. Hierbei werden sowohl die Kosten für die Beschäftigung als auch für die Einstellung und Entlassung von Personal berücksichtigt. Beim Primär- und Sekundärpersonal besteht zudem die Möglichkeit einer gesonderten Berücksichtigung von Zeitarbeitskräften.

Eine Erweiterung des in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten deterministischen Modells zur strategischen und taktische Produktionsplanung von Bihlmaier et al. erlaubt zusätzlich die Planung des Personalbestandes (vgl. [BKO08]). Dabei werden Möglichkeiten zur Personalerweiterung und Personalreduktion durch Einstellen bzw. Entlassen von Mitarbeitern berücksichtigt. Zu dem erfolgt die optimale Auswahl geeigneter Schichtmodelle.

Die dabei anfallenden Kosten, z. B. Löhne oder Kosten für das Einstellen und Entlassen von Mitarbeitern, werden zusätzlich in der Zielfunktion berücksichtigt. Die Integration der Personalplanung in die Netzwerkplanung führt hierbei jedoch zu einer erheblichen Steigerung der nummerischen Komplexität des Modells.

Das zweite Partialmodell von Timm dient der Bestimmung des optimalen Mitarbeiterbestandes und der Planung der Mitarbeiterentwicklung (vgl. [Tim09]). Dieses Modell baut auf den Ergebnissen des ersten Partialmodells (siehe 3.1.3) auf und berücksichtigt den optimalen Maschinenbestand und die zur Eigenfertigung vorgesehenen Teile als Eingaben. Um den Zusammenhang zwischen den durchzuführenden Produktionsprozessen und den dafür benötigten Mitarbeitern herzustellen wird die Modellierung der Technologien um die Zeit, die Mitarbeiter mit einer bestimmten Menge an Qualifikationen benötigt werden, um den damit abgebildeten Produktionsprozess durchzuführen, erweitert. Anhand dieser Zeiten und aller für die Eigenfertigung durchzuführenden Produktionsprozesse ergibt sich der Bedarf an Mitarbeitern mit entsprechenden Qualifikationen. Ausgehend hiervon wird unter Berücksichtigung der Mitarbeiterverfügbarkeit, der Mitarbeiterqualifikationen und der Möglichkeit diese durch Qualifizierungsmaßnahmen zu erweitern sowie den Möglichkeiten zur Personalerweiterung bzw. Personalreduktion die optimale Entwicklung des Mitarbeiterbestandes geplant. Wie schon das erste Modell berücksichtigt das Modell der Mitarbeiterplanung verschiedene Bedarfsszenarien, um so implizit die Unsicherheit der zukünftigen Bedarfe in die Planung einzubeziehen.

3.2 Hierarchische Planung von Produktionsnetzwerken

3.2.1 Elemente der hierarchischen Planung

Bei der hierarchischen Planung erfolgt eine Unterteilung einer umfangreichen Planungsaufgabe in eindeutig abgegrenzte Teilaufgaben anhand der Struktur der Aufgabe und der vorhandenen organisatorischen Zuständigkeiten. Jede der Teilaufgaben lässt sich anschließend durch geeignete Planungsmethoden lösen. Bei der Bildung der Teilaufgaben bedienen sich Verfahren der hierarchischen Planung einiger typischer Elemente, die eine Vereinfachung der Aufgabe ermöglichen. Nach Steven können die Hierarchisierung, die Dekomposition, die Aggregation sowie die Koordination als Elemente der hierarchischen Planung identifiziert werden (vgl. [Ste07]). Sie sind jedoch nicht nur einzeln für sich zu betrachten, da sie aufgrund einer starken Verzahnung erst durch ihr Zusammenwirken eine hierarchische Planung ermöglichen. Aufgrund ihrer Bedeutung insbesondere auch im Rahmen dieser Arbeit werden sie in den nächsten Abschnitten näher betrachtet.

3.2.1.1 Hierarchisierung

Unter Hierarchisierung ist die Unterteilung einer umfangreichen Planungsaufgabe in vertikal angeordnete Planungsebenen zu verstehen. Zwischen den einzelnen Ebenen besteht eine eindeutige Beziehung der Unter- und Überordnung, so dass die jeweils übergeordnete Ebene berechtigt ist, Vorgaben an die untergeordnete Ebene zu machen und so das Entscheidungsfeld dieser einzuschränken. Der Erfolg der übergeordneten Ebene hängt dabei von den Ergebnissen der untergeordneten Ebenen ab. Die Bildung der Hierarchieebenen dient der Reduktion der Problemkomplexität und der Erleichterung der Lösungsfindung. Die Zuordnung der Teilaufgaben zu den Ebenen kann anhand des Abstraktions- und Aggregationsgrades, der zeitlichen Reichweite sowie dem Umfang der Entscheidungen erfolgen (vgl. [Ste94], [Ste07]). So besitzen Teilaufgaben auf der übergeordneten Ebene in der Regel einen höheren Abstraktions- und Aggregationsgrad und erlauben damit die Betrachtung eines längeren Zeitraumes wobei jedoch nur grobe Entscheidungen getroffen werden können. Diese Entscheidungen werden dann auf der untergeordneten Ebene verfeinert. Dies erfordert jedoch einen höheren Detaillierungsgrad, der wiederum nur für einen kürzeren Zeitraum verfügbar ist bzw. aufgrund der damit verbundenen Komplexität für eine Planung in Frage kommt.

3.2.1.2 Dekomposition

Dekomposition bezeichnet die Zerlegung einer komplexen Planungsaufgabe, deren Gesamtlösung mangels geeigneter Lösungsverfahren nicht möglich oder zu aufwendig ist, in weniger komplexe interdependente Teilaufgaben. Die Bildung der Teilaufgaben sollte dabei so erfolgen, dass möglichst geringe Abhängigkeiten zwischen den Teilaufgaben bestehen, um den Abstimmungsaufwand zwischen ihnen zu minimieren. Nach Steven kann die Dekomposition nach Umfang der Entscheidungen, nach ablauforganisatorischen Prinzipien (z. B. Planung einzelner Werke) oder eine marktorientierte Aufteilung (z. B. nach Produktgruppen) erfolgen (vgl. [Ste07]).

Die Dekomposition der Gesamtaufgabe in Teilaufgaben und die Hierarchisierung dieser, sollte sich immer auch an der bestehenden Organisation und Entscheidungsstruktur des betrachteten Unternehmens orientieren, um so eine bessere Akzeptanz der Planungsergebnisse sicherzustellen. Die Zuordnung der Hierarchieebenen zu Entscheidungsebenen ermöglicht zudem das Ausnutzen des Erfahrungsschatzes der Entscheidungsträger (vgl. [Sta96]).

3.2.1.3 Aggregation

Aggregation ist das Zusammenfassen von Eingabedaten und Entscheidungsgrößen zu Gruppen und dient (vgl. [Sta96], [Ste07]):

- der Reduktion des Datenbedarfs
- der Reduktion des Modellumfangs
- der Beeinflussung des Typs der Entscheidungen
- der Reduktion der Unsicherheit der Daten

Im Zusammenhang mit der Lösungsfindung ist insbesondere die Reduktion des Modellumfangs von Bedeutung, da hier der Lösungsaufwand reduziert bzw. eine Lösungsfindung überhaupt erst ermöglicht wird. Im Rahmen der hierarchischen Planung ist die Aggregation sowohl nach zeitlichen als auch nach sachlichen Kriterien möglich. Die zeitliche Aggregation erfolgt auf den oberen Ebenen durch das Zusammenfassen mehrerer Perioden und die Wahl eines größeren Zeitrasters. Die Zusammenfassung nach sachlichen Kriterien kann durch das Zusammenfassen von Produkten zu Produktgruppen oder von Maschinenkapazitäten zu Werkskapazitäten geschehen.

3.2.1.4 Koordination

Die durch die Dekomposition und Hierarchisierung erreichte Unterteilung der Gesamtaufgabe in Teilaufgaben, erleichtert zwar die Lösung der Teilaufgaben, erfordert jedoch die Koordination der Teilaufgaben, um zu einer geeigneten Lösung der Gesamtaufgabe zu gelangen. Bei der hierarchischen Planung erfolgt die Koordination zunächst grundsätzlich von oben nach unten als Top-Down-Kopplung. Die Koordination von unten nach oben ist zum einen durch die Antizipation der untergeordneten Ebene und ihrer Reaktionen durch die übergeordnete Ebene möglich. Zum anderen kann eine Rückkopplung von der unteren Ebene zur oberen Ebene umgesetzt werden. Hier gibt es auch die Möglichkeit der mehrfachen Rückkopplung, bis eine ausreichende Konsistenz der Planungsergebnisse erreicht ist (vgl. [Ste07]).

3.2.2 Konzeptioneller Rahmen nach Schneeweiß

Schneeweiß liefert einen allgemeinen konzeptionellen Rahmen für hierarchische Planungssysteme, der auch die in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Elemente berücksichtigt, wobei er den Fokus auf die Koordination der Hierarchieebenen legt (vgl. [Sch03]). Die grundsätzliche Struktur der hierarchischen Planung und die Interdependenzen der Hie-

rarchieebenen zeigt Abbildung 3.1 beispielhaft für ein System mit zwei Ebenen. Schneeweiss unterscheidet dabei drei Formen von Interdependenzen (vgl. [Sch03]):

- Antizipation: Die übergeordnete Top-Ebene berücksichtigt bei der Entscheidungsfindung die Auswirkungen der eigenen Entscheidungen (IN) auf die untergeordnete Basis-Ebene sowie das Verhalten und mögliche Reaktionen dieser auf die getroffenen Entscheidungen. Dieser Zusammenhang kann z. B. durch eine Anticipationsfunktion (AF) dargestellt werden.
- Instruktion: Basierend auf der Antizipation, die einen aggregierten bzw. unvollständigen Informationsstand bezüglich der Basis-Ebene darstellt, führt die Top-Ebene ihre Planung durch. Die dabei getroffenen Entscheidungen werden als Vorgaben (Instruktionen IN^*) an die Basis-Ebene übergeben und beschränken damit ihren Handlungsrahmen.
- Reaktion: Innerhalb des vorgegebenen Handlungsrahmens führt die Basis-Ebene ihre Planung durch und entscheidet über eine Rückmeldung an die Top-Ebene.

Dieser Koordinationsprozess wird bei Bedarf mehrfach durchlaufen, bis eine finale Entscheidung (IN^{**}) getroffen wird. In der Regel ist bei einer praktischen Anwendung nur ein einzelner Durchlauf vorgesehen. Bei einer reinen Top-Down-Planung wird auf Reaktionen von der Basis-Ebene zur Top-Ebene vollständig verzichtet. Der hier aufgeführte Prozess für zwei Ebenen lässt sich problemlos auf eine Planung mit mehreren Ebenen ausweiten.

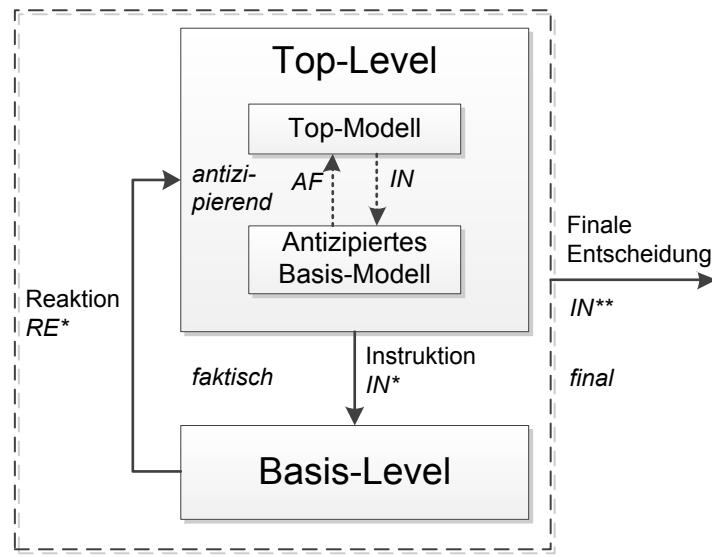


Abbildung 3.1 Struktur der hierarchischen Planung (vgl. [Sch03])

3.2.3 Methoden und Verfahren der hierarchischen Planung

3.2.3.1 Hierarchische Produktionsplanung

Die Arbeit von Anthony aus dem Jahr 1965 markiert den Beginn der hierarchischen Planung im Unternehmensumfeld (vgl. [Ant65]). Für sein Modell definiert er die bis heute übliche Unterteilung der Planungsaufgaben eines Unternehmens in:

- strategische Planung (Strategic Planning): Die Prozesse dieser Ebene dienen der Festlegung der Unternehmensziele, der hierfür zu nutzenden Ressourcen sowie der Unternehmensrichtlinien. Beispielweise werden hier „*die zukünftige Wettbewerbsposition, die Produktfelder, auf denen das Unternehmen als Anbieter tätig sein will [...], und die dazu einzusetzenden Mittel über einen Planungszeitraum von mehreren Jahren festgelegt*“ [Sta96].
- taktische Planung (Management Control): Die Planungsaufgaben dieser Ebene haben die effektive und effiziente Beschaffung und Nutzung der Ressourcen zum Ziel. Hier werden z. B. „*die Investitionsmaßnahmen [...] und der Ressourceneinsatz auf der Grundlage mittelfristiger Bedarfsprognosen konkretisiert und der mittelfristige Arbeitskräftebestand bestimmt*“ [Sta96].
- operative Planung (Operational Control): Diese Ebene dient der Sicherstellung der effektiven und effizienten Durchführung spezifischer Aufgaben. „*Hierzu zählen Entscheidungen über die Produktionsmengen der Endprodukte in den einzelnen Perioden (z. B. Wochen) [...] ebenso wie die Festlegung von Losgrößen bis hin zur Maschinenbelegung*“ [Sta96].

Den Ausgangspunkt für den systematischen Einsatz der hierarchischen Planung im Bereich der Produktion stellt das im Jahr 1975 vorgestellte Modell von Hax und Meal dar (vgl. [HM75]). Das Modell nutzt die für die hierarchische Planung typischen Elemente Aggregation, Dekomposition und die Bildung von Planungsebenen mit Beziehungen der Über- und Unterordnung, um das komplexe Problem in kleinere leicht lösbarer Teilprobleme zu unterteilen. Die Bildung der drei Hierarchieebenen des Modells erfolgt anhand der Eigenschaften der Produkte. Diese werden zunächst zu Produktfamilien und die Produktfamilien dann zu Produktgruppen zusammengefasst. Auf der obersten Hierarchieebene erfolgt die Planung auf Produktgruppen aggregiert über den gesamten Planungshorizont. Dagegen betrachten die unteren zwei Ebenen nur noch die erste Planungsperiode und berücksichtigen die auf der oberen Ebene für diese Periode bestimmten Produktionsmengen als Instruktion ein. Auf der zweiten Ebene erfolgt die Disaggregation der Produktgruppen zu Produktfamilien, wobei jede Produktgruppe für sich geplant wird. Auf der untersten Ebene wird die Planung unter Berücksichtigung einzelner

Produkte durchgeführt, wobei wiederum jede Produktfamilie separat geplant wird. Da ein großer Teil späterer Arbeiten auf dem Gebiet der hierarchischen Produktionsplanung auf diesem Modell aufbaut, wird es oft auch als Grundmodell bezeichnet (vgl. [Ste94], [Sta96]). Aufgrund der großen Anzahl weiterer Arbeiten im Bereich der hierarchischen Produktionsplanung⁵, die sich zudem in ihrer grundsätzlichen Struktur und Funktionsweise ähneln, da sie sich an dem hier beschriebenen Grundmodell orientieren, wird hier auf die Darstellung weiterer Arbeiten verzichtet.

3.2.3.2 Advanced Planning Systems

Die Erweiterung der hierarchischen Produktionsplanung auf die standortübergreifende hierarchische Planung von Produktionsnetzwerken stellt den nächsten Schritt in der Entwicklung hierarchischer Planungssysteme dar. In diesem Sinne haben mehrere verschiedene Softwareanbieter unabhängig voneinander sogenannte Advanced Planning Systems (APS) auf den Markt gebracht. Diese erweitern die Funktionalitäten herkömmlicher Produktionsplanungs- und ERP-Systeme um eine netzwerkweite hierarchische Betrachtung der Bereiche Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz. Da diese Systeme unabhängig voneinander und ohne eine wissenschaftlich fundierte Basis entwickelt worden sind, existiert keine allgemein anerkannte Definition für APS. Dennoch lassen sich einige gemeinsame Kennzeichen erkennen. So weisen die verschiedenen Systeme einen modularen Aufbau auf, wobei häufig eine hierarchische Strukturierung der Module vorhanden ist. Eine anbieterunabhängige, modulare, hierarchische Strukturierung der relevanten Planungsaufgaben findet sich z. B. in [MWR08] und ist in Abbildung 3.2 dargestellt, wobei jedoch anzumerken ist, dass keines der verschiedenen auf dem Markt verfügbaren Systeme das gesamte Aufgabenspektrum abdeckt. In Anlehnung an [MWR08] und [ReRo08] sind die Aufgaben der Module wie folgt⁶:

- Strategische Netzwerkplanung: Die strategische Netzwerkplanung deckt die Planung der vier Planungsbereiche auf strategischer Ebene ab und hat die Bestimmung der Struktur des Netzwerks zur Aufgabe. Hierzu gehört insbesondere die Festlegung der Standorte und der möglichen Materialflussbeziehungen. Zudem erfolgt hier die Bestimmung der Produkt-zu-Standort-Zuordnung sowie der Standortkapazitäten.

⁵ Ein umfassender Überblick über Systeme der hierarchischen Produktionsplanung findet sich z. B. in [Sta88].

⁶ Ähnliche Einteilungen finden sich z. B. in [GüTe05] und [Tem06]

- Masterplanung: Zu den Aufgaben der Masterplanung gehören die mittelfristige Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsplanung. Im Rahmen der Produktionsplanung erfolgt auch die mittelfristige Kapazitäts- und Personalplanung.
- Bedarfsplanung: Die Bedarfsplanung deckt die Aufgaben der mittelfristigen Vertriebsplanung sowie einige Aufgaben der strategischen Vertriebsplanung, wie z. B. langfristige Bedarfsprognosen, ab. Zudem dient sie der Bestimmung detaillierterer Bedarfsprognosen für die kurzfristige Produktionsplanung.
- Bedarfserfüllung und Available-to-Promise (ATP): Das Modul Bedarfserfüllung und ATP die der kurzfristigen Vertriebsplanung und ermöglicht u. a. netzwerkweite Verfügbarkeitsprüfungen und Lieferterminzusagen unter Berücksichtigung der Einkaufs-, Produktions- und Transportplanung.
- Einkaufs- und Materialbedarfsplanung: Mittelfristig dient die Einkaufs- und Materialbedarfsplanung der Lieferantenauswahl und dem Abschluss von Rahmenverträgen. Kurzfristig hat sie die bedarfstermingerechte Materialbeschaffung sicherzustellen.
- Produktionsplanung und -steuerung: Zu den Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung gehören die Planung der Losgrößen und der Maschinenbelegung sowie die Steuerung der Produktion. Je nach Anbieter werden diese Aufgaben durch ein gemeinsames oder zwei getrennte Module abgedeckt. Da die Planung auf dieser detaillierten Ebene stark von der tatsächlichen Produktionsorganisation abhängt, haben einige Anbieter mehrere alternative Module im Angebot.
- Distributions- und Transportplanung: Die Distributionsplanung dient der detaillierteren Betrachtung der Materialflüsse als bei der Masterplanung, wohingegen die Transportplanung die kurzfristige Planung der tatsächlichen Transporte zur Aufgabe hat.

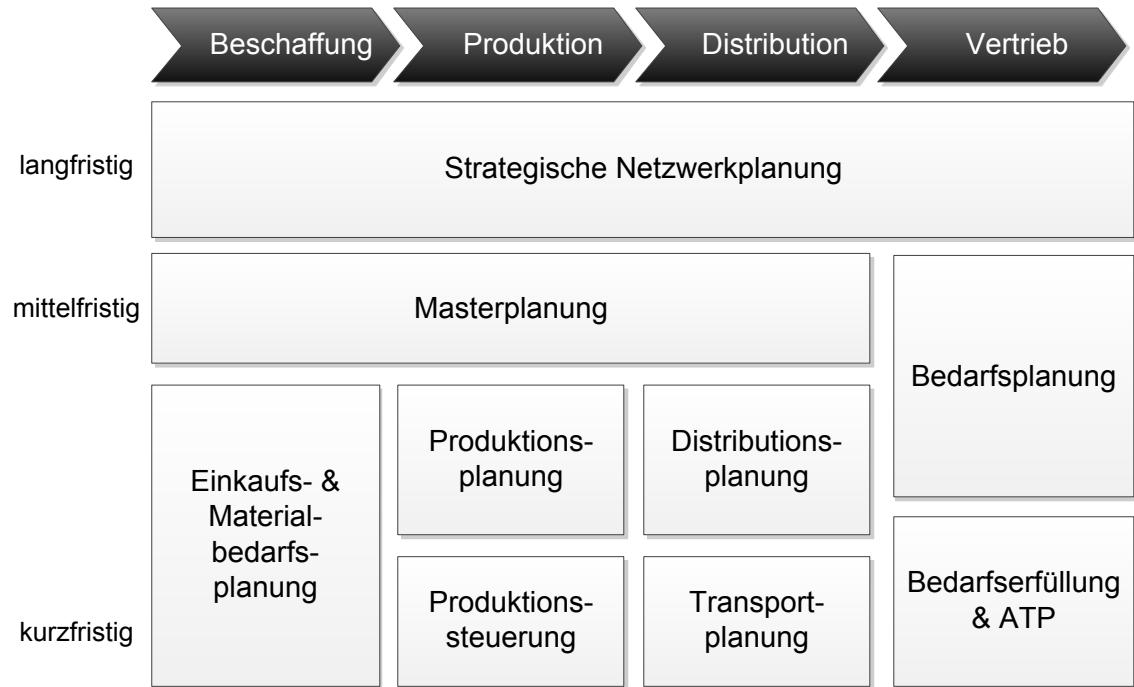


Abbildung 3.2 Modulare Struktur von Advanced Planning Systems (vgl. [MWR08])

In den einzelnen Modulen werden in der Regel spezielle auf die Erfüllung der Aufgaben zugeschnittene Verfahren verwendet. So werden beispielsweise verschiedene quantititative Prognoseverfahren für die Bedarfsprognose im Rahmen der Bedarfsplanung eingesetzt. Während die Implementierung von Prognoseverfahren relativ einfach umgesetzt werden kann, erfordern andere Module den Einsatz deutlich komplexerer und schwerer umzusetzender Optimierungsmethoden (vgl. [GüTe05]). Dies ist eine Erklärung dafür, dass obwohl in der Theorie zahlreiche Modelle und Lösungsverfahren für die Produktionsplanung existieren, APS „i. d. R. [nur] einfache heuristische Verfahren mit einem möglichst breiten Anwendungsbereich“ [GüTe05] einsetzen. Ähnlich verhält es sich in den Modulen Strategische Netzwerkplanung und Masterplanung. Hier ist zwar der Einsatz von Standard-Optimierungssoftware zu Lösung mathematischer Optimierungsmodelle vorgesehen ist, jedoch wird bei größeren Modellen, wie sie in der Praxis die Regel sind, auf Heuristiken zurückgegriffen. Diese werden in der Regel jedoch nicht näher erläutert, so dass Zweifel an ihrer Leistungsfähigkeit bestehen (vgl. [GüTe05]).

4 Zu leistende Arbeit

In Kapitel 2 werden die Aufgabeninhalte einer hierarchischen Dimensionierung dargestellt und die Gesamtaufgabe in vier Planungsebenen gegliedert. Zudem erfolgt die Bestimmung der Anforderungen an ein Gesamtverfahren sowie an die einzelnen Planungsebenen. Die Umsetzung dieser Anforderungen in einem Planungsverfahren bedarf einer geeigneten Modellierung der einzelnen Ebenen. Für jede der Ebenen ist daher jeweils ein mathematisches Optimierungsmodell zu erstellen bevor die einzelnen Modelle anschließend zu einem hierarchischen Gesamtplanungsprozess zusammengeführt werden können.

