

Jochen Deuse (Hrsg.)

Yvonne Finke

Sachbericht IGF-Forschungsvorhaben (Fördernr. 15697 N/1)

Kostenoptimale Produktions- und Bevorratungsstrategie nach End of Production (EOP)

Ein aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



gefördertes Forschungsvorhaben

IGF-Forschungsvorhaben 15697 N/1

Forschungsthema

Kostenoptimale Produktions- und Bevorratungsstrategie nach End of Production (EOP)

Durchführende Forschungsstelle

Forschungsstelle

Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme
Leonhard-Euler-Straße 5
44227 Dortmund

Leiter der Forschungsstelle

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Projektleiterin

Dipl.-Wirt.-Ing. Yvonne Finke

Förderhinweis