4.1 Erstellung mathematischer Optimierungsmodelle für die einzelnen Ebenen

Die Untersuchungen in Kapitel 3 haben gezeigt, dass die existierenden Verfahren die in Kapitel 2 aufgeführten Anforderungen nicht vollständig erfüllen. Insbesondere existiert kein durchgängiger Planungsansatz, der sämtliche Anforderungen an die Dimensionierung erfüllt. Einige Verfahren und Modelle bilden jedoch einige im Rahmen dieser Arbeit relevante Aspekte ab und sind daher bei der Modellbildung zu berücksichtigen. Von besonderem Interesse sind dabei die Modelle I und II von Timm (vgl. [Tim09]), da sie die für Ebene 3 bzw. 4 definierten Anforderungen fast vollständig erfüllen. Daher sollen sie als Grundlage für die Modelle dieser Ebenen verwendet werden und durch geeignete Modifikationen an die Anforderungen der hierarchischen Dimensionierung angepasst werden. Dagegen sind für die Planungsebenen 1 und 2 vollständig neue Modelle zu erstellen, da die bekannten Modelle jeweils nur in wenigen Aspekten mit den Anforderungen übereinstimmen und sich damit nicht als Basis für die zu erstellenden Modelle eignen. Die vier Modelle sind inklusive aller Parameter, Variablen und Restriktionen aufzustellen und zu beschreiben. Zudem ist jeweils eine Zielfunktion zu definieren, die den Anforderungen aus 2.3 gerecht wird indem sie alle relevanten Kostengrößen berücksichtigt.

4.2 Definition eines hierarchischen Gesamtprozesses

Die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Arbeiten zur hierarchischen Planung von Produktionsnetzwerken definieren zum einen die grundlegenden Elemente einer hierarchischen Planung und zum anderen geben sie den konzeptionellen Rahmen für die Erstellung

eines hierarchischen Gesamtplanungsprozesses mit mehreren interdependenten Planungsebenen vor. Die Elemente Hierarchisierung und Dekomposition finden sich bereits in der in Kapitel 2 beschriebene Strukturierung der Planungsaufgabe in vier Planungsebenen wieder. Zudem werden in 2.2 auch die grundlegenden Anforderungen an das Zusammenspiel der Ebenen festgelegt. Diese Anforderungen sind durch geeignete Koordinationsprozesse in einem Gesamtplanungsprozess umzusetzen. Hierzu sind in Anlehnung an Schneeweiß (vgl. [Sch03]) zwischen den Ebenen die drei Interdependenzformen Antizipation, Instruktion und Reaktion auszustalten. Dies bedarf der Abstimmung zwischen den Input- und Outputgrößen der einzelnen Ebenen, die bereits bei der Modellbildung zu berücksichtigen ist.

5 Konzeption einer hierarchischen Dimensionierung

5.1 Planungsmodelle für die hierarchische Dimensionierung

Bevor in den Abschnitten 5.1.1 - 5.1.4 die Modelle für die einzelnen Ebenen der hierarchischen Dimensionierung vorgestellt werden, erfolgt hier zunächst die Vorstellung übergreifend verwendeter Modellierungskonzepte.

In Anlehnung an die Modelle von Timm werden in den im Weiteren beschriebenen Modellen Produktionsprozesse durch Technologien dargestellt (vgl. [Tim09]). Abbildung 5.1 veranschaulicht diese Modellierung. Sie beschreibt den Transformationsprozess, in den Erzeugnisse⁷ als Inputfaktoren eingehen und diesen als Outputfaktoren verlassen und in dem Maschinen und Mitarbeiter als Ressourcen verwendet werden. Diese Darstellung erlaubt zum einen die Berücksichtigung alternativer Produktionsprozesse für ein Erzeugnis und zum anderen erlaubt sie es, die gleichzeitige Nutzung mehrerer Ressourcen abzubilden. Der zweite Aspekt ist insbesondere für die Modelle der Ebenen 3 und 4 von Bedeutung. Auf den Ebenen 1 und 2 wird zwar bei der Modellierung von der Nutzung einzelner Ressourcen abstrahiert, jedoch findet auch hier die Planung der qualitativen und quantitativen Kapazitäten auf Basis von Technologien statt. Dieser Unterschied zwischen den Modellen der Ebenen 1 und 2 und den Modellen der Ebenen 3 und 4 führt dazu, dass einer Technologie der Ebenen 1 und 2 mehrere Technologien der Ebenen 3 und 4 zugeordnet sein können. Der Verzicht auf die explizite Betrachtung der einzelnen Ressourcen führt auf den Ebenen 1 und 2 zur zusätzlichen Modellierung von Technologiegruppen, die Technologien mit ähnlichem Input und Output sowie insbesondere mit ähnlicher Ressourcennutzung zusammenfassen und damit die Berücksichtigung von Eigenschaften und Restriktionen auf Technologiegruppenebene ermöglichen. Entgegen der Modellierung von Timm wird bei den hier vorgestellten Modellen bei alternativen Produktionsprozessen für ein Erzeugnis ein identischer Erzeugniszusammenhang⁸ vorausgesetzt.

⁷ Hier werden nur Halb- und Fertigerzeugnisse, für die eine Eigenfertigung möglich und auch vorgesehen ist, berücksichtigt. Rohstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse, die ausschließlich fremdbeschafft werden, sind nicht Teil der Betrachtung. Ihre Verfügbarkeit wird implizit als gegeben angenommen.

⁸ Bei alternativen Produktionsprozessen können geringfügige Unterschiede des Erzeugniszusammenhangs bestehen. Diese können jedoch vernachlässigt werden, da sie i. d. R. nicht die eigengefertigten Teile betreffen. Daher wird hier nur ein eindeutiger Erzeugniszusammenhang berücksichtigt.

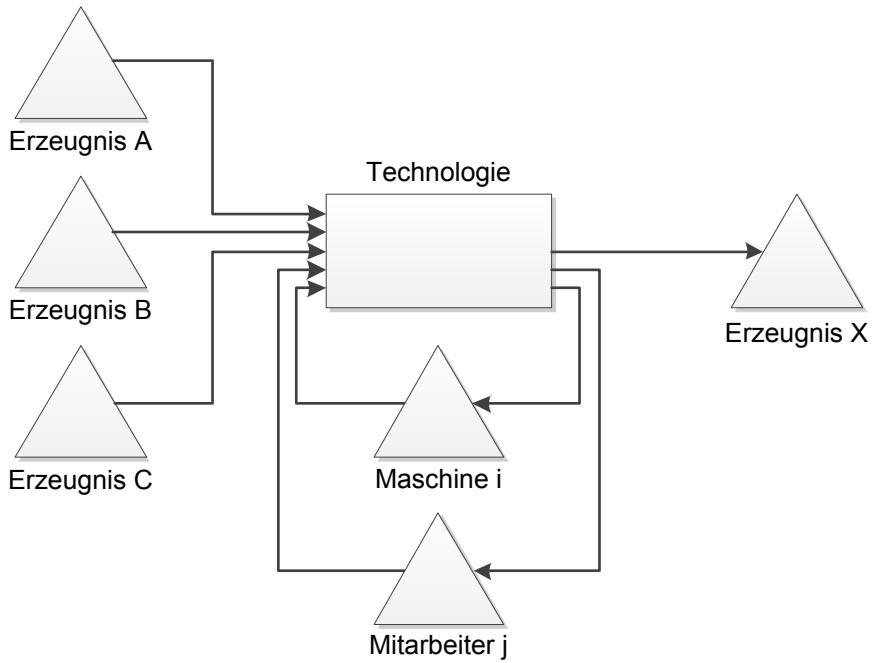


Abbildung 5.1 Darstellung eines Produktionsprozesses als Technologie (vgl. [Tim09])

Die zeitliche Struktur der einzelnen Modelle wird jeweils durch eine Menge $P = \{p_0, \dots, p_n\}$ der Perioden festgelegt. Die Elemente p_1, \dots, p_n definieren den Planungshorizont und unterteilen ihn in n gleich große Zeitabschnitte, während das Element p_0 benötigt wird, um den Zustand des Systems zu Beginn der Planung zu beschreiben. Die Länge der Perioden legt die Granularität des Zeitmodells fest und die Anzahl der betrachteten Perioden die zeitliche Reichweite der Planung. Da sich sowohl die Planungshorizonte als auch die geforderte Granularität je nach Planungsebene unterscheiden, leitet sich daraus ab, dass sich auch die Menge P und die Bedeutung ihrer Elemente je nach Planungsebene unterscheiden. Somit gilt die Menge P immer nur im Kontext des jeweiligen Modells. Die Konsistenz der zeitlichen Struktur über alle Ebenen ist außerhalb der Modelle sicherzustellen, wodurch gleichzeitig aber auch die Anpassung der zeitlichen Strukturen an die Anforderungen des zu planenden Produktionsnetzwerks realisiert werden kann. Ein Beispiel für die zeitliche Strukturierung der Modelle findet sich im Anwendungsbeispiel in Kapitel 6.2.

5.1.1 Modell für die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Das im Folgenden aufgeführte Modell dient der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten ausgehend von einem gegebenen unternehmensinternen Produktionsnetzwerk. Die Knoten dieses Netzwerks sind gegeben durch die Menge der

bereits bestehenden Standorte und geplanten neuen Standorte, während die möglichen Flüsse durch die erlaubten Zuordnungen von Produktionsprozessen zu diesen Standorten vorgegeben werden.

5.1.1.1 Mengen

E	Erzeugnisse
$P = \{p_0, \dots, p_n\}$	Perioden (Periode p_0 stellt die Ausgangssituation dar)
S	Standorte
L	Länder
T	Technologien
G	Technologiegruppen

5.1.1.2 Parameter

$b_{tsp}^{TZ} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologie t dem Standort s in Periode p zugeordnet werden darf
$b_{ts}^{T0} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologie t dem Standort s initial zugeordnet ist
$b_{gsp}^{TGZ} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologiegruppe g dem Standort s in Periode p zugeordnet werden darf
$b_{gs}^{TG0} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologiegruppe g dem Standort s initial zugeordnet ist
c_{tsp}^T	Kosten für Technologie t am Standort s in Periode p
c_{tsp}^{T+}	Kosten für das Hinzufügen von Technologie t zum Standort s in Periode p
c_{tsp}^{T-}	Kosten für das Entfernen von Technologie t vom Standort s in Periode p
c_{gsp}^{TG}	Kosten für Technologiegruppe g am Standort s in Periode p

c_{gsp}^{TG+}	Kosten für das Hinzufügen von Technologiegruppe g zum Standort s in Periode p
c_{gsp}^{TG-}	Kosten für das Entfernen von Technologiegruppe g vom Standort s in Periode p
$c_{ess'p}^{LGfix}$	fixe Logistikkosten für den Transport des Erzeugnisses e vom Standort s zum Standort s' in Periode p
c_e^{Pvar}	variabler Produktionskostensatz für die Produktion einer Einheit von Erzeugnis e
c_e^V	Strafkostensatz für Nichterfüllbarkeit für eine Einheit von Erzeugnis e
$z_{ee'}$	direkter Verbrauch von Erzeugnis e zur Produktion einer Einheit von Erzeugnis e' ; Produktionskoeffizient ⁹
M	hinreichend große Zahl; „big-M“
n_{ep}^B	Primärbedarf an Erzeugnis e in Periode p
n_{ep}^{SB}	Sekundärbedarf an Erzeugnis e in Periode p
	$n_{ep}^{SB} = \sum_{e' \in E \setminus e} z_{ee'} \cdot (n_{e'(p+v_e)}^B + n_{e'(p+v_e)}^{SB})$
n_{epl}^{BL}	Primärbedarf an Erzeugnis e in Periode p mit Endbestimmungsland l
n_{epl}^{SBL}	Sekundärbedarf an Erzeugnis e in Periode p mit Endbestimmungsland l
	$n_{epl}^{SBL} = \sum_{e' \in E \setminus e} z_{ee'} \cdot (n_{e'(p+v_e)l}^{BL} + n_{e'(p+v_e)l}^{SBL})$
n_{et}^{TE}	Output an Erzeugnis e bei Durchführung einer Einheit von Technologie t
n_{et}^{TB}	Benötigter Input an Erzeugnis e für die Durchführung einer Einheit von Technologie t
$n_{tsp}^{T_{max}}$	Maximale Anzahl der Technologie t an Standort s in Periode p

⁹ Zur Definition des Begriffs Produktionskoeffizient vgl. [DoSc05] S. 93

$n_{gsp}^{TGE_{max}}$	Maximaler Output an Erzeugnissen durch die Technologiegruppe g an Standort s in Periode p
$n^{TA_{max}}$	Maximal erlaubte Anzahl Technologieänderungen
$n^{TAP_{max}}$	Maximal erlaubte Anzahl Technologieänderungen pro Periode
$n^{TAST_{max}}$	Maximal erlaubte Anzahl Technologieänderungen pro Standort
$n^{TGA_{max}}$	Maximal erlaubte Anzahl Technologiegruppenänderungen
$n^{TGAP_{max}}$	Maximal erlaubte Anzahl Technologiegruppenänderungen pro Periode
$n^{TGAST_{max}}$	Maximal erlaubte Anzahl Technologiegruppenänderungen pro Standort
v_e	Vorlaufzeit für das Erzeugnis e in Perioden
y_l	Prozentsatz für Lokalisierung (Lokalisierungsgrad) für Land l
$\vartheta: T \rightarrow G$	Funktion die jeder Technologie eine Technologiegruppe zuordnet
$\rho: S \rightarrow L$	Funktion die jedem Standort ein Land zuordnet
$\tau: A \rightarrow L$	Funktion die jedem Auftrag ein Land zuordnet

5.1.1.3 Variablen

$b_{tsp}^T \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologie t dem Standort s in Periode p zugeordnet ist
$b_{tsp}^{T+} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologie t dem Standort s in Periode p neu zugeordnet wird
$b_{tsp}^{T-} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologie t dem Standort s in Periode p entzogen wird
$b_{gsp}^{TG} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologiegruppe g dem Standort s in Periode p zugeordnet ist
$b_{gsp}^{TG+} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologiegruppe g dem Standort s in Periode p neu zugeordnet wird
$b_{gsp}^{TG-} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologiegruppe g dem Standort s in Periode p entzogen wird

$b_{ess'p}^{LG} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Logistikkosten für den Transport des Erzeugnisses e vom Standort s zum Standort s' in Periode p anfallen
x_{ep}^V	Menge an Erzeugnis e , die in Periode p mit der gewählten Technologiezuordnung nicht erfüllt werden kann

5.1.1.4 Modell

Abbildung 5.2 stellt den Zusammenhang der Eingaben und Ergebnisse der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen dar. Die Leistungsfähigkeit der Knoten des Produktionsnetzwerks zu Beginn der Planung wird durch die Parameter b_{ts0}^T und b_{gso}^{TG} , die die initiale Zuordnung der Produktionsprozesse zu Standorten auf Technologie bzw. Technologiegruppenebene angeben, definiert. Die erlaubten Veränderungen dieser Zuordnung über den Planungshorizont werden durch die Parameter b_{tsp}^{TZ} und b_{gsp}^{TGS} festgelegt. Das Produktionsprogramm wird durch die Primärbedarfe n_{ep}^B und die Sekundärbedarfe n_{ep}^{SB} angegeben. Die länderspezifischen Primär- und Sekundärbedarfe mit Lokalisierungsanforderungen werden durch die Parameter n_{epl}^{BL} und n_{epl}^{SBL} vorgegeben, während y_l die länderspezifischen Lokalisierungsgrade angibt. Diese Eingaben ermöglichen es bereits auf dieser Ebene Lokalisierungsanforderungen zu berücksichtigen.

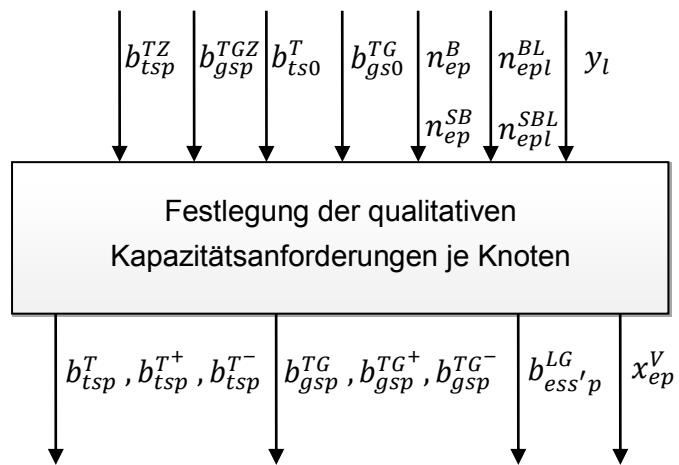


Abbildung 5.2 Eingaben und Ergebnisse der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Das Ergebnis setzt sich zum einen aus der periodenweisen Zuordnung von Technologien b_{tsp}^T und Technologiegruppen b_{gsp}^{TG} zu Standorten sowie ihrer Veränderungen im Zeitverlauf ($b_{tsp}^{T+}, b_{tsp}^{T-}, b_{gsp}^{TG+}, b_{gsp}^{TG-}$) zusammen. Zum anderen enthält das Planungser-

gebnis die sich daraus ergebende Nutzung von Transportbeziehungen, die durch die Binärvariablen $b_{ess'p}^{LG}$ angezeigt wird. Sollte durch die getroffene Zuordnung die vollständige Erfüllung des Produktionsprogramms nicht möglich sein, gibt die Variable x_{ep}^V die nicht befriedigten Bedarfsmengen an.

5.1.1.4.1 Zielfunktion

Die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten erfolgt mit dem Ziel die Summe der laufenden Kosten für die jeweilige Zuordnung, der einmaligen Kosten für notwendige Veränderungen sowie der durch die Zuordnung hervorgerufenen Logistikkosten zu minimieren. In der Zielfunktion (5.1) bildet die erste Summe die Kosten für die Zuordnung der Technologien und die zweite Summe die Kosten für die Zuordnung der Technologiegruppen ab. Diese setzen sich jeweils aus laufenden Kosten c_{tsp}^T bzw. c_{gsp}^{TG} , den Kosten für die Neuzuordnung von Technologien b_{tsp}^{T+} bzw. Technologiegruppen c_{gsp}^{TG+} sowie den Kosten für das Entfernen von Technologien b_{tsp}^{T-} bzw. Technologiegruppen c_{gsp}^{TG-} zusammen. Die dritte Summe erfasst die anfallenden Logistikkosten. Hierbei werden jedoch nur fixe Logistikkosten $c_{ess'p}^{LGfix}$, die durch die jeweilige Technologiezuordnung verursacht werden, betrachtet. Die letzte Summe fasst die Kosten, die für die Nichterfüllung von Bedarfen angesetzt werden, zusammen. Angesetzt wird ein Strafkostensatz c_e^V pro nicht erfüllte Mengeneinheit des Erzeugnisses e .

$$\begin{aligned} \min z_1 = & \sum_{p \in P} \left(\sum_{s \in S} \left(\sum_{t \in T} (b_{tsp}^T \cdot c_{tsp}^T + b_{tsp}^{T+} \cdot c_{tsp}^{T+} + b_{tsp}^{T-} \cdot c_{tsp}^{T-}) \right. \right. \\ & + \sum_{g \in G} (b_{gsp}^{TG} \cdot c_{gsp}^{TG} + b_{gsp}^{TG+} \cdot c_{gsp}^{TG+} + b_{gsp}^{TG-} \cdot c_{gsp}^{TG-}) \\ & \left. \left. + \sum_{e \in E} \sum_{s' \in S} b_{ess'p}^{LG} \cdot c_{ess'p}^{LGfix} \right) + \sum_{e \in E} x_{ep}^V \cdot c_e^V \right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

5.1.1.4.2 Nebenbedingungen

Die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten hat so zu erfolgen, dass die Erfüllung aller Bedarfe (Primärbedarfe n_{ep}^B und Sekundärbedarfe n_{ep}^{SB}) unter Berücksichtigung quantitativer Kapazitätsobergrenzen ermöglicht wird. Dabei geben die Variablen n_{tsp}^{Tmax} und n_{gsp}^{TGEmax} diese quantitativen Kapazitätsobergrenzen für die jeweilige Technologie bzw. Technologiegruppe an. Diese können sich an den einzelnen Standorten und in den verschiedenen Perioden unterscheiden. Die Bedingungen (5.2) und

(5.3) stellen sicher, dass an den Standorten durch die Zuordnung der Technologien und Technologiegruppen genügend Kapazität zur Erfüllung aller Bedarfe vorhanden ist, während die Bedingung (5.4) dafür sorgt, dass eine Technologie einem Standort in einer Periode nur dann zugeordnet werden kann, wenn auch die Technologiegruppe dieser Technologie dem Standort in dieser Periode zugeordnet ist. Hierdurch wird die Konsistenz der Technologie- und Technologiegruppenzuordnung sichergestellt.

$$n_{ep}^B + n_{ep}^{SB} - x_{ep}^V \leq \sum_{q=1}^{n^T} \sum_{l=1}^{n^{ST}} n_{et}^{TE} \cdot n_{tsp}^{T_{max}} \cdot b_{tsp}^T \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.2)$$

$$\sum_{e \in \{x \mid \sum_{t \in \{y \mid \vartheta(y)=g\}} n_{xt}^{TE} \neq 0\}} (n_{ep}^B + n_{ep}^{SB} - x_{ep}^V) \leq \sum_{l=1}^{ST} n_{gsp}^{TGE_{max}} \cdot b_{gsp}^{TG} \quad \begin{array}{l} \forall g \in G \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.3)$$

$$\begin{array}{l} b_{tsp}^T \leq b_{gsp}^{TG} \\ \forall t \in T \\ \forall s \in S \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.4)$$

$$g = \vartheta(t)$$

Die Bedingung (5.5) stellt sicher, dass die geforderten Lokalisierungsgrade durch die getroffene Zuordnung eingehalten werden. Da sich die Lokalisierungsanforderungen auf die lokal in dem jeweiligen Land erbrachte Wertschöpfung beziehen, erfolgt hier die Bewertung der Mengen mit dem variablen Produktionskostensatz $c_e^{P_{var}}$, um die lokal erbrachten Wertschöpfungsanteile zu bestimmen.

$$\begin{aligned} y_l \cdot \sum_{e \in E} (n_{epl}^{BL} + n_{epl}^{SBL}) \cdot c_e^{P_{var}} \\ \leq \sum_{t \in T} \sum_{s \in \{x \mid \rho(x)=l\}} \sum_{e \in E} n_{et}^{TE} \cdot n_{etp}^{T_{max}} \cdot b_{tsp}^T \cdot c_e^{P_{var}} \quad \forall p \in P \setminus p_0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Die Restriktionsgruppen (5.6) bis (5.9) dienen dem Bestimmen der Indikatorvariablen, die die Änderungen der Zuordnung von Technologien und Technologiegruppen anzeigen. Dies ist zum einen notwendig, um die hierfür anfallenden Kosten in der Zielfunktion berücksichtigen zu können. Zum anderen werden sie auch verwendet, um die Anzahl der Veränderungen zu beschränken.

$$\begin{aligned}
b_{tsp_i}^{T^+} &\leq 1 - b_{tsp_{i-1}}^T & \forall t \in T \\
b_{tsp_i}^{T^+} - b_{tsp_i}^T &\leq b_{tsp_{i-1}}^T & \forall s \in S & (5.6) \\
b_{tsp_i}^T - b_{tsp_i}^{T^+} &\leq b_{tsp_{i-1}}^T & \forall p_i \in P \setminus p_0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{tsp_i}^{T^-} &\leq 1 - b_{tsp_i}^T & \forall t \in T \\
b_{tsp_i}^{T^-} - b_{tsp_{i-1}}^T &\leq b_{tsp_i}^T & \forall s \in S & (5.7) \\
b_{tsp_{i-1}}^T - b_{tsp_i}^{T^-} &\leq b_{tsp_i}^T & \forall p_i \in P \setminus p_0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{gsp_i}^{TG^+} &\leq 1 - b_{gsp_{i-1}}^{TG} & \forall g \in G \\
b_{gsp_i}^{TG^+} - b_{gsp_i}^{TG} &\leq b_{gsp_{i-1}}^{TG} & \forall s \in S & (5.8) \\
b_{gsp_i}^{TG} - b_{gsp_i}^{TG^+} &\leq b_{gsp_{i-1}}^{TG} & \forall p_i \in P \setminus p_0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{gsp_i}^{TG^-} &\leq 1 - b_{gsp_i}^{TG} & \forall g \in G \\
b_{gsp_i}^{TG^-} - b_{gsp_{i-1}}^{TG} &\leq b_{gsp_i}^{TG} & \forall s \in S & (5.9) \\
b_{gsp_{i-1}}^{TG} - b_{gsp_i}^{TG^-} &\leq b_{gsp_i}^{TG} & \forall p_i \in P \setminus p_0
\end{aligned}$$

Die folgenden Restriktionen erlauben die Begrenzung der Anzahl Änderungen der Technologie- bzw. Technologiegruppenzuordnung. Diese Begrenzung ist sowohl insgesamt durch die Restriktionen (5.10) bzw. (5.13) als auch pro Periode durch die Restriktionen (5.11) bzw. (5.14) und pro Standort durch die Restriktionen (5.12) bzw. (5.15) möglich.

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P \setminus p_0} (b_{tsp}^{T^+} + b_{tsp}^{T^-}) \leq n^{TA_{max}} \quad (5.10)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} (b_{tsp}^{T^+} + b_{tsp}^{T^-}) \leq n^{TAP_{max}} \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.11)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{p \in P \setminus p_0} (b_{tsp}^{T^+} + b_{tsp}^{T^-}) \leq n^{TAST_{max}} \quad \forall s \in S \quad (5.12)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P \setminus p_0} (b_{gsp}^{TG^+} + b_{gsp}^{TG^-}) \leq n^{TGA_{max}} \quad (5.13)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} (b_{gsp}^{TG^+} + b_{gsp}^{TG^-}) \leq n^{TGAP_{max}} \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.14)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{p \in P \setminus p_0} (b_{gsp}^{TG^+} + b_{gsp}^{TG^-}) \leq n^{TGAST_{max}} \quad \forall s \in S \quad (5.15)$$

Die Ungleichung (5.16) setzt die Indikatorvariablen $b_{ess'p}^{LG}$, die anzeigen, ob durch die getroffene Zuordnung Logistikkosten für den Transport eines Erzeugnisses von einem Standort zu einem anderen Standort anfallen.

$$\begin{aligned} & \forall e \in E \\ & (b_{ts(p_i-v_e)}^T + b_{t's'p_i}^T) \cdot n_{et}^{TE} \cdot n_{et'}^{TB} \leq n_{et}^{TE} \cdot n_{et'}^{TB} \cdot (b_{ess'p_i}^{LG} + 1) \quad \forall s, s' \in S \\ & \forall p \in P \quad (5.16) \\ & \forall t, t' \in T \end{aligned}$$

Die Gleichungen (5.17) und (5.18) dienen der Initialisierung der Technologien bzw. der Technologiegruppen.

$$\begin{aligned} & \forall t \in T \\ & b_{ts0}^T = b_{ts}^{T0} \quad \forall s \in S \quad (5.17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \forall g \in G \\ & b_{gs0}^{TG} = b_{gs}^{TG0} \quad \forall s \in S \quad (5.18) \end{aligned}$$

Die Restriktion (5.19) ist die Nichtnegativitätsbedingung für die Variable x_{ep}^V .

$$\begin{aligned} & \forall e \in E \\ & x_{ep}^V \geq 0 \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.19) \end{aligned}$$

5.1.2 Modell für die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Das im Folgenden aufgeführte Modell dient der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten ausgehend von einem gegebenen unternehmensinternen Produktionsnetzwerk und festgelegten qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten.

Die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen erfolgt hier anhand von Kapazitätsstufen, die eine Abstraktion der eigentlichen Produktionsfaktoren (Maschinen, Personal) darstellen. Die quantitative Kapazität einer Produktionsstufe ergibt sich insbesondere auf Technologiegruppenebene aus der Kapazität der Gebrauchsfaktoren, insbesondere der Engpassmaschinen. Auf Technologieebene kann bei der Definition der Kapazitätsstufen aber auch die Verfügbarkeit fremdbeschaffter Verbrauchsfaktoren Berücksichtigung finden.

5.1.2.1 Mengen

E	Erzeugnisse
$P = \{p_0, \dots, p_n\}$	Perioden (Periode p_0 stellt die Ausgangssituation dar)
S	Standorte
L	Länder
A	Aufträge
T	Technologien
G	Technologiegruppen
$K = \{k_0, \dots, k_n\}$	Kapazitätsstufen (Kapazitätsstufe k_0 ist dabei immer die Kapazitätsstufe mit einer Kapazität = 0)

5.1.2.2 Parameter

$b_{tsp}^T \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologie t dem Standort s in Periode p zugeordnet ist
$b_{gsp}^{TG} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Technologiegruppe g dem Standort s in Periode p zugeordnet ist
$b_{kts}^{KSO} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob die Kapazitätsstufe k für Technologie t am Standort s initial gewählt ist
$b_{kgs}^{KSG0} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob die Kapazitätsstufe k für Technologiegruppe g am Standort s initial gewählt ist

$b_{kts}^{KSV} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob die Kapazitätsstufe k für Technologie t am Standort s in Periode p verfügbar ist
$b_{kgsp}^{KSGV} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob die Kapazitätsstufe k für Technologiegruppe g am Standort s in Periode p verfügbar ist
$b_{epas}^{BS} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob der Bedarf an Erzeugnis e in Periode p für Auftrag a am Standort s produziert werden darf
$c_{es}^{P_{fix}}$	Fixer Produktionskostensatz für die Produktion von Erzeugnis e am Standort s
$c_{es}^{P_{var}}$	Variabler Produktionskostensatz für die Produktion von Erzeugnis e am Standort s
c_{kts}^{KS}	Kosten für die Kapazitätsstufe k für Technologie t am Standort s in Periode p
c_{kgsp}^{KSG}	Kosten für die Kapazitätsstufe k für Technologiegruppe g am Standort s in Periode p
$c_{kk'ts}^{KA}$	Kapazitätsanpassungskosten für die Änderung von Kapazitätsstufe k zu Kapazitätsstufe k' für Technologie t am Standort s
$c_{kk'gs}^{KA}$	Kapazitätsanpassungskosten für die Änderung von Kapazitätsstufe k zu Kapazitätsstufe k' für Technologiegruppe g am Standort s
$c_{ess'p}^{LG}$	Logistikkosten für den Transport einer Einheit des Erzeugnisses e vom Standort s zum Standort s' in Periode p
c_{es}^V	Strafkostensatz für Nichterfüllbarkeit für eine Einheit von Erzeugnis e am Standort s
$z_{ee'}$	direkter Verbrauch von Erzeugnis e zur Produktion einer Einheit von Erzeugnis e' ; Produktionskoeffizient
M	hinreichend große Zahl; „big-M“
n_{epa}^B	Primärbedarf an Erzeugnis e in Periode p für Auftrag a
n_{et}^{TE}	Output an Erzeugnis e bei der Durchführung einer Einheit von Technologie t
n_{et}^{TB}	Benötigter Input an Erzeugnis e für die Durchführung einer Einheit von Technologie t

n_{tks}^{TKS}	Maximale Anzahl Einheiten der Technologie t bei Kapazitätsstufe k am Standort s (Es gilt: $n_{tks}^{TKS} \leq n_{tk_{i+1}s}^{TKS}$)
n_{gks}^{TGKS}	Maximale Anzahl Einheiten der Technologiegruppe g bei Kapazitätsstufe k am Standort s (Es gilt: $n_{gks}^{TGKS} \leq n_{gk_{i+1}s}^{TGKS}$)
v_e	Vorlaufzeit für das Erzeugnis e in Perioden
y_a	Anteil für Lokalisierung (Lokalisierungsgrad) für Auftrag a
$\vartheta: T \rightarrow G$	Funktion die jeder Technologie eine Technologiegruppe zuordnet
$\rho: S \rightarrow L$	Funktion die jedem Standort ein Land zuordnet
$\tau: A \rightarrow L$	Funktion die jedem Auftrag ein Land zuordnet

5.1.2.3 Variablen

$b_{ktsp}^{KS} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob die Kapazitätsstufe k für Technologie t am Standort s in Periode p gewählt ist
$b_{kgsp}^{KSG} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob die Kapazitätsstufe k für Technologiegruppe g am Standort s in Periode p gewählt ist
$b_{kk'tsp}^{KA} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob von Kapazitätsstufe k zu Kapazitätsstufe k' für Technologie t am Standort s in Periode p gewechselt wird
$b_{kk'gsp}^{KAG} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob von Kapazitätsstufe k zu Kapazitätsstufe k' für Technologiegruppe g am Standort s in Periode p gewechselt wird
$b_{eps}^{EST} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Erzeugnis e in Periode p am Standort s produziert wird
$n_{epass'}^{BSZ} \in \{0,1\}$	Bedarfsmenge an Erzeugnis e für Auftrag a , die in Periode p dem Standort s zur Produktion zugeordnet wird und an den Standort s' geliefert wird
x_{esp}^{EST}	Menge an Erzeugnis e , die dem Standort s in Periode p zugeordnet wird
x_{esp}^V	Menge an Erzeugnis e , die dem Standort s in Periode p zugeordnet wird, aber mit der gewählten Kapazitätsstufe nicht erfüllt werden kann

$x_{ess'p}^{LG}$

Menge des Erzeugnisses e , die vom Standort s zum Standort s' in Periode p transportiert wird

5.1.2.4 Modell

Die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten erfolgt auf Grundlage der auf der übergeordneten Hierarchieebene bestimmten Zuordnung von Technologien b_{tsp}^T und Technologiegruppen b_{gsp}^{TG} . Dabei gehen die auftragsabhängigen Primärbedarfe n_{epa}^B als Eingaben in die Planung ein und werden dann auf die Standorte verteilt. Dies geschieht unter Beachtung des geforderten Lokalisierungsgrades y_a für jeden Auftrag a und der erlaubten Bedarfsszuordnung b_{epas}^{BS} , die für jedes Erzeugnis e und Auftrag a festlegt, ob dieses in Periode p am Standort s produziert werden darf. Zusätzlich gehen die verfügbaren Kapazitätsstufen b_{ktsp}^{KSV} bzw. b_{kgsp}^{KSGV} pro Standort und Periode für Technologien bzw. Technologiegruppen in die Planung ein. Der Zusammenhang zwischen Eingaben und Ergebnissen der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

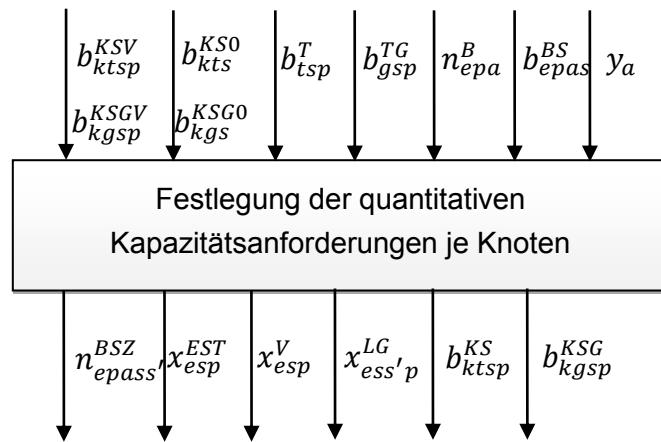


Abbildung 5.3 Eingaben und Ergebnisse der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

Das Ergebnis der Planung ist zunächst die Zuordnung der einzelnen auftragsbezogenen Bedarfe zu den Standorten, die durch die Variable b_{epas}^{BSZ} angegeben wird, sowie die sich daraus ergebende Zuordnung von Erzeugnismengen zu Standorten x_{esp}^{EST} . Als weitere Ergebnisse werden zum einen die Transportmengen $x_{ess'p}^{LG}$, die sich aus der Zuordnung ergeben, bestimmt und zum anderen werden die mit den festgelegten quantitativen Kapazitäten nicht erfüllbaren Erzeugnismengen x_{esp}^V ermittelt. Die festgelegten quantitativen

ven Kapazitäten werden durch die gewählten Kapazitätsstufen für Technologien bzw. Technologiegruppen pro Standort und Periode durch die Variablen b_{ktsp}^{KS} bzw. b_{kgsp}^{KSG} angegeben.

5.1.2.4.1 Zielfunktion

Die Zielfunktion minimiert die Summe aus Produktions-, Transport- und Kapazitätskosten. Die Produktionskosten für ein Erzeugnis e am Standort s setzen sich aus den fixen Produktionskosten $c_{es}^{P_{fix}}$ und den variablen Produktionskosten pro Stück $c_{es}^{P_{var}}$ zusammen. Die Transportkosten ergeben sich als Produkt der Transportmenge und dem jeweils für das Erzeugnis und die Standortkombination gültigen Transportkostensatz $c_{ess'p}^{LG}$. Die Kapazitätskosten setzen sich aus den Kosten für die Kapazitäten einzelner Technologien und den Kosten für die Kapazität von Technologiegruppen zusammen. In beiden Fällen ergeben sich die Kapazitätskosten aus den Kosten für das Bereitstellen einer Kapazitätsstufe (c_{ktsp}^{KS} bzw. c_{kgsp}^{KSG}) und den Kosten für notwendige Kapazitätsänderungen ($c_{k'kts}^{KA}$ bzw. $c_{k'kgs}^{KAG}$).

$$\begin{aligned}
 \min z_2 = & \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \left[\sum_{e \in E} \left(b_{esp}^{EST} \cdot c_{es}^{P_{fix}} + x_{esp}^{EST} \cdot c_{es}^{P_{var}} + x_{esp}^V \cdot c_{es}^V \right. \right. \\
 & + \sum_{m=1}^{n^{ST}} x_{ess'p}^{LG} \cdot c_{ess'p}^{LG} \left. \left. \right) \right. \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \left(b_{ktsp}^{KS} \cdot c_{ktsp}^{KS} + \sum_{k' \in K} b_{k'kts}^{KA} \cdot c_{k'kts}^{KA} \right) \\
 & \left. \left. + \sum_{g \in G} \sum_{k \in K} \left(b_{kgsp}^{KSG} \cdot c_{kgsp}^{KSG} + \sum_{k' \in K} b_{k'kgs}^{KAG} \cdot c_{k'kgs}^{KAG} \right) \right) \right] \quad (5.20)
 \end{aligned}$$

5.1.2.4.2 Nebenbedingungen

Bei der Zuordnung der Bedarfsmengen zu den Standorten ist sicherzustellen, dass jeder Bedarf für ein Erzeugnis und einen Auftrag in einer Periode, einem Produktionsstandort zugewiesen wird. Dies wird durch die Restriktionen (5.21) und (5.22) erreicht. Sie stellen gleichzeitig auch die stufenweise Konsistenz der Planung durch die Bestimmung von Sekundärbedarf und ihre Zuordnung zu Standorten sicher. Restriktion (5.23) sorgt dafür, dass jeder Bedarf nur zu einem hierfür erlaubten Standort zugeordnet wird.

$$\sum_{s \in S} \left(n_{ep_i ass}^{BSZ} - \sum_{s' \in S} \sum_{e' \in E} n_{e' p_{i+v_{e'}} ass'}^{BSZ} \cdot z_{ee'} \right) \geq n_{ep_i a}^B \quad \begin{aligned} \forall e \in E \\ \forall p_i \in P \setminus p_0 \\ \forall a \in A \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\sum_{s' \in S} n_{ep_{i-t^{LG}_{es'} s} as' s}^{BSZ} = \sum_{s' \in S} \sum_{e' \in E} n_{e' p_{i+v_{e'}} ass'}^{BSZ} \cdot z_{ee'} \quad \begin{aligned} \forall e \in E \\ \forall p_i \in P \setminus p_0 \\ \forall a \in A \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\forall s \in S$$

$$n_{epas}^{BSZ} \leq b_{epas}^{BS} \cdot M \quad \begin{aligned} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \\ \forall a \in A \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\forall s \in S$$

Die Festlegung der quantitativen Kapazitätsforderungen je Knoten erfolgt durch die Bestimmung der benötigten Kapazitätsstufen unter Berücksichtigung der dem Standort durch die Bedarfszuordnung zugeordneten Mengen an Erzeugnissen. Daher wird durch die Gleichung (5.24) für jeden Standort s die zugeordnete Menge des Erzeugnisses e in Periode p bestimmt und durch die Bedingung (5.25) die Indikatorvariable, die die Zuordnung eines Erzeugnisses zu einem Standort in einer Periode anzeigt, gesetzt. Ausgehend von den zugeordneten Mengen dienen die Bedingungen (5.26) und (5.28) der Auswahl der Kapazitätsstufen für Technologien bzw. Technologiegruppen, die die zur Herstellung der Erzeugnismengen benötigte Kapazität bereitstellen, unter Berücksichtigung der dem Standort zugeordneten Technologien bzw. Technologiegruppen. Außerdem bestimmen sie die mit den gewählten Kapazitätsstufen nicht erfüllbaren Mengen x_{esp}^V . Die Restriktionen (5.27) und (5.29) sorgen dafür, dass pro Technologie bzw. Technologiegruppe nur eine Kapazitätsstufe je Standort und Periode gewählt wird, während die Restriktionen (5.30) und (5.31) sicherstellen, dass dabei nur verfügbare Kapazitätsstufen gewählt werden.

$$x_{esp}^{EST} = \sum_{a \in A} \sum_{s' \in S} \left(n_{epass'}^{BSZ} \right) \quad \begin{aligned} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \\ \forall s \in S \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned}
& \forall e \in E \\
x_{esp}^{EST} & \leq b_{esp}^{EST} \cdot M \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.25) \\
& \forall s \in S
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \forall e \in E \\
x_{esp}^{EST} - x_{esp}^V & \leq \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} n_{et}^{TE} \cdot n_{tks}^{TKS} \cdot b_{tks}^{KS} \cdot b_{tsp}^T \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.26) \\
& \forall s \in S
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \forall t \in T \\
\sum_{k \in K} b_{tks}^{KS} & = 1 \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.27) \\
& \forall s \in S
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \forall g \in G \\
\sum_{t \in \{x | \vartheta(x)=g\}} \sum_{e \in \{x | n_{xt}^{TE} \neq 0\}} \frac{x_{esp}^{EST} - x_{esp}^V}{n_{et}^{TE}} & \leq \sum_{k \in K} n_{gks}^{TGKS} \cdot b_{kgsp}^{KSG} \cdot b_{gsp}^{TG} \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.28) \\
& \forall s \in S
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \forall t \in T \\
\sum_{k \in K} b_{tks}^{KSG} & = 1 \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.29) \\
& \forall s \in S
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \forall k \in K \\
b_{ktsp}^{KS} & \leq b_{ktsp}^{KSV} \quad \forall t \in T \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.30) \\
& \forall s \in S
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \forall k \in K \\
b_{kgsp}^{KSG} & \leq b_{kgsp}^{KSGV} \quad \forall g \in G \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.31) \\
& \forall s \in S
\end{aligned}$$

Die Restriktionsgruppen (5.32) bis (5.33) dienen dem Setzen der Indikatorvariablen, die die Änderungen der Auswahl der Kapazitätsstufen für Technologien und Technologiegruppen anzeigen. Dies ist notwendig, um die hierfür anfallenden Kosten in der Zielfunktion berücksichtigen zu können.

$$\begin{aligned}
 b_{kk'tsp_i}^{KA} &\leq b_{k'tsp_i}^{KS} & \forall k, k' \in K \\
 b_{kk'tsp_i}^{KA} - b_{k'tsp_{i-1}}^{KS} &\leq 1 - b_{k'tsp_i}^{KS} & \forall t \in T \\
 b_{k'tsp_{i-1}}^{KS} - b_{kk'tsp_i}^{KA} &\leq 1 - b_{k'tsp_i}^{KS} & \forall p_i \in P \setminus p_0 \\
 && \forall s \in S
 \end{aligned} \tag{5.32}$$

$$\begin{aligned}
 b_{kk'gsp_i}^{KAG} &\leq b_{k'gsp_i}^{KSG} & \forall k, k' \in K \\
 b_{kk'gsp_i}^{KAG} - b_{k'gsp_{i-1}}^{KSG} &\leq 1 - b_{k'gsp_i}^{KSG} & \forall g \in G \\
 b_{k'gsp_{i-1}}^{KSG} - b_{kk'gsp_i}^{KAG} &\leq 1 - b_{k'gsp_i}^{KSG} & \forall p_i \in P \setminus p_0 \\
 && \forall s \in S
 \end{aligned} \tag{5.33}$$

Die sich aus der Zuordnung der Bedarfe zu den Standorten ergebenden Transportmengen $x_{ess'p}^{LG}$ der Erzeugnisse zwischen den Standorten werden durch die Bedingung (5.34) bestimmt.

$$\begin{aligned}
 \sum_{a \in A} n_{epass'}^{BSZ} &\leq x_{ess'p}^{LG} & \forall e \in E \\
 && \forall p \in P \setminus p_0 \\
 && \forall s, s' \in S
 \end{aligned} \tag{5.34}$$

Die Bedingung (5.35) stellt sicher, dass die geforderten auftragsabhängigen Lokalisierungsgrade durch die getroffene Zuordnung eingehalten werden. Da sich die Lokalisierungsanforderungen auf die lokal in dem jeweiligen Land erbrachte Wertschöpfung beziehen, erfolgt hier die Bewertung der zugeordneten Mengen mit dem variablen Produktionskostensatz $c_{es}^{P_{var}}$, um die lokal erbrachten Wertschöpfungsanteile zu bestimmen.

$$\begin{aligned}
 y_a \cdot \sum_{p \in P \setminus p_0} \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} \sum_{s' \in S} n_{epass'}^{BSZ} \cdot c_{es}^{P_{var}} & \forall a \in A \\
 \leq \sum_{p \in P \setminus p_0} \sum_{e \in E} \sum_{s \in \{x | \rho(x) = \tau(a)\}} \sum_{s' \in S} n_{epass'}^{BSZ} \cdot c_{es}^{P_{var}} & \tag{5.35}
 \end{aligned}$$

Durch die Gleichungen (5.36) und (5.37) erfolgt die Initialisierung der Kapazitätsstufen für Technologien und Technologiegruppen.

$$\begin{aligned} & \forall k \in K \\ b_{kts0}^{KS} &= b_{kts}^{KS0} & \forall t \in T & \quad (5.36) \\ & \forall s \in S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \forall k \in K \\ b_{kgs0}^{KSG} &= b_{kgs}^{KSG0} & \forall g \in G & \quad (5.37) \\ & \forall s \in S \end{aligned}$$

Die Restriktionen (5.38), (5.39), (5.40) sind die Nichtnegativitätsbedingungen für die Variablen x_{esp}^{EST} , x_{esp}^V und $x_{ess'p}^{LG}$.

$$\begin{aligned} & \forall e \in E \\ x_{esp}^{EST} &\geq 0 & \forall p \in P \setminus p_0 & \quad (5.38) \\ & \forall s \in S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \forall e \in E \\ x_{esp}^V &\geq 0 & \forall p \in P \setminus p_0 & \quad (5.39) \\ & \forall s \in S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \forall e \in E \\ x_{ess'p}^{LG} &\geq 0 & \forall p \in P \setminus p_0 & \quad (5.40) \\ & \forall s, s' \in S \end{aligned}$$

5.1.3 Modell für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark

Das hier beschriebene Modell dient der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenbestand für einen Standort. Als Basis hierfür dient das Modell I des Planungsverfahrens von Timm (vgl. [Tim09]). Dieses wird hier modifiziert und erweitert, um den Anforderungen aus 2.3.3 zu genügen. Nicht benötigte Eigenschaften, wie z. B die implizite Modellierung von Szenarien, werden dabei aus dem

Modell entfernt. Auf die Modellierung von Prozessalternativen wird ebenfalls verzichtet, da dies hier eine unnötige Einschränkung des Handlungsspielraums darstellt. Insbesondere die damit erzwungene Beschränkung auf einen Fertigungsprozess pro Erzeugnis kann, trotz verfügbarer Kapazität für einen alternativen Fertigungsprozess, zur Nichterfüllung von Bedarfen führen. Dies widerspricht den Zielen der hier betrachteten Planungsaufgabe und ist daher nach Möglichkeit zu vermeiden.

5.1.3.1 Mengen

$P = \{p_0, \dots, p_n\}$	Perioden (Periode p_0 stellt die Ausgangssituation dar)
W	Werkzeuge ¹⁰ (derzeit vorhandene und mögliche neue Werkzeuge)
E	Erzeugnisse
T	Technologien

5.1.3.2 Parameter

$b_w^{W0} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Werkzeug w im Initialzustand vorhanden ist
c_w^F	Fixkosten, die in jeder Periode, in der Werkzeug w verfügbar ist, anfallen
c_e^K	Kaufpreis je Einheit von Erzeugnis e
c_w^N	Neuanschaffungskosten für Werkzeug w
c_w^P	Produktionskostensatz für eine Zeiteinheit auf Werkzeug w
c_w^R	Rüstkostensatz für eine Zeiteinheit auf Werkzeug w
c_e^V	Fehlmengenkostensatz je Mengeneinheit von Erzeugnis e
$z_{ee'}$	direkter Verbrauch von Erzeugnis e zur Produktion einer Einheit von Erzeugnis e' ; Produktionskoeffizient

¹⁰ Die Bezeichnung Werkzeuge wird hier von den Modellen von Timm übernommen. Er definiert dabei ein Werkzeug als die Zusammenfassung von Betriebsmitteln aus der Gruppe „Maschinen, Werkzeuge, Gebäude, Grundstücke“, so dass diese für die Durchführung von einer Menge von Fertigungsprozessen genutzt werden kann. (vgl. [Tim09])

M	hinreichend große Zahl; „big-M“
n_{ep}^B	Primärbedarf an Erzeugnis e in Periode p
$n_t^{RT_{max}}$	Maximale Anzahl Rüstvorgänge für die Durchführung von Technologie t je Periode
n_{et}^{TE}	Output an Erzeugnis e bei Durchführung einer Einheit von Technologie t
n_{et}^{TB}	Benötigter Input an Erzeugnis e für die Durchführung einer Einheit von Technologie t
t_{wp}^{KW}	Kapazität von Werkzeug w in Periode p in Zeiteinheiten
t_{tw}^{RT}	Dauer für das Rüsten von Werkzeug w zur Durchführung von Technologie t in Zeiteinheiten
t_{tw}^{TW}	Bearbeitungszeit an Werkzeug w für die Durchführung einer Einheit von Technologie t in Zeiteinheiten
v_e	Vorlaufzeit für das Erzeugnis e in Perioden

5.1.3.3 Variablen

$b_{wp}^W \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Werkzeug w in Periode p vorhanden ist
$b_{wp}^{WN} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Werkzeug w in Periode p neu angeschafft wird
$b_{ep}^K \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Erzeugnis e in Periode p ein Kaufteil ist
$b_{twp}^{RT} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Werkzeug w in Periode p zur Durchführung von Technologie t gerüstet wird
x_{ep}^K	Einkaufsmenge von Erzeugnis e in Periode p
x_{ep}^V	Fehlmenge für Erzeugnis e am Ende von Periode p
x_{tp}^T	Anzahl durchgeföhrter Einheiten von Technologie t in Periode p
n_{ep}^{SB}	Sekundärbedarf an Erzeugnis e in Periode p

5.1.3.4 Modell

In die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenbestand gehen die von diesem Standort zu erfüllenden Produktionsmengen als Standortprimärbedarfe n_{ep}^B ein. Die Bestimmung der Sekundärbedarfe und die Verteilung der gesamten Produktionsmenge auf die Maschinen (Werkzeuge) sind innerhalb des Modells abgebildet und berücksichtigen die verfügbare Kapazität je Werkzeug (t_{wp}^{KW}), die ebenfalls als Eingabe in das Modell einfließt. Als weitere Eingabe wird der Initialbestand an Werkzeugen (b_w^{W0}) berücksichtigt. Die Gegenüberstellung der Eingaben und Ergebnisse der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark findet sich in Abbildung 5.4.

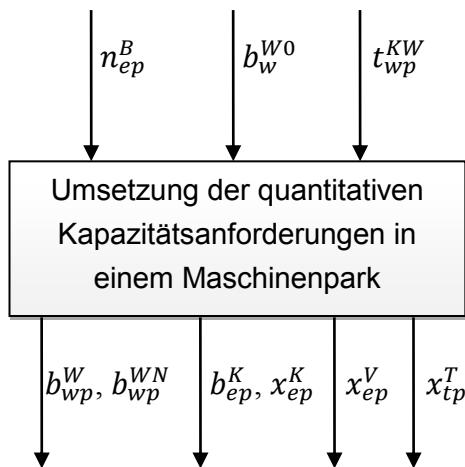


Abbildung 5.4 Eingaben und Ergebnisse der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark

Bei den Ergebnissen ist zunächst die optimale Entwicklung des Maschinenbestandes, die durch die Variablen b_{wp}^W und b_{wp}^{WN} angegeben wird, zu nennen. Des Weiteren werden hierbei auch die Kaufteile und Kaufmengen bestimmt. Die geplante Eigenfertigung wird durch die Variable x_{tp}^T angegeben und nicht erfüllbare Bedarfsmengen werden durch die Variable x_{ep}^V angegeben.

5.1.3.4.1 Zielfunktion

Die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark erfolgt mit dem Ziel der kostenminimalen Produktion der dem Standort zugeordneten Bedarfe. Hieraus ergibt sich folgende Zielfunktion:

$$\begin{aligned} \min z_3 = & \sum_{p \in P} \left[\sum_{w \in W} \sum_{t \in T} (b_{twp}^{RT} \cdot t_{tw}^{RT} \cdot c_w^R + x_{tp}^T \cdot t_{tw}^{TW} \cdot c_w^p) \right. \\ & \left. + \sum_{e \in E} (x_{ep}^K \cdot c_e^K + x_{ep}^V \cdot c_e^V) + \sum_{w \in W} (b_{wp}^W \cdot c_w^F + b_{wp}^{WN} \cdot c_w^N) \right] \end{aligned} \quad (5.41)$$

Den ersten Teil der Zielfunktion bildet die Summe der variablen Kosten der Eigenfertigung und setzt sich aus den werkzeugabhängigen Rüst- und Produktionskosten zusammen. Der zweite Teil summiert die Kosten der Fremdbezug sowie die Kosten der Nichterfüllung von Bedarf auf. Den letzten Teil der Zielfunktion bilden die fixen Kosten für die Werkzeugnutzung und die Kosten für die Neuanschaffung von Werkzeugen.

5.1.3.4.2 Nebenbedingungen

Die Bedingung (5.42) beschränkt die Anzahl der Rüstvorgänge für die Durchführung einer Technologien t pro Periode. Dabei stellt die Restriktion (5.43) sicher, dass Technologien nur dann durchgeführt werden können, wenn die entsprechenden Werkzeuge zu ihrer Durchführung gerüstet sind. Zusätzlich finden bei der Einplanung der Technologien die begrenzten Werkzeugkapazitäten Berücksichtigung. Dies geschieht durch die Restriktion (5.44), die dafür sorgt, dass die zum Rüsten und zum Durchführen von Technologien verwendete Zeit eines Werkzeugs, die verfügbare Werkzeugkapazität nicht übersteigt. Dabei wird auch berücksichtigt, ob das Werkzeug für die Nutzung in dieser Periode vorgesehen ist.

$$\sum_{w \in W} b_{twp}^{RT} \leq n_t^{RT_{max}} \quad \forall t \in T \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned} x_{tp}^T & \leq M \cdot b_{twp}^{RT} \quad \forall t \in T \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.43) \\ & \forall w \in W \end{aligned}$$

$$\sum_{t \in T} (b_{twp}^{RT} \cdot t_{tw}^{RT} + x_{tp}^T \cdot t_{tw}^{TW}) \leq t_{wp}^{KW} \cdot b_{wp}^W \quad \forall p \in P \setminus p_0 \quad \forall w \in W \quad (5.44)$$

Die Gleichungen (5.46) und (5.46) dienen dem Berechnen der Fehlmenge eines Erzeugnisses zum Ende einer Periode sowie der Bestimmung und Weitergabe von Sekundär-

bedarf. Sie bewirken dabei die Einplanung der Eigenfertigung unter Berücksichtigung von Fremdbeschaffungsoptionen.

$$n_{ep_i}^{SB} = \sum_{e' \in E} z_{ee'} \cdot (n_{ep_{i+v_{e'}}}^B + n_{ep_{i+v_{e'}}}^{SB} - x_{ep_{i+v_{e'}}}^K) \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p_i \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.45)$$

$$x_{ep}^V = \sum_{t \in T} x_{tp}^T \cdot n_{et}^{TE} - x_{ep}^K + n_{ep}^B + n_{ep}^{SB} \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.46)$$

Durch die Restriktion (5.47) wird die Indikatorvariable b_{wp}^{WN} , die anzeigt, ob ein Werkzeug in einer Periode neu eingeführt wird, gesetzt.

$$b_{wp_i}^W - b_{wp_{i-1}}^W \leq b_{wp_i}^{WN} \quad \begin{array}{l} \forall w \in W \\ \forall p_i \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.47)$$

Bei der Einplanung von Fremdvergabe ist zu berücksichtigen, dass nur Erzeugnisse, die als Kaufteile markiert sind, zugekauft werden dürfen. Dies stellt die Restriktion (5.48) sicher. Des Weiteren ist dabei zu beachten, dass Erzeugnisse, die als Kaufteile markiert sind, nicht zur Eigenfertigung eingeplant werden dürfen. Dies wird durch die Bedingung (5.49) erzwungen.

$$x_{ep}^K \leq b_{ep}^K \cdot M \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.48)$$

$$n_{et}^{TE} \cdot x_{tp}^T \leq M \cdot (1 - b_{ep}^K) \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \\ \forall t \in T \end{array} \quad (5.49)$$

Die Gleichung (5.50) stellt die Initialisierung der Werkzeugverfügbarkeit dar.

$$b_{w0}^W = b_w^{W0} \quad \forall w \in W \quad (5.50)$$

Die Nichtnegativitätsbedingungen für die Variablen x_{tp}^T , x_{ep}^K und x_{ep}^V finden sich in den Restriktionen (5.51), (5.52) und (5.53).

$$\begin{aligned} x_{tp}^T &\geq 0 & \forall t \in T \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{aligned} \quad (5.51)$$

$$\begin{aligned} x_{ep}^K &\geq 0 & \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{aligned} \quad (5.52)$$

$$\begin{aligned} x_{ep}^V &\geq 0 & \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{aligned} \quad (5.53)$$

5.1.4 Modell für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

Das hier aufgeführte Modell ist eine Modifikation und Erweiterung des Modells für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark, um die Berücksichtigung von Personal zu ermöglichen. Die Modifikationen und Erweiterung erfolgen dabei in Anlehnung an das Modell II des Planungsverfahrens von Timm (vgl. [Tim09]).

5.1.4.1 Mengen

$P = \{p_0, \dots, p_n\}$	Perioden (Periode p_0 stellt die Ausgangssituation dar)
W	Werkzeuge
E	Erzeugnisse
T	Technologien
MA	Mitarbeiter (derzeit beschäftigte und mögliche neue Mitarbeiter)
Q	Qualifikationen

5.1.4.2 Parameter

$b_{ep}^K \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Erzeugnis e in Periode p ein Kaufteil ist
------------------------	---

$b_m^{M0} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Mitarbeiter m derzeit beschäftigt wird
$b_{mq}^{MQ0} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Mitarbeiter m derzeit die Qualifikation q besitzt
$b_{wp}^W \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Werkzeug w in Periode p vorhanden ist
c_e^K	Kaufpreis je Einheit von Erzeugnis e
c_m^M	Grundgehalt von Mitarbeiter m je Periode
c^{ME}	Kosten für die Einstellung eines Mitarbeiters
c^{MR}	Kosten für die Freistellung eines Mitarbeiters
c_w^P	Produktionskostensatz für eine Zeiteinheit auf Werkzeug w
c_q^Q	Kosten für die Weiterbildung eines Mitarbeiters, um Qualifikation q zu erlernen
c_w^R	Rüstkostensatz für eine Zeiteinheit auf Werkzeug w
c_m^U	Kosten für eine Zeiteinheit Überstunden von Mitarbeiter m
c_e^V	Fehlmengenkostensatz je Mengeneinheit von Erzeugnis e
$z_{ee'}$	direkter Verbrauch von Erzeugnis e zur Produktion einer Einheit von Erzeugnis e' ; Produktionskoeffizient
M	hinreichend große Zahl; „big-M“
n_{ep}^B	Primärbedarf an Erzeugnis e in Periode p
$n_t^{RT_{max}}$	Maximale Anzahl Rüstvorgänge für die Durchführung von Technologie t je Periode
$n^{U_{max}}$	Maximale Anzahl Überstunden in Zeiteinheiten
n_{et}^{TE}	Output an Erzeugnis e bei Durchführung einer Einheit von Technologie t
n_{et}^{TB}	Benötigter Input an Erzeugnis e für die Durchführung einer Einheit von Technologie t
t_{wp}^{KW}	Kapazität von Werkzeug w in Periode p in Zeiteinheiten
t_{mp}^M	Grundarbeitszeit von Mitarbeiter m in Periode p in Zeiteinheiten

t_{tw}^{RT}	Dauer für das Rüsten von Werkzeug w zur Durchführung von Technologie t in Zeiteinheiten
t_{tq}^{TQ}	Benötigte Einsatzzeit eines Mitarbeiters mit der Qualifikation q zur Durchführung von Technologie t
t_{tw}^{TW}	Bearbeitungszeit an Werkzeug w für die Durchführung einer Einheit von Technologie t in Zeiteinheiten
t_q^L	Zeitaufwand, um Qualifikation q zu erlernen
v_e	Vorlaufzeit für das Erzeugnis e in Perioden

5.1.4.3 Variablen

$b_{mp}^M \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Mitarbeiter m in Periode p zur Verfügung steht
$b_{mp}^{ME} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Mitarbeiter m in Periode p neu eingestellt wird
$b_{mp}^{MR} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Mitarbeiter m in Periode p freigestellt wird
$b_{mfp}^{MQ} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Mitarbeiter m in Periode p Qualifikation q besitzt
$b_{mfp}^{MQN} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Mitarbeiter m in Periode p Qualifikation q neu erlernt
$b_{twp}^{RT} \in \{0,1\}$	Gibt an, ob Werkzeug w in Periode p zur Durchführung von Technologie t gerüstet wird
x_{ep}^K	Einkaufsmenge von Erzeugnis e in Periode p
x_{ep}^V	Fehlmenge für Erzeugnis e am Ende von Periode p
x_{tp}^T	Anzahl durchgeföhrter Einheiten von Technologie t in Periode p
x_{mp}^U	Überstunden von Mitarbeiter m in Periode p in Zeiteinheiten
x_{mfp}^{MQ}	Anzahl Zeiteinheiten, die Mitarbeiter m in Periode p für eine Tätigkeit mit der Qualifikation q aufwendet
n_{ep}^{SB}	Sekundärbedarf an Erzeugnis e in Periode p

5.1.4.4 Modell

Obwohl es sich bei dem Modell für die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand um eine Abwandlung und Erweiterung des Modells für Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark handelt, unterscheiden sich die beiden Modelle deutlich bezüglich ihrer Eingaben und Ergebnisse (siehe Abbildung 5.5). Insbesondere ist zu beachten, dass die Ergebnisvariablen der übergeordneten Ebene b_{wp}^W und b_{ep}^K , die die Entscheidungen bezüglich des Maschinenbestandes und der Fremdvergabe darstellen, hier als festgelegte Eingaben in das Modell eingehen und damit keine Entscheidungen diesbezüglich getroffen werden müssen. Als weitere Eingaben gehen hier die zu erfüllenden Primärbedarfe (n_{ep}^B), der Initialpersonalbestand (b_{m0}^M) sowie die Initialqualifikationen des Personals (b_{mq0}^{MQ}) ein.

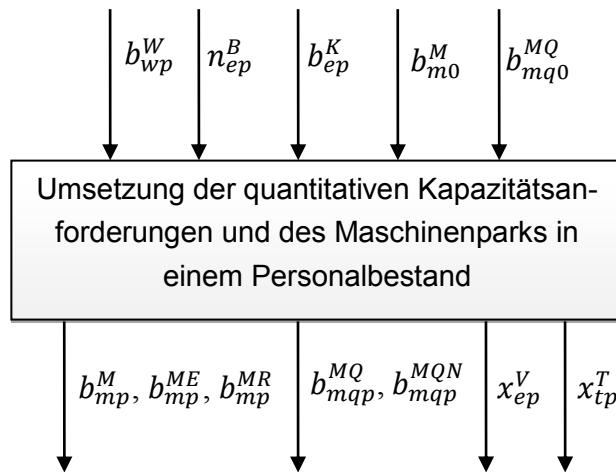


Abbildung 5.5 Eingaben und Ergebnisse der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

Die Ergebnisse bestehen zum einen aus der geplanten Entwicklung des Personalbestands (b_{mp}^M) inklusive der geplanten Einstellungen (b_{mp}^{ME}) und Freistellungen (b_{mp}^{MR}). Zum anderen enthält das Ergebnis die geplanten Mitarbeiterqualifizierungen (b_{mfp}^{MQN}) und die sich daraus ergebenden Mitarbeiterqualifikationen (b_{mfp}^{MQ}). Zusätzliche Ergebnisse sind hier die geplante Eigenfertigung (x_{tp}^T) und die sich daraus ergebenden Fehlmengen (x_{ep}^V). Aufgrund der Berücksichtigung der Personalverfügbarkeit kann es hier Abweichungen zu den auf der übergeordneten Ebene geplanten Mengen geben.

5.1.4.4.1 Zielfunktion

Die Zielfunktion unterscheidet sich von der Zielfunktion der übergeordneten Ebenen dadurch, dass die Berücksichtigung der Werkzeugkosten entfällt und durch die Summe der Personalkosten ersetzt wird. Diese setzen sich aus den Grundlöhnen der beschäftigten Mitarbeiter (c_m^M), den Kosten für Überstunden (c_m^U), den Kosten für die Einstellung (c^{ME}) und Freistellung (c^{MR}) von Mitarbeitern sowie den Kosten für die Qualifizierung von Mitarbeitern (c_q^Q) zusammen.

$$\begin{aligned} \min z_4 = \sum_{p \in P} \left[\sum_{w \in W} \sum_{t \in T} \left(b_{twp}^{RT} \cdot t_{tw}^{RT} \cdot c_w^R + x_{tp}^T \cdot t_{tw}^{TW} \cdot c_w^p \right) \right. \\ + \sum_{e \in E} (x_{ep}^K \cdot c_e^K + x_{ep}^V \cdot c_{ep}^V) \\ + \sum_{m \in M} \left(b_{mp}^M \cdot c_m^M + x_{mp}^U \cdot c_m^U + b_{mp}^{ME} \cdot c^{ME} + b_{mp}^{MR} \cdot c^{MR} \right. \\ \left. \left. + \sum_{q \in Q} b_{mqp}^{MQN} \cdot c_q^Q \right) \right] \end{aligned} \quad (5.54)$$

5.1.4.4.2 Nebenbedingungen

Die Restriktionen (5.55) bis (5.59) sind identisch zu den Restriktionen (5.42) bis (5.46), daher wird hier auf die Erklärung dieser verzichtet. Dies gilt ebenfalls für die Restriktionen (5.60) und (5.61), die identisch zu den Restriktionen (5.48) und (5.49) sind.

$$\sum_{w \in W} b_{twp}^{RT} \leq n_t^{RT_{max}} \quad \begin{aligned} \forall t \in T \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{aligned} \quad (5.55)$$

$$x_{tp}^T \leq M \cdot b_{twp}^{RT} \quad \begin{aligned} \forall t \in T \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{aligned} \quad (5.56)$$

$$\forall w \in W$$

$$\sum_{t \in T} (b_{twp}^{RT} \cdot t_{tw}^{RT} + x_{tp}^T \cdot t_{tw}^{TW}) \leq t_{wp}^{KW} \cdot b_{wp}^W \quad \begin{aligned} \forall p \in P \setminus p_0 \\ \forall w \in W \end{aligned} \quad (5.57)$$

$$n_{ep_i}^{SB} = \sum_{e' \in E} z_{ee'} \cdot (n_{ep_{i+v_{e'}}}^B + n_{ep_{i+v_{e'}}}^{SB} - x_{ep_{i+v_{e'}}}^K) \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p_i \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.58)$$

$$x_{ep}^V = \sum_{t \in T} x_{tp}^T \cdot n_{et}^{TE} - x_{ep}^K + n_{ep}^B + n_{ep}^{SB} \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.59)$$

$$n_{et}^{TE} \cdot x_{tp}^T \leq M \cdot (1 - b_{ep}^K) \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.60)$$

$$\forall t \in T$$

$$x_{ep}^K \leq b_{ep}^K \cdot M \quad \begin{array}{l} \forall e \in E \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.61)$$

Die nachfolgenden Restriktionen stellen die Erweiterungen zur Berücksichtigung des Personals dar. Bedingung (5.62) stellt für alle Perioden sicher, dass die Summe der Zeiteinheiten, die die Mitarbeiter für eine Tätigkeit mit der Qualifikation q eingeplant sind, ausreicht, um die für die geplante Eigenfertigung benötigte Anzahl Zeiteinheiten dieser Qualifikation zu decken. Bedingung (5.63) begrenzt die Zeit, die ein Mitarbeiter für Arbeitsaufgaben oder für das Erlernen neuer Qualifikationen aufbringen darf, auf die Summe aus seiner Grundarbeitszeit und der geplanten Überstunden, während Bedingung (5.64) die geplante Anzahl Überstunden auf die maximal erlaubte Anzahl Überstunden beschränkt.

$$\sum_{t \in T} x_{tp}^T \cdot t_{tq}^{TQ} \leq \sum_{m \in MA} x_{mfp}^{MQ} \quad \begin{array}{l} \forall p \in P \setminus p_0 \\ \forall q \in Q \end{array} \quad (5.62)$$

$$\sum_{q \in Q} (x_{mfp}^{MQ} + b_{mfp}^{MQN} \cdot t_i^L) \leq b_{mp}^M \cdot t_{mp}^M + x_{mp}^U \quad \begin{array}{l} \forall m \in MA \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.63)$$

$$x_{mp}^U \leq n_{mp}^{U_{max}} \cdot b_{mp}^M \quad \begin{array}{l} \forall m \in MA \\ \forall p \in P \setminus p_0 \end{array} \quad (5.64)$$

Bedingung (5.65) stellt sicher, dass jeder Mitarbeiter nur für die Durchführung von Tätigkeiten eingeplant werden darf, wenn er die dafür benötigte Qualifikation besitzt.

$$\begin{aligned}
 & \forall m \in MA \\
 x_{mfp}^{MQ} & \leq M \cdot b_{mfp}^{MQ} & \forall q \in Q & \quad (5.65) \\
 & \forall p \in P \setminus p_0
 \end{aligned}$$

Die Restriktionen (5.66) bis (5.68) setzen die Indikatorvariablen, die das Erlernen von Qualifikationen (b_{mfp}^{MQN}), das Einstellen von Mitarbeitern (b_{mp}^{ME}) bzw. das Freistellen von Mitarbeitern (b_{mp}^{MR}) anzeigen.

$$\begin{aligned}
 & \forall m \in MA \\
 b_{mfp_i}^{MQ} - b_{mfp_{i-1}}^{MQ} & \leq b_{mfp_i}^{MQN} & \forall q \in Q & \quad (5.66) \\
 & \forall p_i \in P \setminus p_0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \forall m \in MA \\
 b_{mp_i}^M - b_{mp_{i-1}}^M & \leq b_{mp_i}^{ME} & \forall p_i \in P \setminus p_0 & \quad (5.67)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \forall m \in MA \\
 b_{mp_{i-1}}^M - b_{mp_i}^M & \leq b_{mp_i}^{MR} & \forall p_i \in P \setminus p_0 & \quad (5.68)
 \end{aligned}$$

Die Initialisierung der Mitarbeiterverfügbarkeit und der Mitarbeiterqualifikationen erfolgt durch die Restriktionen (5.69) bzw. (5.70).

$$b_{m0}^M = b_m^{M0} \quad \forall m \in MA \quad (5.69)$$

$$\begin{aligned}
 b_{mq0}^{MQ} & = b_{mq}^{MQ0} & \forall m \in MA \\
 & \forall q \in Q & \quad (5.70)
 \end{aligned}$$

Die Nichtnegativitätsbedingungen für die Variablen x_{tp}^T , x_{mfp}^{QM} , x_{ep}^K und x_{ep}^V finden sich in den Restriktionen (5.71), (5.72), (5.73) und (5.74).

$$\begin{aligned}
 x_{tp}^T & \geq 0 & \forall t \in T \\
 & \forall p \in P \setminus p_0 & \quad (5.71)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \forall m \in MA \\
 & x_{mqp}^{QM} \geq 0 \quad \forall q \in Q \quad (5.72) \\
 & \forall p \in P \setminus p_0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & x_{ep}^K \geq 0 \quad \forall e \in E \\
 & \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.73)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & x_{ep}^V \geq 0 \quad \forall e \in E \\
 & \forall p \in P \setminus p_0 \quad (5.74)
 \end{aligned}$$

5.2 Hierarchischer Gesamtplanungsprozess

Anhand der in Kapitel 2 getroffenen Strukturierung der Planungsaufgaben wird hier ein hierarchischer Planungsprozess vorgestellt. Zunächst werden unter 5.2.1 die dabei eingesetzten Koordinationsprozesse vorgestellt. Anschließend erfolgt unter 5.2.2 die Zusammenführung zu einem Gesamtablauf der hierarchischen Dimensionierung über alle vier vorgestellten Ebenen. Zur Lösung der Planungsaufgaben auf den einzelnen Ebenen können die zuvor vorgestellten mathematischen Modelle verwendet werden.

5.2.1 Koordinationsprozesse

Die Umsetzung einer hierarchischen Planung im Sinne des konzeptionellen Rahmens nach Schneeweß erfordert die Definition und die Umsetzung verschiedener Koordinationsprozesse. Die Berücksichtigung der untergeordneten Ebenen bei der Planung der übergeordneten Ebene erfolgt durch die Antizipation des Verhaltens der untergeordneten Ebenen im Modell der übergeordneten Ebene. Die Umsetzung der Antizipation in den Modellen der einzelnen Ebenen wird in Abschnitt 5.2.1.1 dargestellt. Unter Berücksichtigung der antizipierten Größen erfolgt bei der Planung der einzelnen Ebenen die Festlegung der jeweiligen Ergebnisgrößen. Ein Teil der Ergebnisgrößen definiert die Rahmengrößen für die untergeordneten Ebenen und geht somit als Instruktion in deren Planung ein. In Abschnitt 5.2.1.2 werden die umgesetzten Instruktionen beschrieben. Um Reaktionen der untergeordneten Ebenen auf die Instruktionen der übergeordneten Ebenen zu ermöglichen, sind Feedback-Beziehungen zu definieren. Dies erfolgt in Abschnitt 5.2.1.3.

5.2.1.1 Antizipation der untergeordneten Ebenen

Bei der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten erfolgt die Antizipation der untergeordneten Ebene durch die Berücksichtigung quantitativer Kapazitätsobergrenzen für die Produktionsprozesse und länderspezifischer Lokalisierungsquoten. Die Antizipationsfunktionen für die Kapazitätsobergrenzen werden durch die Gleichungen (5.75) und (5.76) angegeben. Hierbei werden die Kapazitätsobergrenzen anhand der verfügbaren Kapazitätsstufen mit der maximalen Kapazität bestimmt. Zusätzlich antizipieren die erlaubten Zuordnungen der Produktionsprozesse zu den Standorten die an den Standorten vorhanden Ressourcen und mögliche Ressourcenerweiterungen, die für die Durchführung der Produktionsprozesse erforderlich sind.

P^{Ebene1}

Perioden der Planungsebene 1

P^{Ebene2}

Perioden der Planungsebene 2

$\varphi: P^{Ebene2} \rightarrow P^{Ebene1}$

Funktion die jede Periode der Ebene 2 auf eine Periode der Ebene 1 abbildet

$$n_{tsp}^{T_{max}} = \sum_{p' \in \{x | \varphi(x) = p\}} \max_{k \in KS} b_{kts}^{KSV} \cdot n_{tks}^{TKS} \quad \forall t \in T \quad \forall p \in P^{Ebene1} \quad (5.75)$$

$\forall s \in S$

$$n_{gsp}^{TGE_{max}} = \sum_{p' \in \{x | \varphi(x) = p\}} \max_{k \in KSG} b_{kgsp}^{KGSV} \cdot n_{gks}^{TGKS} \quad \forall g \in G \quad \forall p \in P^{Ebene1} \quad (5.76)$$

$\forall s \in S$

Auf Ebene der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten stellen die Kapazitätsstufen eine Antizipation des Maschinen- und Personalbestandes, deren detaillierte Planung erst auf den untergeordneten Ebenen erfolgt, dar. Dabei wird jedoch von der tatsächlichen Nutzung der einzelnen Ressourcen abstrahiert. Formal kann die Antizipation der Maschinen- und Personalkapazitäten durch Kapazitätsstufen wie folgt dargestellt werden:

T^N

Technologien bei netzwerkweiter Betrachtung (Ebenen 1 und 2)

T_s^S	Technologien am Standort s (Ebenen 3 und 4)
$\theta_s: T_s^S \rightarrow T^N$	Funktion die jede Technologie des Standortes $s \in S$ auf eine netzwerkweite Technologie abbildet

$$n_{tks}^{TKS} = \frac{verfuegbareZeit_{ks}}{tz_{ts}} \quad \begin{array}{l} \forall t \in T^N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (5.77)$$

$$verfuegbareZeit_{ks} = AnzahlTage_{ks} \cdot ZeitProTag_{ks} \quad \begin{array}{l} \forall k \in K \\ \forall s \in S \end{array} \quad (5.78)$$

$$tz_{ts} = \min_{t' \in \{x | \theta_s(x) = t\}} \max_{w \in W} \frac{t_{t'w}^{TW}}{AnzahlParallelerBetriebsmittel_w} \quad \begin{array}{l} \forall t \in T^N \\ \forall s \in S \end{array} \quad (5.79)$$

Die einzelnen Kapazitätsstufen für eine Technologie und einen Standort unterscheiden sich durch die Anzahl der Arbeitstage pro Periode, die verfügbare Arbeitszeit pro Tag und die Anzahl der parallel nutzbaren Betriebsmittel.

Bei der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark enthalten die verfügbaren Werkzeugkapazitäten eine Antizipation der Personalverfügbarkeit.

5.2.1.2 Instruktionen

Die Planungsergebnisse der einzelnen Ebenen definieren den Handlungsrahmen für die untergeordneten Ebenen und stellen damit die Instruktionen der übergeordneten Ebenen an die untergeordneten Ebenen dar. So gibt die bei der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen bestimmte Produktionsprozesszuordnung den Rahmen für die Zuordnung der Produkte und Mengen auf Ebene der Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten vor, da jede Produktmenge nur einem Standort zugeordnet werden kann, wenn an diesem Standort der Produktionsprozess für die Herstellung dieses Erzeugnisses vorhanden ist. Die hierbei den Standorten zugeordneten Produkte und Mengen sind wiederum die Instruktionen an die zwei untergeordneten Ebenen, denn sie definieren die Bedarfe, die an den einzelnen Standorten zu produzieren sind. Bei der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark werden der hierfür benötigte Maschinenpark und der Anteil für die Fremdvergabe be-

stimmt, die dann ebenfalls als Instruktion in die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand eingehen.

5.2.1.3 Reaktionen

Zunächst werden hier Kennzahlen definiert, die für die Reaktionen innerhalb der stufenübergreifenden Koordination verwendet werden. Jede Kennzahl soll dabei wiedergeben, ob der durch die übergeordnete Ebene definierte Rahmen die Erfüllung der Ziele auf untergeordneter Ebene ermöglicht. Da die hierarchische Dimensionierung die Erfüllung des Produktionsprogramms sicherstellen soll, sind die nicht erfüllbaren Bedarfe in einer solchen Kennzahl zu berücksichtigen. Sie sind das deutlichste Zeichen dafür, dass der durch die übergeordnete Ebene festgelegte Rahmen nicht den Anforderungen genügt. Um eine erzeugnisübergreifende Vergleichbarkeit der Kennzahl sicherzustellen, ist dabei nicht nur die absolute Fehlmenge zu berücksichtigen, sondern ihr wertmäßiger Anteil an den jeweils in den Zielfunktionen berücksichtigten Kosten. Damit ergeben sich für die einzelnen Ebenen folgende Kennzahlen:

- Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten:

$$K_1 = \frac{\sum_{p \in P} \sum_{e \in E} x_{ep}^V \cdot c_e^V}{z_1} \quad (5.80)$$

- Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten :

$$K_2 = \frac{\sum_{p \in P} \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} x_{esp}^V \cdot c_{es}^V}{z_2} \quad (5.81)$$

- Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark:

$$K_3 = \frac{\sum_{p \in P} \sum_{e \in E} x_{ep}^V \cdot c_e^V}{z_3} \quad (5.82)$$

- Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand:

$$K_4 = \frac{\sum_{p \in P} \sum_{e \in E} x_{ep}^V \cdot c_e^V}{z_4} \quad (5.83)$$

Aus Gründen der Vollständigkeit werden hier Kennzahlen für alle vier Ebenen definiert. Da Reaktionen immer in Richtung der übergeordneten Ebene wirken und somit von der ersten Ebene aus keine Reaktion ausgeht, wird die Kennzahl K_1 nicht für die Umsetzung der Reaktionen benötigt. Sie kann aber vom Planer als Indikator verwendet werden, um mögliche Probleme bei der Planung bereits auf der obersten Ebene zu erkennen. Auf den restlichen Ebenen sind des weiteren Grenzwerte zu definieren, bei deren Überschreitung die Reaktionen erfolgen sollen. Die Grenzwerte geben dabei den Anteil der Fehlmengenkosten an den jeweils in den Zielfunktionen berücksichtigten Kosten, bis zu dem keine Reaktion erfolgen soll, an. Daraus folgt, dass für die Grenzwerte K_2^{max} , K_3^{max} und K_4^{max} gilt:

$$K_2^{max}, K_3^{max}, K_4^{max} \in [0,1] \quad (5.84)$$

Die Überschreitung des jeweiligen Grenzwertes wird an die übergeordnete Ebene gemeldet und bewirkt hier die Überprüfung und Anpassung der antizipierten Größen.

5.2.2 Ablauf der hierarchischen Dimensionierung

Führt man nun die zuvor beschriebenen Koordinationsprozesse zusammen, erhält man den in Abbildung 5.6 dargestellten Gesamtablauf der hierarchischen Dimensionierung. Auf Ebene 1, der Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten, wird eine optimale Zuordnung der Produktionsprozesse bestimmt. Diese wird dann in die Planungsparameter der Ebene 2 übernommen. Hier erfolgt dann die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten. Sollte dabei die Kennzahl K_2 über dem zuvor definierten Grenzwert K_2^{max} liegen, erfolgt die Feedback-Reaktion zur Anpassung der Planungsparameter der Ebene 1. Es wird hier jedoch keine sofortige Neuplanung mit den geänderten Parametern durchgeführt, stattdessen erfolgt die Rückkehr zum regulären Planungsablauf. Die hier durchgeführten Änderungen werden erst beim nächsten Planungslauf berücksichtigt. Die auf Ebene 2 bestimmte optimale Produkt- und Mengenzuordnung geht dann im weiteren Verlauf der Planung als Instruktion in die Parameter der Ebenen 3 und 4 ein. Auf Ebene 3 erfolgt anschließend die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark. Auch an dieser Stelle im Planungsprozess ist bei Überschreiten des definierten Grenzwertes K_3^{max} durch die Kennzahl K_3 eine Feedbackschleife zur Anpassung der Parameter der Ebene 2 für den nächsten Planungslauf vorgesehen. Nach Abschluss der Ebene 3 und einer möglichen Feedback-Schleife werden der bestimmte optimale Maschinenbestand sowie die Kaufteile in die Parameter der Ebene 4 übernommen bevor hier dann die Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbe-

stand erfolgt. Vor dem Ende des Planungsprozesses ist eine weitere Feedbackschleife, zur Anpassung der Parameter der Ebene 3, für den Fall, dass K_4 den Grenzwert K_4^{max} übersteigt, vorgesehen.

Bei der Darstellung ist zu beachten, dass sie einen einzelnen Planungslauf von der obersten bis zur untersten Ebene beschreibt. Im Rahmen einer rollierenden Planung ist dieser Prozess in regelmäßigen Abständen zu wiederholen. Aufgrund der kürzeren Planungszyklen auf den unteren Ebenen, besteht zudem die Möglichkeit auf einer tieferen Ebene in den Prozess einzusteigen ohne die übergeordneten Ebenen ebenfalls neu zu planen. Zudem ist zu beachten, dass die Planungsschritte, die sich nur auf einen einzelnen Standort beziehen, parallel für jeden Standort durchzuführen sind. Auf die graphische Darstellung dieser Aspekte wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Basierend auf dem hier vorgestellten Planungsprozess und den in Abschnitt 5.1 vorgestellten Modellen kann eine Überführung der hierarchischen Dimensionierung in ein rechnergestütztes Planungssystem erfolgen. Zur Lösung der mathematischen Modelle kann innerhalb eines solchen Planungssystems ein Standardsolver verwendet werden. Die prototypische Umsetzung der hierarchischen Dimensionierung in einem rechnergestützten Planungssystem und die Validierung anhand eines Anwendungsbeispiels wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

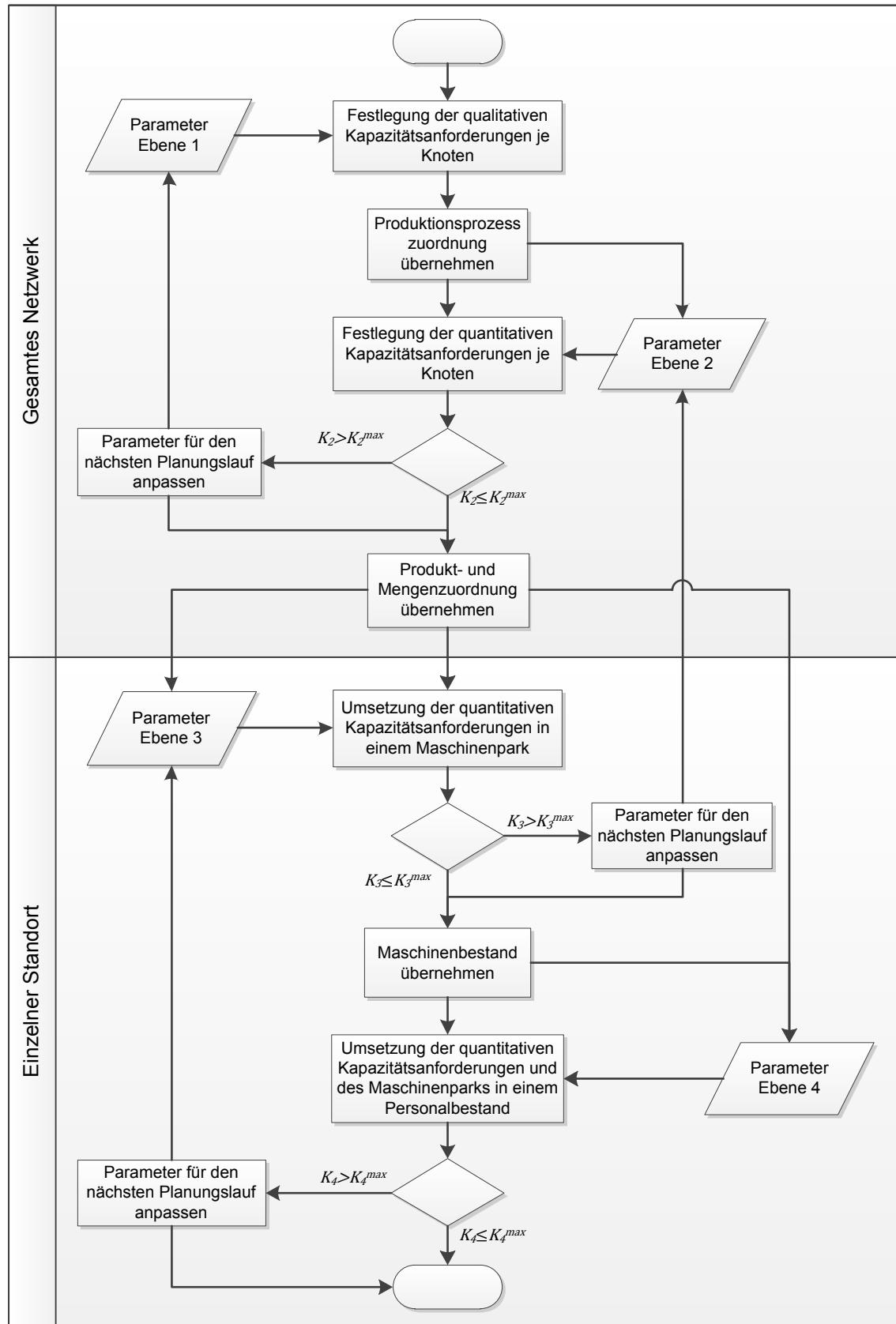


Abbildung 5.6 Hierarchischer Planungsprozess

6 Validierung

6.1 Prototypische Umsetzung

Um die Anwendbarkeit des konzipierten Planungsverfahrens auf eine realistische Problemstellung zu zeigen, erfolgte die prototypische Umsetzung des Verfahrens in einer Planungskomponente. Abbildung 6.1 stellt schematisch den Aufbau der erstellten Planungskomponente dar. Für die Speicherung der Eingabe- und Ausgabedaten der einzelnen Ebenen des Planungsverfahrens wird eine relationale Datenbank (hier: MS SQL Server) verwendet. Den Kern der Planungskomponente bildet ein Java Programm, das die Kommunikation mit der Datenbank realisiert, die Planungsablauflogik abbildet und die Erstellung der einzelnen Modellinstanzen durchführt. Die Lösung der generierten Modellinstanzen erfolgt durch die Anbindung des Standardsolvers IBM ILOG CPLEX.

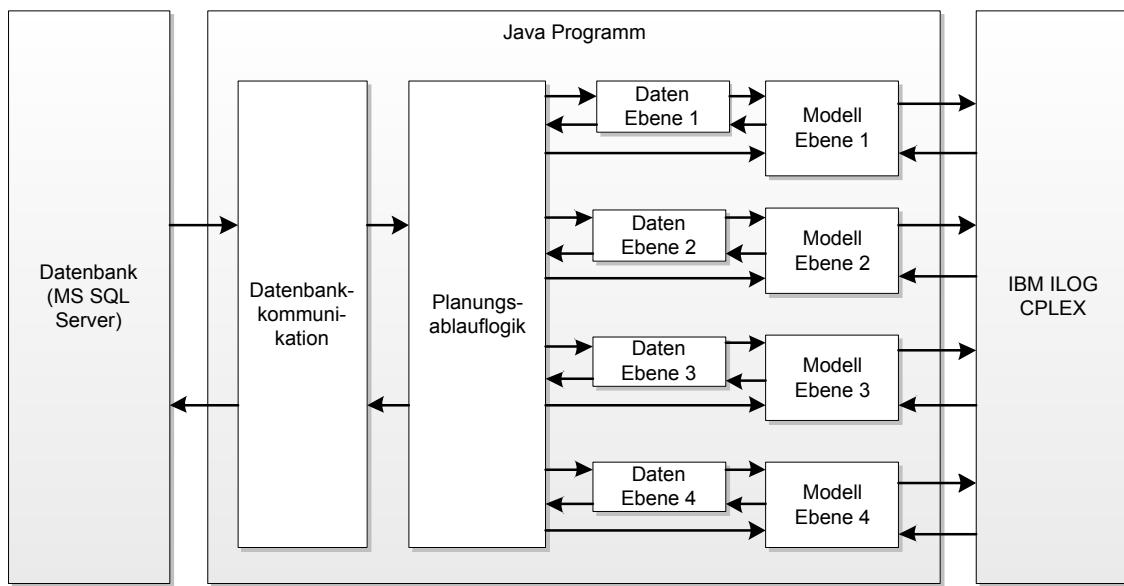


Abbildung 6.1 Aufbau der Planungskomponente

6.1.1 Datenmodell

Das umgesetzte Datenmodell bildet alle für die Durchführung der Planung und für die Speicherung der Planungsergebnisse notwendigen Daten ab. Hierbei enthält es sowohl Daten, die einem einzelnen Planungslauf zugeordnet sind, als auch Daten, die über die einzelnen Planungsläufe hinweg gültig sind. Zu Letzteren sind vor allem Stammdaten

wie z. B. Erzeugnis- und Standortdaten zu zählen. Die Ersteren werden zusätzlich noch in Eingabe- und Ausgebedaten unterteilt.

Die Speicherung von Eingabedaten erfolgt mit Bezug zu einem Szenario. Somit stellen ein Szenario und alle diesem Szenario zugeordneten Daten die Eingaben für einen Planungslauf dar. Dies ermöglicht die dauerhafte Speicherung eines Planungsdatensatzes und die Betrachtung alternativer Planungsszenarien. Diese können zum einen dazu dienen, unterschiedliche zukünftige Bedarfsverläufe abzubilden und hierfür Alternativpläne zu erstellen. Zum anderen können sie innerhalb des Koordinationsprozesses nach einem Rückkopplungsschritt zur Neuplanung mit geänderten Parametern verwendet werden.

Die Speicherung der Ergebnisse eines Planungslaufs erfolgt mit Bezug zu einem Plan. Dies erlaubt die dauerhafte Speicherung der Planungsergebnisse. Außerdem ist damit der Vergleich von Alternativplänen möglich, da jeder Plan einem Szenario zugeordnet ist und damit der Zusammenhang von Eingabe- zu Ausgabedaten hergestellt wird.

Um den Aufwand für die Datenerfassung so gering wie möglich zu halten, werden Daten, die bereits im unternehmensweiten ERP-System erfasst sind, in die Datenbank der Planungskomponente importiert.

6.1.2 Implementierung des Planungskerns

Der Planungskern des Prototyps ist in Java implementiert. Die Bestandteile des Planungskerns und ihr Zusammenspiel sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Datenbankkommunikation wird durch die Klasse DBConnection realisiert. Sie enthält sämtliche Methoden, die für das Laden der Inputdaten und das Speichern der Ergebnisse verwendet werden.

Die Planungsablauflogik wird in der Klasse Planung umgesetzt. Sie bildet den Einstiegspunkt für den Planungskern, denn sie steuert das Laden der Daten in Abhängigkeit vom zu planenden Szenario und der Planungsebene des Szenarios, initiiert den Modellaufbau sowie den Lösungsprozess und steuert das Speichern der Planungsergebnisse. Der Planungsablauf ist, soweit es möglich bzw. sinnvoll ist, parallelisiert. Dies ermöglicht eine deutliche Beschleunigung der Planung und das Ausnutzen der Rechenleistung moderner Mehrprozessorrechner.

Die Umsetzung der in Kapitel 5 konzipierten Optimierungsmodelle für die vier Planungsebenen erfolgt durch je eine Modell- und eine Datenklasse. Ein Objekt der jeweiligen Datenklasse kapselt die für die Planungsebene benötigten Eingabe- und Ausgabedaten in geeigneten Datenstrukturen. Während eines Planungslaufs wird zunächst ein

Objekt der Datenklasse erstellt und mit den zu verwendenden Eingabedaten gefüllt. Anschließend wird der Modellaufbau initiiert. Der Modellaufbau selbst findet dann in der jeweils zugehörigen Modellklasse unter Nutzung der CPLEX Java API statt. Hier werden abhängig von den Eingabedaten die Modellvariablen initialisiert sowie die Zielfunktion und die Restriktionen generiert und der Modellinstanz hinzugefügt. Auch hier wurde eine parallele Implementierung des Modellaufbaus umgesetzt, um den Prozess zu beschleunigen. Die so erstellte Modellinstanz wird anschließend mithilfe von CPLEX gelöst und die Ergebnisse werden dem Datenobjekt hinzugefügt.

6.1.3 Reduzierung und Beherrschung der Planungskomplexität

Um das konzipierte Planungsverfahren in einem realen Unternehmen einsetzen zu können, ist bei der Umsetzung der Modelle im Planungskern sicherzustellen, dass sie auch bei realistischen Problemgrößen noch handhabbar sind. Werden jedoch alle theoretisch denkbaren Beziehungen und Zuordnungen abgebildet, stößt man relativ schnell an die Grenzen dessen, was selbst mit modernen Rechnern abbildbar und lösbar ist. Bei realen Problemstellungen kann jedoch in der Regel ein Großteil dieser Beziehungen und Zuordnungen von vornherein ausgeschlossen werden, da sie entweder (technisch) nicht umsetzbar sind oder aufgrund von (strategischen) Vorgaben nicht zugelassen sind. Daraus werden in der umgesetzten Planungskomponente nur tatsächlich mögliche Beziehungen und Zuordnungen modelliert, wodurch die Komplexität der Planungsprobleme deutlich reduziert werden kann und damit auch die Lösung realer Problemstellungen möglich ist. Dies ist möglich, da hierdurch nicht nur die Lösungszeit, sondern insbesondere auch der Speicherplatzbedarf für den Aufbau und die Lösung des jeweiligen Modells stark reduziert werden kann. Das ist besonders wichtig, da der verfügbare bzw. adressierbare Speicher des verwendeten Rechners die Begrenzung für die Größe des modellierbaren Produktionsnetzwerks darstellt.

Da diese Maßnahmen in der Praxis nicht immer ausreichen, um das gesamte Produktionsnetzwerk auf einmal zu betrachten, kann es zudem notwendig sein, dieses in separat planbare Teilnetzwerke zu unterteilen. Je nach Anwendungsfall kann dies z. B. anhand der Geschäftsbereiche oder anhand der Erzeugnisstruktur erfolgen. Bei der Unterteilung ist darauf zu achten, dass die dabei entstehenden Teilnetzwerke möglichst unabhängig voneinander sind.

6.2 Anwendungsbeispiel für die hierarchische Dimensionierung

Das konzipierte Planungsverfahren wird unter Nutzung der in 6.1 vorgestellten Planungskomponente anhand eines Anwendungsbeispiels, das an die Planungssituation und die Anforderungen eines global produzierenden Unternehmens angelehnt ist, validiert. Bei dem hier verwendeten Beispiel handelt es sich jedoch um einen rein fiktiven Anwendungsfall. In diesem Beispiel findet die Produktion verschiedener Erzeugnisse weltweit verteilt an derzeit sieben Standorten statt. Insgesamt werden 3794 Erzeugnisse aus 28 Erzeugnisgruppen hergestellt, die sich wie in Tabelle 6.1 dargestellt auf die Standorte verteilen. Der größte Produktionsstandort ist der Standort A. Neben der vollständigen Produktion einiger Erzeugnisgruppen über alle Produktionsstufen, findet hier auch ein großer Teil der Teile- und Komponentenproduktion statt. Diese Teile und Komponenten werden an andere Standorte geliefert und gehen hier dann in die Enderzeugnisse ein. Die anderen Standorte sind in der Regel auf die Herstellung weniger Erzeugnisgruppen spezialisiert. Dieses sind teilweise aber wiederum Teile oder Komponenten, die an anderen Standorten weiterverarbeitet werden.

Standort	Anzahl Erzeugnisgruppen	Anzahl Erzeugnisse
A	21	2715
B	12	546
C	7	509
D	10	271
E	7	46
F	5	22
G	2	10

Tabelle 6.1 Größenordnung des derzeitigen Produktionsnetzwerks

Um die Erschließung eines neuen aufstrebenden Marktes, der bisher von den bestehenden Standorten aus beliefert wird, weiter voranzutreiben, wird derzeit ein lokaler Produktionsstandort aufgebaut. Der Aufbau dieses Standortes ist notwendig, da in vielen Ausschreibungen ein lokaler Wertschöpfungsanteil gefordert wird. Nach Abschluss des ersten Bauabschnittes soll hier im zweiten Quartal 2011 die Produktion von Erzeugnissen des Typs 1 für den lokalen Markt beginnen. Es besteht die Möglichkeit die Produktionsprozesse für 41 Enderzeugnisse der Erzeugnisgruppe 1 und 43 Komponenten der Erzeugnisgruppe 1K diesem Standort zuzuordnen. Nach Abschluss des zweiten Bauabschnittes stehen ab Mitte 2012 zusätzliche Produktionskapazitäten zur Verfügung. Darauf soll die Option geprüft werden, ab diesem Zeitpunkt auch Erzeugnisse der Erzeugnisgruppe 2 und/oder Komponenten der Erzeugnisgruppe 2K an diesem Standort zu

produzieren. Hierbei stehen bis zu 51 Produktionsprozesse für Enderzeugnisse der Erzeugnisgruppe 2 und bis zu 40 für Komponenten der Erzeugnisgruppe 2K zur Auswahl. Die Produktion anderer hoch innovativer Erzeugnisse ist für diesen Standort jedoch nicht vorgesehen. Zum Schutz des Know-Hows sollen sie weiterhin an den bestehenden Standorten hergestellt werden.

Bei dem hier betrachteten Anwendungsbeispiel wurde für die Planungsebenen 1 und 2 ein Rechner mit 24 Core Intel® Xeon® CPU X7460 2.66 GHz und 128 GB RAM und für die Ebenen 3 und 4 ein Rechner mit Intel® Core™ 2 CPU T7200 2 GHz und 2 GB RAM für den Aufbau der Modelle und die Optimierung verwendet. Die Optimierung erfolgte mithilfe des Solvers IBM ILOG CPLEX 12.1.

6.2.1 Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

6.2.1.1 Ausgangssituation

Der neu errichtete Standort soll von Beginn an optimal in das bestehende Produktionsnetzwerk integriert werden. Um dies zu ermöglichen, ist das Produktionsnetzwerk auf Grundlage der geänderten Struktur zu dimensionieren. Hierzu sind zunächst ausgehend von den in 6.2 beschriebenen Rahmenbedingungen und der erwarteten Bedarfsentwicklung für die nächsten 5 Jahre die qualitativen Kapazitätsanforderungen festzulegen. Hierbei ist die optimale Zuordnung von Produktionsprozessen zum neuen Standort unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf das bestehende Netzwerk zu finden.

Die erwarteten Bedarfsverläufe für die beiden Erzeugnisgruppen 1 und 2 sind in Abbildung 6.2 bzw. Abbildung 6.3 dargestellt und sollen exemplarisch die erwartete Bedarfsentwicklung illustrieren.

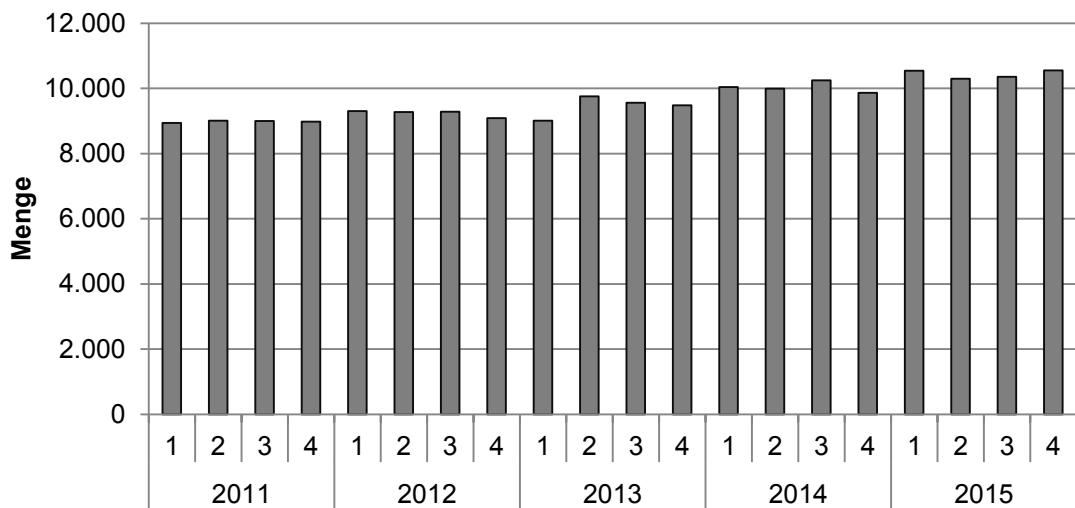


Abbildung 6.2 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 1 für 5 Jahre auf Quartalsbasis

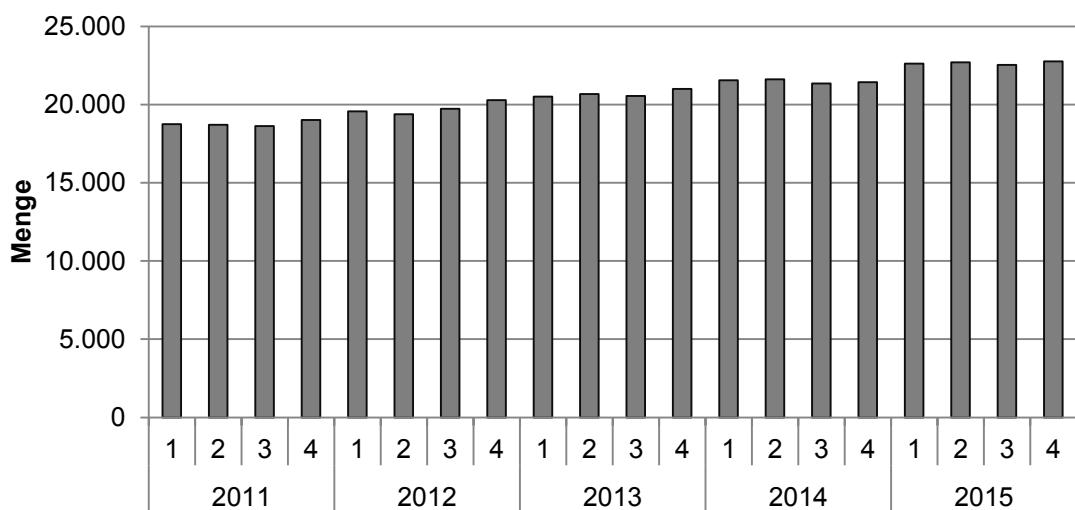


Abbildung 6.3 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 2 für 5 Jahre auf Quartalsbasis

Die Erzeugnisgruppen 1 und 2 sowie die dazugehörigen Komponenten 1K und 2K werden derzeit an den Standorten B und D produziert. Für diese vier Erzeugnisgruppen gibt die Tabelle 6.2 einen Überblick über die maximal möglichen Produktionsmengen an den Standorten B, D sowie dem neuen Standort X. Der größte Standort für die Fertigung dieser Erzeugnisse ist der Standort B. Am Standort D werden derzeit hauptsächlich Erzeugnisse für den lokalen Markt gefertigt. Durch den neuen Standort werden daher hauptsächlich Auswirkungen auf den Standort B erwartet. Dies soll im Weiteren untersucht und durch die Planung optimal abgestimmt werden.

Standort	Erzeugnisgruppe 1	Erzeugnisgruppe 1K	Erzeugnisgruppe 2	Erzeugnisgruppe 2K
B	9.000	13.000	20.500	27.500
D	2.100	2.000	2.000	2.500
X	1.400*	1.800*	1.500**	2.000**

*ab 2. Quartal 2011

**ab 3. Quartal 2012

Tabelle 6.2 Maximale Produktionsmengen pro Quartal in Stück

Für die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten ergibt sich insgesamt folgende Problemgröße:

- 3794 Erzeugnisse aus 28 Erzeugnisgruppen
- 8 Standorte (derzeitige 7 Standorte und 1 neuer Standort)
- 20 Perioden (Quartale)

6.2.1.2 Ergebnisse

Die oben beschriebene Planungsaufgabe wurde unter Verwendung des vorgestellten Planungssystems abgebildet und gelöst. Die dabei festgelegte optimale Zuordnung von Produktionsprozessen zu Standorten wird in den Abbildungen unten dargestellt. Diese zeigen die Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse der jeweiligen Erzeugnisgruppe. Hierbei ist deutlich der Produktionsanlauf am Standort X zu erkennen. Ab dem zweiten Quartal 2011 sind dem Standort zunächst 24 Produktionsprozesse für Erzeugnisgruppe 1 und 18 Produktionsprozesse für Erzeugnisgruppe 1K zugeordnet. Im weiteren Verlauf steigt dann die Anzahl zugeordneter Produktionsprozesse weiter an. Gleichzeitig gibt es einen leichten Rückgang der zugeordneten Produktionsprozesse dieser Erzeugnisgruppen am Standort D. Dieser ist jedoch nur vorübergehend und erreicht im ersten Quartal 2012 wieder das alte Niveau. Dies kann auf die steigenden Bedarfe zurückgeführt werden. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich ab dem dritten Quartal 2012 für die Erzeugnisgruppen 2 und 2K. Hier werden dem Standort X zunächst 36 bzw. 34 Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der jeweiligen Erzeugnisgruppe zugeordnet. Die Zahl steigt dann im weiteren Verlauf auf 43 bzw. 36 zugeordnete Produktionsprozesse an. Aufgrund des hohen Bedarfsniveaus findet an den Standorten B und D jedoch kein Rückgang, sondern sogar ein leichter Anstieg der Anzahl zugeordneter Produktionsprozesse statt.

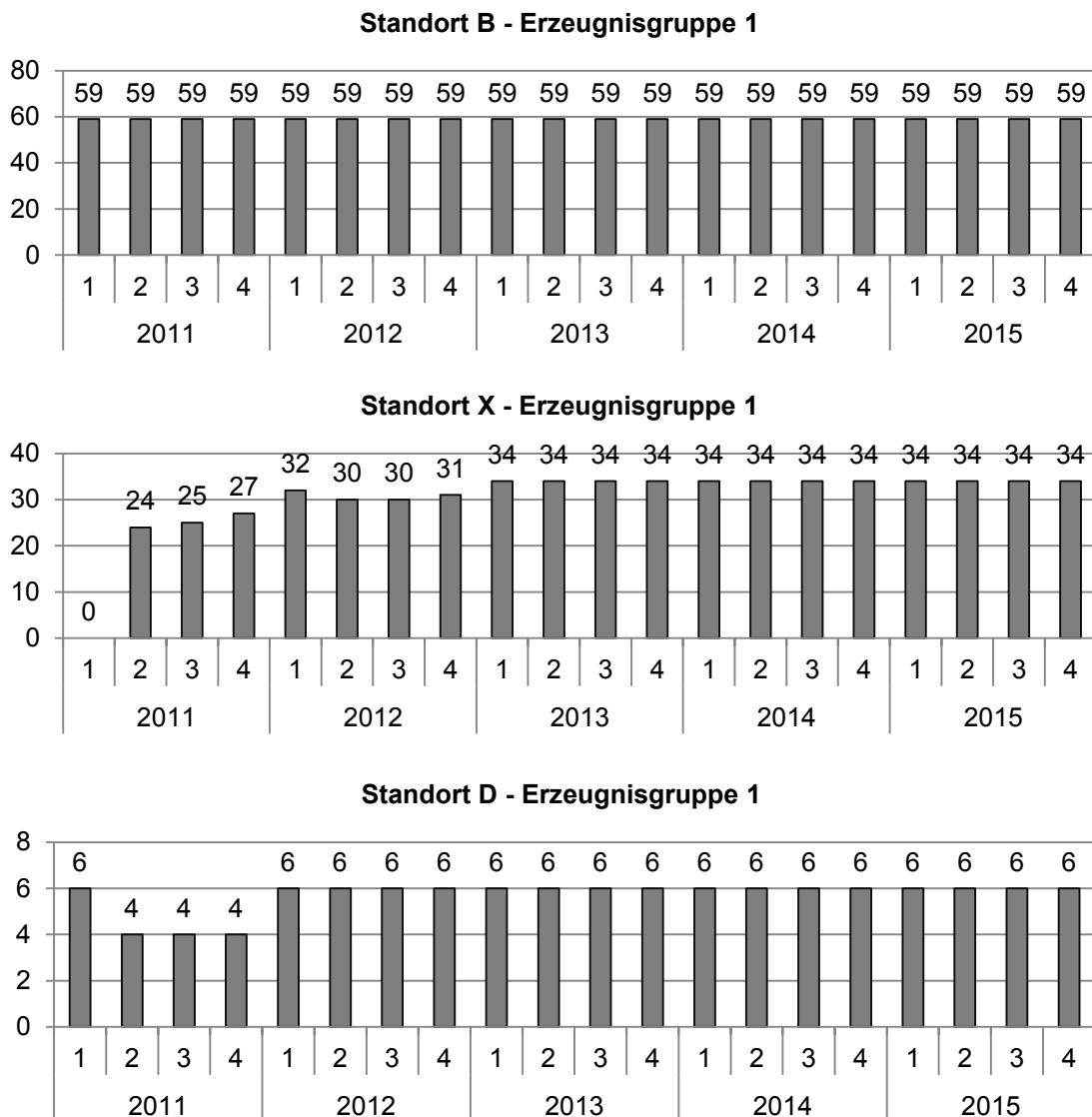


Abbildung 6.4 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 1

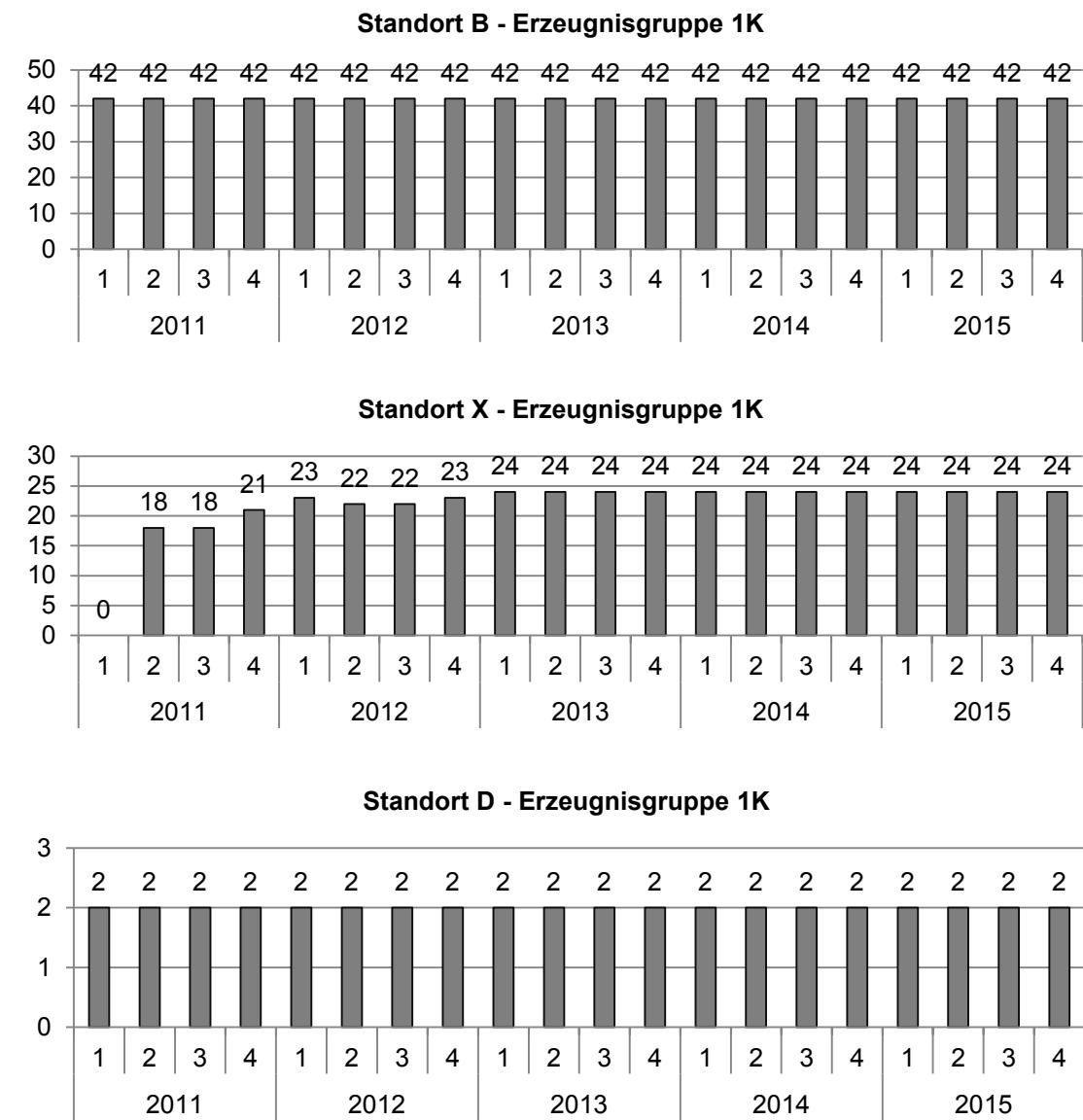


Abbildung 6.5 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 1K

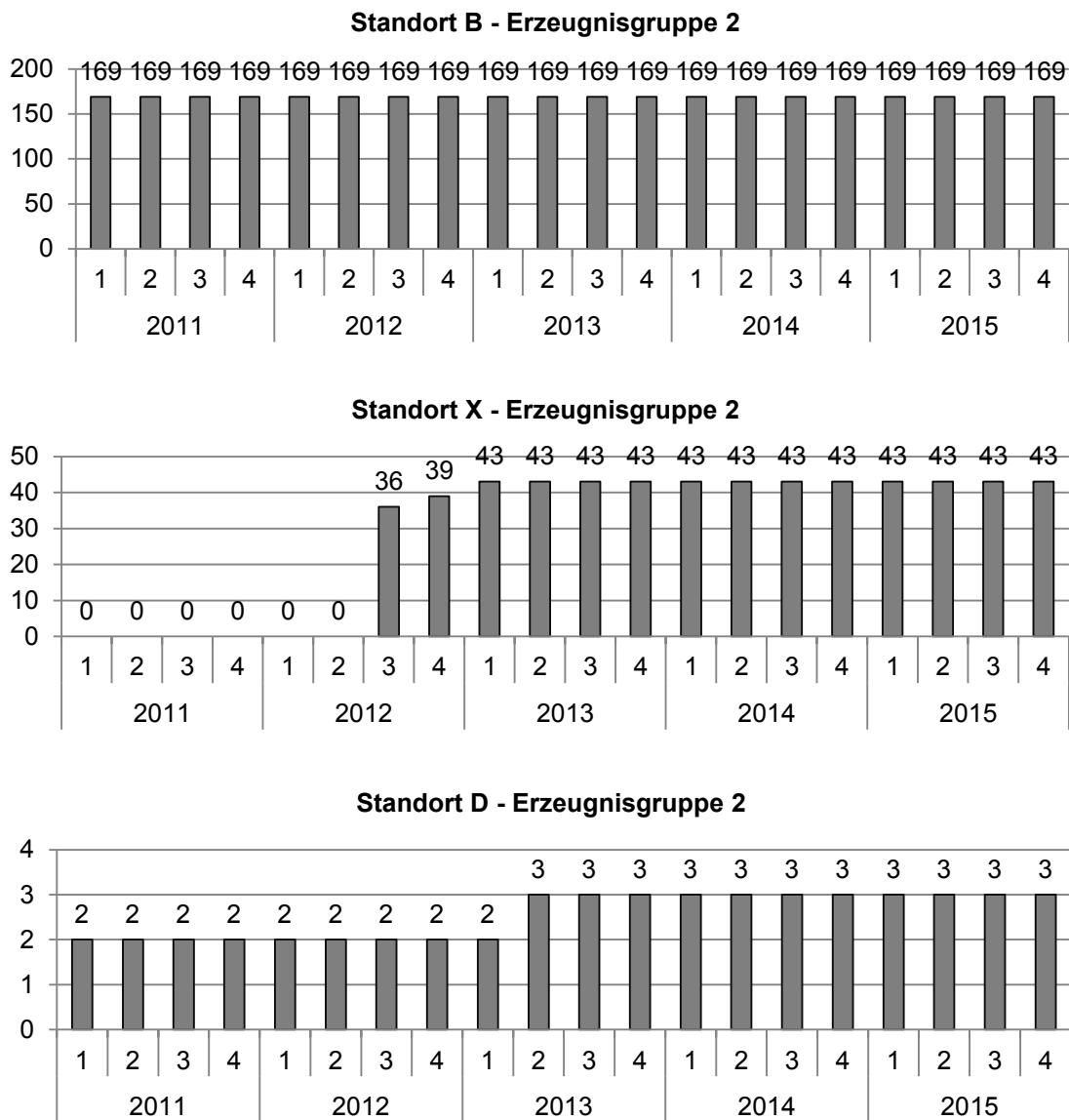


Abbildung 6.6 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 2

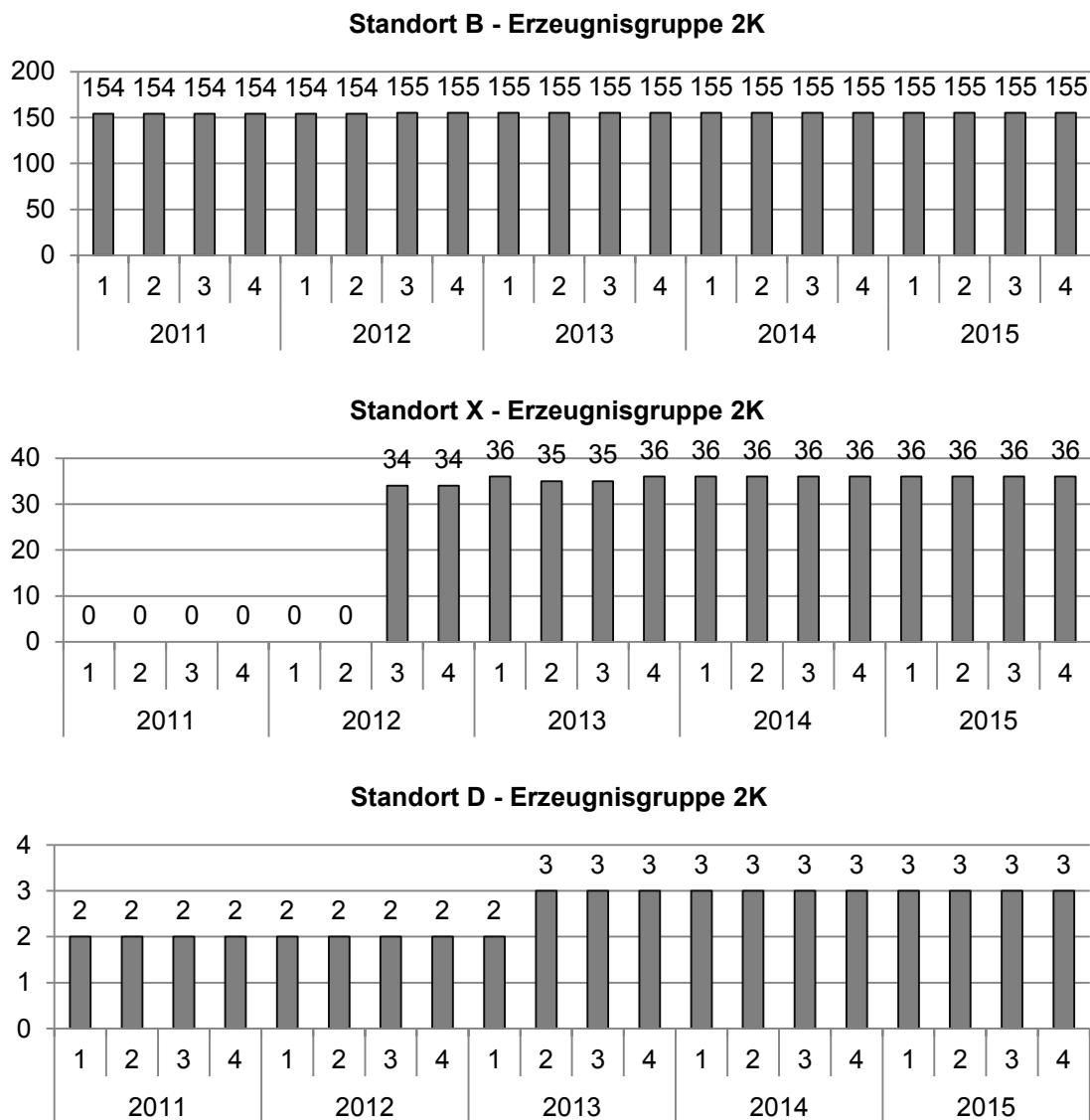


Abbildung 6.7 Anzahl pro Standort zugeordneter Produktionsprozesse für Erzeugnisse aus der Erzeugnisgruppe 2K

6.2.2 Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten

6.2.2.1 Ausgangssituation

Ausgehend von der im vorherigen Abschnitt gefunden Zuordnung von Produktionsprozessen zu den Standorten, sollen hier nun die quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten festgelegt werden. Hierzu sind die erwarteten Bedarfsmengen optimal auf die Produktionsstandorte zu verteilen. Die erwarteten Bedarfe sind exemplarisch für die

Erzeugnisgruppen 1 und 2 für die Jahre 2011 und 2012 in Abbildung 6.8 bzw. Abbildung 6.9 veranschaulicht.

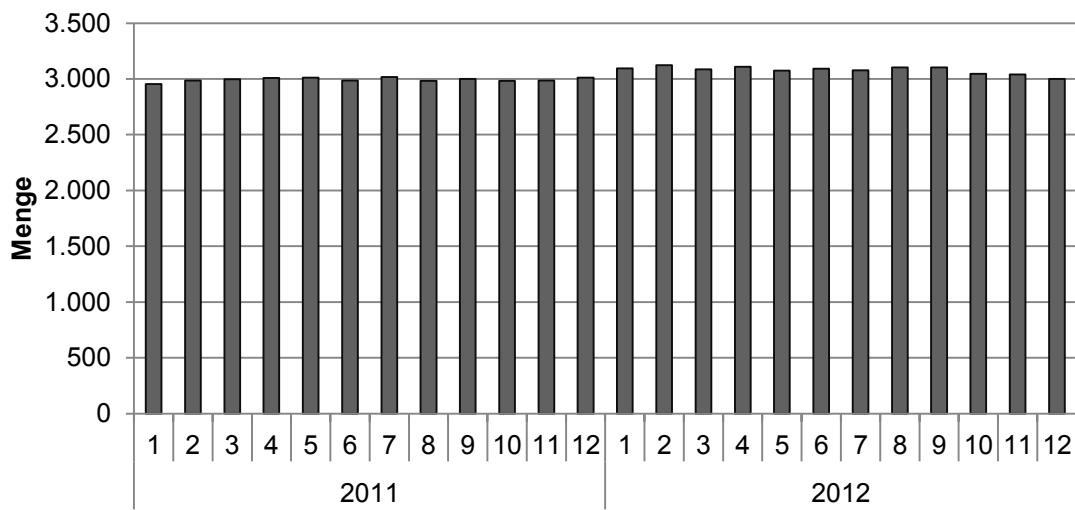


Abbildung 6.8 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 1 für 2 Jahre auf Monatsbasis

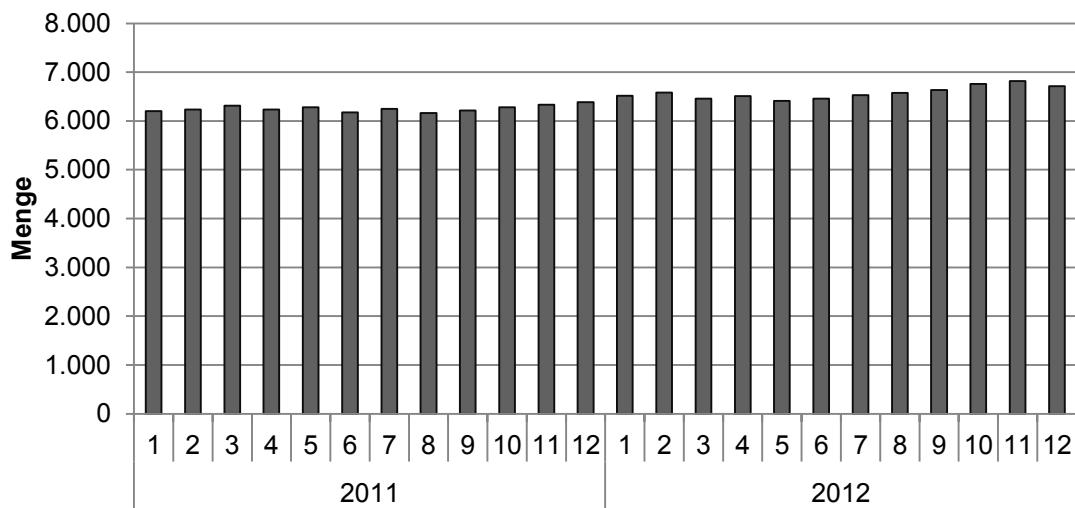


Abbildung 6.9 Bedarfsverlauf für Erzeugnisgruppe 2 für 2 Jahre auf Monatsbasis

Die Verteilung der Produktionsmengen auf die Produktionsstandorte erfolgt unter Berücksichtigung der jeweils verfügbaren Kapazitäten und der möglichen Kapazitätsanpassungen. Die hierfür zur Verfügung stehenden Kapazitätsstufen sind in Tabelle 6.3 exemplarisch für die Standorte B, D und den neuen Standort X für die Erzeugnisgruppen 1, 1K, 2 und 2K aufgelistet.

Standort	Kapazitätsstufe	Erzeugnisgruppe 1	Erzeugnisgruppe 1K	Erzeugnisgruppe 2	Erzeugnisgruppe 2K
B	0	0	0	0	0
	1	1.000	1.445	2.250	3.050
	2	2.000	2.990	4.500	6.100
	3	3.000	4.335	6.850	9.150
D	0	0	0	0	0
	1	235	220	220	280
	2	470	445	445	560
	3	700	670	670	840
X	0	0*	0*	0**	0**
	1	200*	160*	170**	222**
	2	400*	315*	340**	444**
	3	600*	470*	500**	666**

*ab April 2011

**ab Juli 2012

Tabelle 6.3 Kapazitätsstufen in Stück pro Monat

Für das hier zu lösende Optimierungsmodell ergibt sich insgesamt folgende Größenordnung:

- 3794 Erzeugnisse aus 28 Erzeugnisgruppen
- 1757 Aufträge
- 8 Standorte (derzeitige 7 Standorte und 1 neuer Standort)
- 24 Perioden (Monate)

6.2.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Optimierungsmodells für die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen je Knoten sollen hier exemplarisch anhand der Mengenzuordnung für die Erzeugnisgruppen 1 und 2 vorgestellt werden. Abbildung 6.10 zeigt die Verteilung der zu produzierenden Mengen auf die Standorte B, D und X für die Erzeugnisgruppe 1 unter Berücksichtigung der an den Standorten zur Verfügung stehenden Produktionsprozesse und Kapazitäten. Neben der Verteilung der Produktionsmengen auf die Standorte, zeigt die Abbildung den Anteil der zugeordneten Menge, der mit der zur Verfügung stehenden Kapazität produziert werden kann sowie den Anteil der diese Kapazität übersteigt. Die Schwankungen der produzierbaren Menge sind damit zu erklären, dass neben den Kapazitätsstufen für Erzeugnisgruppen auch Kapazitätsstufen für einzelne Erzeugnisse existieren. Diese können ebenfalls die produzierbare Menge beschränken.

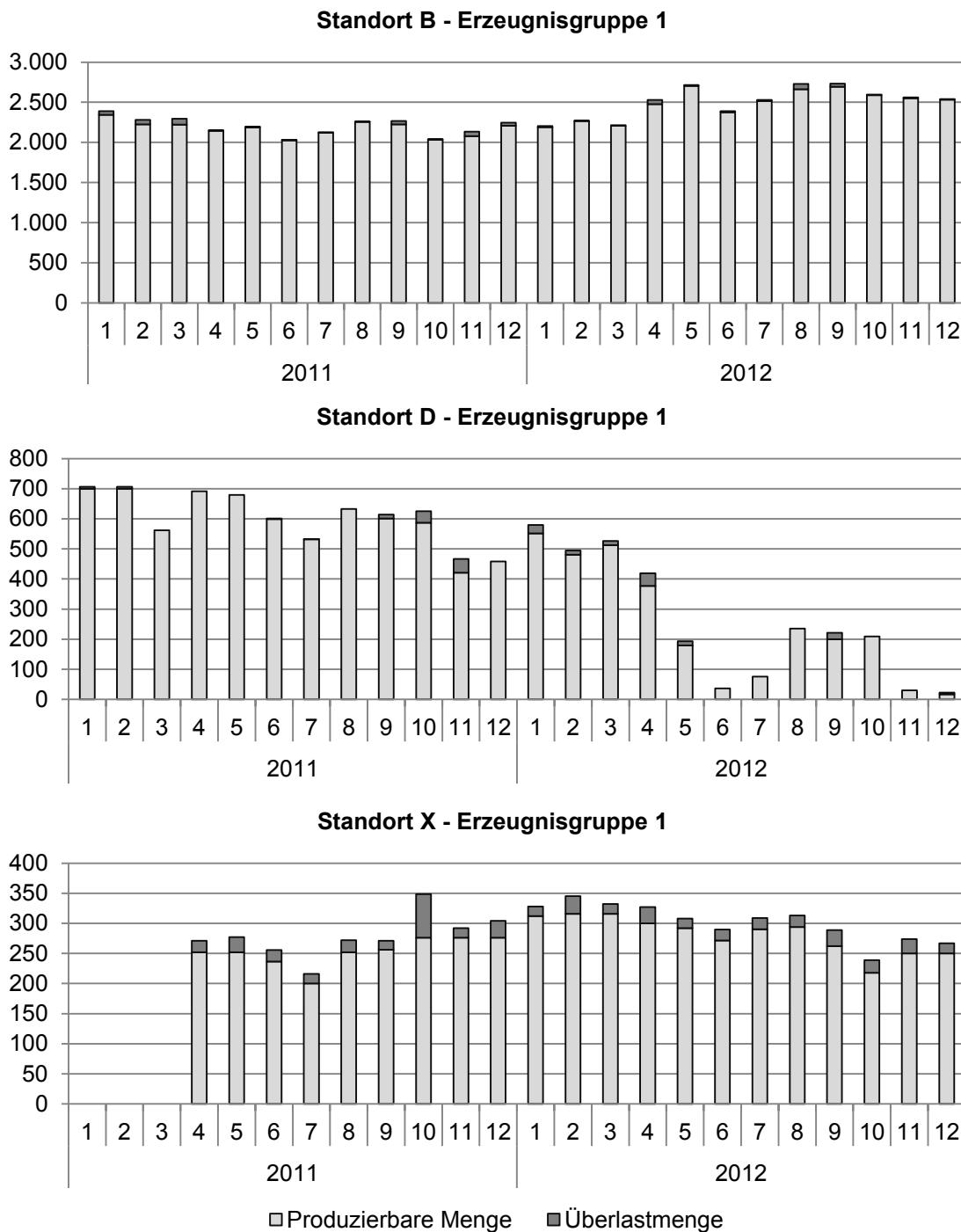


Abbildung 6.10 Mengenzuordnung für Erzeugnisgruppe 1

Abbildung 6.11 stellt die Verteilung der Produktionsmengen für die Erzeugnisgruppe 2 auf die Standorte B und X dar. Hier ist ab Juli 2012 aufgrund der am Standort X neu verfügbaren Produktionskapazitäten eine Verlagerung eines Teils der Produktionsmenge vom Standort B an den Standort X zu erkennen. Dies zeigt sich am Rückgang der

Produktionsmenge am Standort B bei gleichzeitigem Anstieg der Produktionsmenge am Standort X.

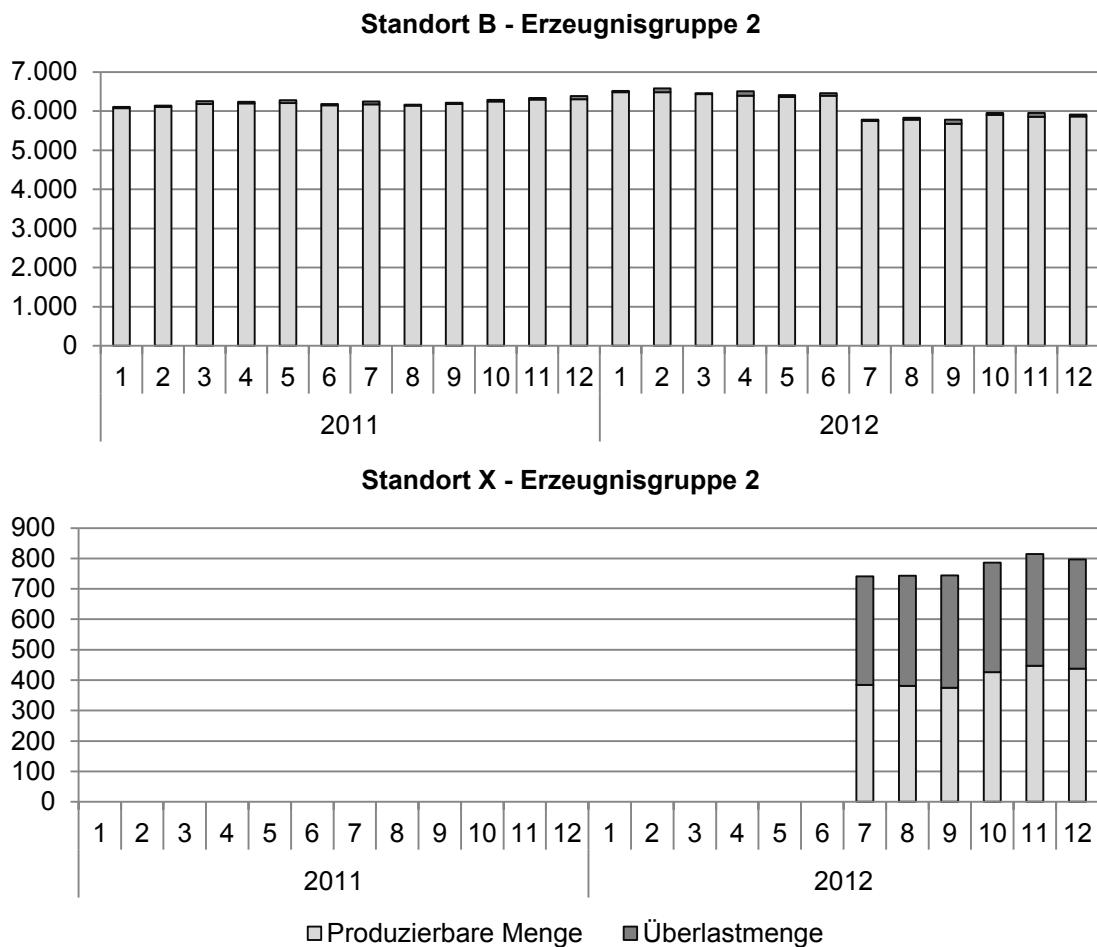


Abbildung 6.11 Mengenzuordnung für Erzeugnisgruppe 2

6.2.3 Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark

6.2.3.1 Ausgangssituation

Die Umsetzung der in 6.2.3 festgelegten quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark soll hier exemplarisch für den Standort B durchgeführt werden. An diesem Standort findet ein großer Teil der Produktion der Erzeugnisgruppen 1, 1K, 2 und 2K statt. Die Änderungen, die sich durch den neuen Standort im Produktionsnetzwerk ergeben, haben daher auch Auswirkungen auf den Standort B.

Am Standort B stehen 22 Maschinen für die spanende Bearbeitung, 3 Werkzeuge für die Werkstoffprüfung, 3 Auswuchtmaschinen, 3 Montagearbeitsplätze und 1 Verpackungstisch zur Verfügung. Bei der Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark ist eine optimale Ausnutzung der bestehenden Maschinenkapazitäten zu finden und mögliche Kapazitätsengpässe zu identifizieren. Gleichzeitig ist zu bestimmen, ob der bestehende Maschinenpark auch in dem geänderten Produktionsnetzwerk und der damit verbundenen Bedarfssituation unverändert bestehen bleiben kann oder ob Veränderungen notwendig sind. Unter Berücksichtigung der Planungsergebnisse der Ebene 2 ergibt sich für das Jahr 2011 die in Abbildung 6.12 dargestellte Bedarfssituation für den Standort B. Tabelle 6.4 gibt das durchschnittliche pro Woche verfügbare Kapazitätsangebot der am Standort B zur Verfügung stehenden Werkzeuge wider.

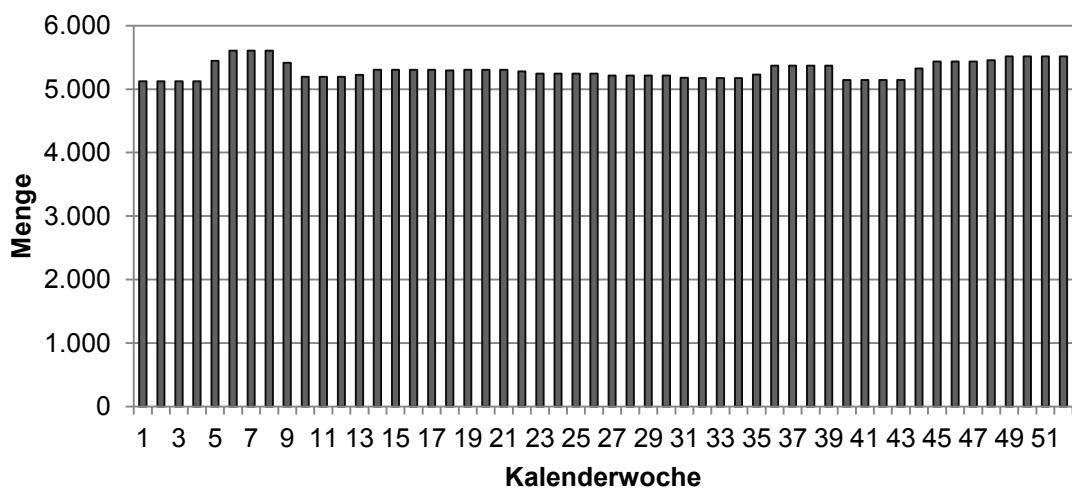


Abbildung 6.12 Primärbedarfe für den Standort B im Jahr 2011

Fertigungsbereich	Werkzeug-nummer	Bezeichnung	Kapazität [min/Woche]
Spanende Bearbeitung	1	Linear-Drehmaschine 1	7.458
	2	Linear-Drehmaschine 2	6.084
	3	CNC-Vertikal-Drehmaschine 1	7.020
	4	CNC-Vertikal-Drehmaschine 2	6.084
	5	CNC-Vertikal-Drehmaschine 3	19.542
	6	CNC-Vertikal-Drehmaschine 4	12.542
	7	CNC-Doppelspindel-Vertikal-Drehmaschine 1	7.862
	8	CNC-Doppelspindel-Vertikal-Drehmaschine 2	5.616
	9	CNC-Horizontal-Drehmaschine	6.084
	10	Bearbeitungszentrum 1	6.271
	11	Bearbeitungszentrum 2	6.271
	12	Bearbeitungszentrum 3	4.680
	13	Bearbeitungszentrum 4	6.552
	14	Bearbeitungszentrum 5	12.542
	15	Bearbeitungszentrum 6	12.542
	16	Bearbeitungszentrum 7	12.542
	17	Bearbeitungszentrum 8	12.542
	18	Innenrundschleifmaschine	12.168
	19	Fertigungsline	14.040
	20	Horizontal-Fräsmaschine	2.817
	21	Vertikal-Fräsmaschine	4.641
	22	Entgraten	2.652
Werkstoffprüfung	23	Rissprüfung 1	28.641
	24	Rissprüfung 2	22.375
	25	Ultraschallprüfung	22.375
Auswuchten	26	Auswuchtmaschine 1	4.641
	27	Auswuchtmaschine 2	11.321
	28	Auswuchtmaschine 3	9.435
Montage	29	Montage 1	6.084
	30	Montage 2	18.252
	31	Montage 3	18.252
Verpackung	32	Verpackungstisch	18.252

Tabelle 6.4 Kapazitätsangebot der verfügbaren Werkzeuge

Für einen Teil der zu produzierenden Erzeugnisse, ist es möglich sie auf verschiedenen Maschinen zu fertigen. Für diese Alternativen werden die unterschiedlichen Produktionszeiten angegeben.

onsprozesse als unterschiedliche Technologien abgebildet. Eine Übersicht über den Anteil der Erzeugnisse mit alternativen Technologien ist in Tabelle 6.5 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass für ein Drittel der Erzeugnisse mehr als eine Technologie vorhanden ist.

Anzahl Technologien	Anzahl Erzeugnisse	Anteil
1	286	0,66
2	64	0,15
3	45	0,10
4	20	0,05
5	15	0,03
6	4	0,01

Tabelle 6.5 Übersicht: Anteil Erzeugnisse mit alternativen Technologien

Größenordnung des betrachteten Modells:

- 434 Erzeugnisse
- Bis zu 6 unterschiedliche Technologien pro Erzeugnis
- 32 Werkzeuge
- 52 Perioden (Wochen)

6.2.3.2 Ergebnisse

Die Planungsergebnisse zeigen, dass der derzeit bestehende Maschinenpark noch ausreicht, um auch künftige Kapazitätsanforderungen zu erfüllen. Dies verdeutlicht die kumulierte Darstellung der Kapazitätsauslastung für das Jahr 2011 in Abbildung 6.13. Diese zeigt insbesondere im Bereich der spanenden Bearbeitung eine hohe Kapazitätsauslastung. Hier finden sich daher auch die Engpässe der Fertigung, jedoch fallen die Kapazitätsdefizite gering aus. Die Erhöhung der Produktionskapazitäten durch die Anschaffung neuer Maschinen ist daher vorerst nicht notwendig, zumal der neue Standort X entlastend auf die Bedarfssituation des Standortes B wirkt.

Abbildung 6.14 zeigt beispielhaft die Kapazitätsauslastung der Werkzeuge 4 und 14 über die ersten 26 Wochen des Jahres 2011. Während Werkzeug 4, eine CNC-Vertikal-Drehmaschine, fast durchgehend etwas überlastet ist und somit einen Engpass darstellt, ist das Werkzeug 14, ein Bearbeitungszentrum, fast durchgehend nicht ausgelastet. Hier sind also noch offene Produktionskapazitäten vorhanden.

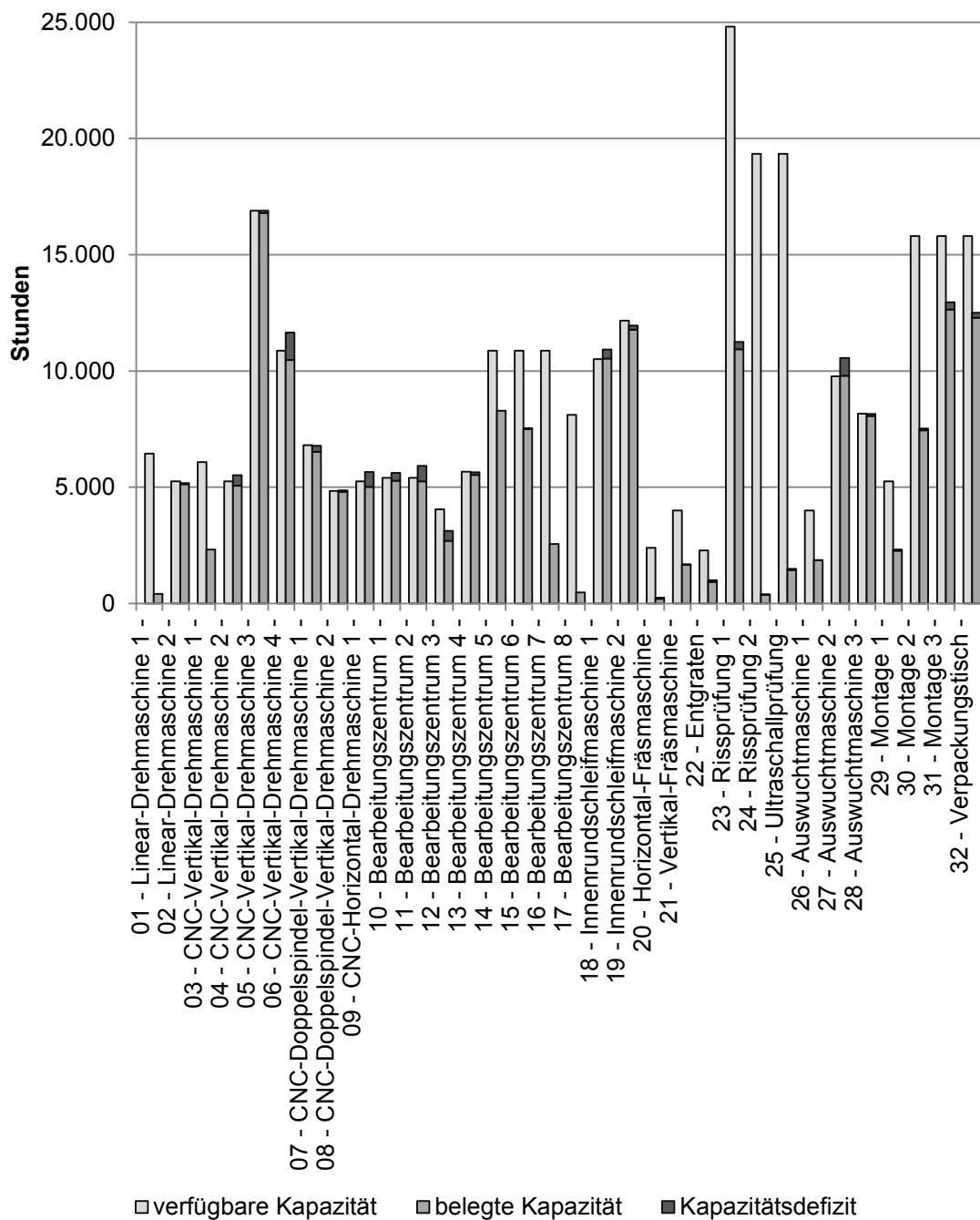


Abbildung 6.13 Kapazitätsauslastung der Werkzeuge – Kumulierte Darstellung für das Jahr 2011

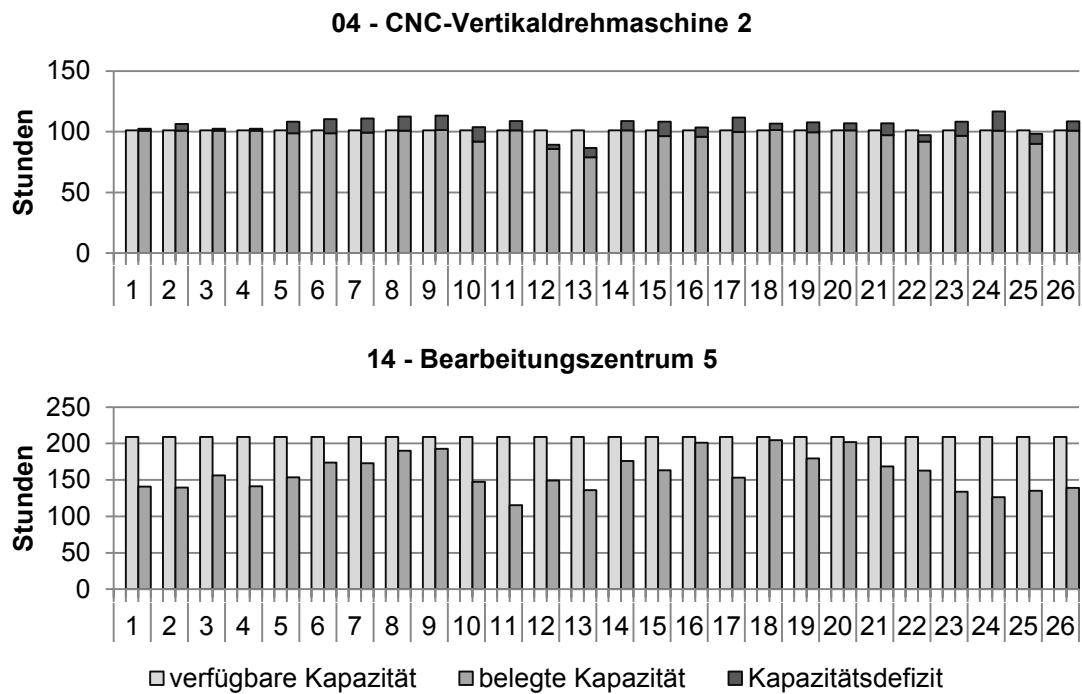


Abbildung 6.14 Kapazitätsauslastung der Werkzeuge 4 und 14 – Wochensicht für die Kalenderwochen 1 bis 26 des Jahres 2011

6.2.4 Umsetzung der quantitativen Kapazitätsanforderungen und des Maschinenparks in einem Personalbestand

6.2.4.1 Ausgangssituation

Für die am Standort B durchzuführenden Produktionsprozesse sind Mitarbeiter mit drei verschiedenen Qualifikationen notwendig:

- Hilfsarbeiten: Mitarbeiter mit dieser Qualifikation werden bei der Verpackung und der Materialversorgung der Maschinen und der Montagearbeitsplätze benötigt. Hierbei handelt es sich um recht einfache Arbeitsvorgänge, die von einem Mitarbeiter innerhalb von 20 Stunden erlernt werden können.
- Montagetätigkeiten: Diese Qualifikation wird an den Montagearbeitsplätzen benötigt. Zwischen den Arbeitsplätzen wird nicht unterschieden, da sich die Arbeitsinhalte stark ähneln. Die zu montierenden Teile weisen zudem eine relativ einfache Struktur auf. Daher ist in der Regel eine Einarbeitungszeit von nur 40 Stunden nötig, um diese Qualifikation zu erlernen.
- Maschinenbedienung: Für die Bedienung der Maschinen in der spanenden Bearbeitung, der Werkstoffprüfung und dem Auswuchten ist eine spezielle Ausbil-

dung notwendig. Mitarbeiter mit dieser Ausbildung sind in der Lage verschiedene Maschinen zu bedienen, daher wird hier nicht zwischen den verschiedenen Maschinen unterschieden. Da die notwendige Ausbildung ca. 3 Jahre dauert, wird die Möglichkeit, diese Qualifikation nachträglich zu erlernen, nicht berücksichtigt.

Derzeit werden 13 Mitarbeiter für Hilfsarbeiten, 13 Mitarbeiter für Montagetätigkeiten und 147 Mitarbeiter für die Maschinenbedienung beschäftigt. Es können bis zu 10 weitere Mitarbeiter für Hilfsarbeiten oder Montagetätigkeiten eingestellt werden. Diese müssten jedoch die entsprechende Qualifikation erst erlernen, da sie keine der beiden Qualifikationen aufweisen. Für die Maschinenbedienung können bis zu 9 weitere Mitarbeiter mit entsprechender Qualifikation eingestellt werden.

Nach Tarifvertrag gilt für alle Produktionsmitarbeiter eine Wochenarbeitszeit von 38 Stunden. Um Ausfallzeiten wie Urlaub oder Krankheit zu berücksichtigen wird bei der folgenden Betrachtung jedoch eine Nettoarbeitszeit von 32 Stunden pro Woche angenommen. Zusätzlich hierzu darf jeder Mitarbeiter bis zu 10 Überstunden pro Woche arbeiten. Jedoch fällt hierbei ein Überstundenzuschlag von 50% zum normalen Stundenlohn an.

Hieraus ergibt sich für das zu lösende Modell folgende Größenordnung:

- 434 Erzeugnisse
- 32 Werkzeuge
- 192 Mitarbeiter (173 bereits beschäftigt und 19 potentielle Neueinstellungen)
- 52 Perioden (Wochen)

6.2.4.2 Ergebnisse

Die mithilfe des Optimierungsmodells der Planungsebene 4 durchgeführte Planung hat ergeben, dass der bestehende Personalbestand für die Erfüllung der zukünftigen Kapazitätsbedarfe nicht ausreicht. Daher ist es erforderlich 8 weitere Maschinenbediener und 4 unqualifizierte Arbeiter, die die Hilfsarbeiten erlernen sollen, einzustellen. Zusätzlich sollen 2 Maschinenbediener sowie 2 Montagemitarbeiter die Hilfsarbeiten erlernen, damit sie im Bedarfsfall flexibel eingesetzt werden können, wodurch die Einstellung weiterer Hilfsarbeiter vermieden werden kann. Durch diese Veränderungen ergibt sich der in Tabelle 6.6 dargestellte optimale Personalbestand für den Standort B. Da der Kapazitätsbedarf am Standort B über die Zeit ziemlich konstant ist, sind in den späteren Perioden keine weiteren Personalanpassungen mehr notwendig.

Qualifikation(en)	Anzahl Mitarbeiter
Hilfsarbeiten	17
Montage	11
Maschinenbedienung	153
Montage und Hilfsarbeiten	2
Maschinenbedienung und Hilfsarbeiten	2

Tabelle 6.6 Optimaler Personalbestand für den Standort B

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende globale Verteilung der Produktion stellt die bestehenden Planungsprozesse international agierender Unternehmen vor große Herausforderungen. Aufgrund der zunehmenden Komplexität der unternehmensinternen Leistungserbringung rückt die Planung des unternehmensinternen Produktionsnetzwerks vermehrt in den Blickpunkt.

In Kooperation mit einem Unternehmen wurde ein hierarchisches Planungsverfahren, das den Anforderungen an die Planung einer global verteilten Produktion gerecht wird, entwickelt. Der hierbei entwickelte Vier-Ebenen-Ansatz für die Planung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke wird in dieser Arbeit vorgestellt. Dabei ist die Gesamtplanungsaufgabe die optimale Dimensionierung des aus den Standorten und ihren leistungswirtschaftlichen Beziehungen bestehenden Produktionsnetzwerks. Die Gesamtplanungsaufgabe wird anhand der zeitlichen Reichweite der Entscheidungen, des Planungsgegenstandes und der Entscheidungsebenen des Unternehmens in vier Teilaufgaben gegliedert.

Die identifizierten Teilaufgaben werden jeweils durch ihre Voreignisse, ihre Nachergebnisse und die zu realisierenden Formal- und Sachziele definiert. Des Weiteren werden die Anforderungen an die umzusetzenden Verfahren und an das Zusammenspiel der einzelnen Planungsebenen festgelegt. Die Umsetzung dieser Anforderungen erfolgt durch die formale Abbildung der Teilaufgaben als mathematische Optimierungsmodelle. Diese werden durch geeignete Koordinationsprozesse zu einem hierarchischen Gesamtprozess verbunden.

Auf der obersten Ebene der Hierarchie findet die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen statt, wodurch die langfristige Leistungsfähigkeit der einzelnen Standorte und des gesamten Produktionsnetzwerks bestimmt wird. Dies erfolgt durch die Zuordnung von Produktionsprozessen zu Standorten, womit für jeden Standort festgelegt wird, welche Erzeugnisse an diesem Standort produziert werden können. Die getroffene Zuordnung dient dann als Vorgabe für die untergeordnete Ebene, die Festlegung der quantitativen Kapazitätsanforderungen, und definiert den Rahmen für die hier zu treffenden Entscheidungen. Auf dieser Ebene besteht die Aufgabe darin ausgehend vom quantitativen Leistungsbedarf eine optimale Verteilung der Leistungserstellung auf die Standorte zu finden. Dabei erfolgt auch die quantitative Bestimmung der Flüsse im Netzwerk. Sind die quantitativen Kapazitätsanforderungen festgelegt, dienen sie wiederum als Vorgabe für die Planung der weiter untergeordneten Ebenen. Auf Ebene 3 er-

folgt die Umsetzung der Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark. Mit dem Ziel der kostengünstigen Bedarfserfüllung werden neben der optimalen Entwicklung des Maschinenbestandes auch Entscheidungen bezüglich der Fremdvergabe einzelner Produkte getroffen. Die hier geplanten Maschinenkapazitäten gehen zusammen mit den quantitativen Kapazitätsanforderungen als Vorgabe in die Ebene 4 ein und werden dort in einem Personalbestand umgesetzt. Der Einfluss der untergeordneten Ebenen auf die übergeordneten Ebenen erfolgt zum einen durch die Antizipation der unteren Ebenen bei der Planung der oberen Ebenen und zum anderen durch mögliche Rückkopplungen.

Dieses hierarchische Planungskonzept wurde in einem Softwareprototyp umgesetzt und anhand von Fallbeispielen aus der Praxis evaluiert. Der vorgestellte Prototyp bildet den Kern eines in der Praxis umzusetzenden Planungssystems. Für den praktischen Einsatz sind jedoch noch Erweiterungen der Software umzusetzen. Insbesondere ist eine benutzerfreundliche Bedienung des Planungssystems zu realisieren. Daher wurde bereits mit der Erstellung graphischer Bedienoberflächen begonnen. Diese sollen dem Planer eine einfache Bearbeitung der Eingabedaten, die Steuerung der Planung sowie die Auswertung der Planungsergebnisse ermöglichen. Bei weiteren Entwicklungen könnte zudem eine stärkere Integration des Planungssystems in die bestehende IT-Landschaft des Unternehmens, z. B. durch automatische Schnittstellen zum ERP-System, erfolgen.

Weiterentwicklungen wären auch im Bereich der erstellten Modelle möglich. Beispielsweise könnten die Modelle der Ebenen 1 und 2 um die Berücksichtigung weiterer internationaler Aspekte wie Steuern, Zölle oder Wechselkurse ergänzt werden. Erweiterungen sind auch zur Berücksichtigung investitionsrechnerischer Aspekte in den Zielfunktionen der Modelle denkbar. Hier wäre z. B. die Abzinsung der geplanten Auszahlungen auf ihren Barwert mit relativ wenig Anpassungsaufwand umsetzbar.

8 Literaturverzeichnis

- [Ant65] Anthony, Robert N.: *Planning and Control Systems : A Framework for Analysis*. Boston : Harvard University, 1965.
- [BKO08] Bihlmaier, Ralf ; Koberstein, Achim ; Obst, René: Modeling and optimizing of strategic and tactical production planning in the automotive industry under uncertainty. *OR Spectrum* (2008) , 31.
- [Bun08] Bundschuh, Markus Jens: *Modellgestützte strategische Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie*. Hamburg : Verlag Dr. Kovac, 2008.
- [Dan01] Dangelmaier, Wilhelm: *Fertigungsplanung: Aufbau und Ablauf der Fertigung*. Berlin : Springer, 2001.
- [Dan09] Dangelmaier, Wilhelm: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin : Springer, 2009.
- [DoSc05] Domschke, Wolfgang ; Scholl, Armin: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. 3. Auflage. Berlin : Springer, 2005.
- [Fer05] Ferber, Sonja: *Strategische Kapazitäts- und Investitionsplanung in der globalen Supply Chain eines Automobilherstellers*. Aachen : Shaker, 2005.
- [FS08] Ferstl, Otto K. ; Sinz, Elmar J.: *Grundlagen der Wirtschaftsinformatik*. 6. überarb. und erw. Auflage. München : Oldenbourg, 2008.
- [FMW08] Fleischmann, Bernhard ; Meyr, Herbert ; Wagner, Michael: Advanced Planning. In: Stadtler, Hartmut ; Kilger, Christoph (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. 4th Edition. Berlin : Springer, 2008.
- [FM03] Fleischmann, Bernhard ; Mayr, Herbert: Planning Hierarchy, Modelling and Advanced Planning. In: Graves, S.C. ; Kok, A.G. de: *Handbooks in Operations Research and Management Science*. s.l. : Elsevier B.V., 2003.
- [FFH06] Fleischmann, Bernhard ; Ferber, Sonja ; Henrich, Peter: Strategic Planning of BMW's Global Production Network. *Interfaces* (2006) , Bd. 3, 36.

- [Fri08] Friese, Markus: *Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie*. Garbsen : PZH, 2008.
- [GüTe05] Günther, Hans-Otto ; Tempelmeier, Horst: *Produktion und Logistik*. 6. Auflage. Berlin : Springer, 2005.
- [Hah96] Hahn, Dietger: Planung, strategische. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. 2. Auflage. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996.
- [HM75] Hax, A. C. ; Meal, H. C.: Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. *Studies in Management Sciences* (1975) .
- [Hen02] Henrich, Peter: *Strategische Gestaltung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie*. Aachen : Shaker, 2002.
- [Jor95] Jordan, William C. ; Graves, Stephen C.: Principles of the Benefit of Manufacturing Process Flexibility. *Management Science* (1995) , Bd. 41.
- [KaLü06] Kaphahn, Alexandra ; Lücke, Thorsten: Koordination interner Produktionsnetzwerke. In: Schuh, Günther (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung : Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3. Auflage. 2006.
- [Kau08] Kauder, Saskia: *Strategische Planung internationaler Produktionsnetzwerke in der Automobilindustrie*. Wien : Wirtschaftsuniversität Wien, 2008.
- [Kri05] Kriesel, Clemens: *Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung : Strategische Standort- und Produktionsplanung*. Paderborn : Heinrich-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, 2005.
- [LüLu03] Lücke, Thorsten ; Luczak, Holger: Production Planning and Control in a Multi-Site Environment : Holistic Planning Concepts for the internal Supply Chain. In: Luczak, Holger ; Zink, K. J. (Hrsg.): *Human Factors in Organizational Design and Management VII*. Santa Monica, CA, USA : IEA Press, 2003.
- [MWR08] Meyr, Herbert ; Wagner, Michael ; Rohde, Jens: Structure of Advanced Planning Systems. In: Stadtler, Hartmut ; Kilger, Christoph (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. 4th Edition. Berlin : Springer, 2008.

- [Pau89] Pausenberger, Ehrenfried: Zur Systematik von Unternehmenszusammenschlüssen. *WISU* (1989), 11, S. 621-626.
- [ReRo08] Reuter, Boris ; Rohde, Jens: Coordination and Integration. In: Stadtler, Hartmut ; Kilger, Christoph (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. 4th Edition. Berlin : Springer, 2008.
- [Rie79] Rieper, Bernd: *Hierarchische betriebliche Systeme, Beiträge zur industriellen Unternehmensforschung*. Bd. 8. Wiesbaden : Gabler, 1979.
- [Ros92] Rosenberg, Otto: *Potentialfaktorwirtschaft*. Paderborn : Universität Paderborn, 1992. Skript zur Vorlesung.
- [Sch03] Schneeweiss, Christoph: *Distributed Decision Making*. Berlin Heidelberg New York : Springer, 2003.
- [Sch01] Scholl, Armin: *Robuste Planung und Optimierung*. Heidelberg : Physica-Verlag, 2001. 3-7908-1408-3.
- [Sta96] Stadtler, Hartmut: Hierarchische Produktionsplanung. In: Kern, Werner ; Schröder, Hans-Horst ; Weber, Jürgen: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. 2. Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1996, S. 631-641.
- [Sta88] Stadtler, Hartmut: *Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung*. Heidelberg : Physica-Verlag, 1988.
- [Sta08] Stadtler, Hartmut: Production Planning and Scheduling. In: Stadtler, Hartmut ; Kilger, Christoph (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. 4th Edition. Berlin : Springer, 2008.
- [Ste07] Steven, Marion: *Handbuch Produktion: Theorie- Management- Logistik- Controlling*. Stuttgart : Kohlhammer, 2007.
- [Ste94] Steven, Marion: *Hierarchische Produktionsplanung*. 2. Auflage. Heidelberg : Physica-Verlag, 1994.
- [Tem06] Tempelmeier, Horst: *Material-Logistik : Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen*. 6. Auflage. Berlin : Springer, 2006.

- [Tim09] Timm, Thorsten: *Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen*. Paderborn : Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, 2009.
- [Ton07] Tonigold, Christian: *Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten*. Paderborn : Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, 2007.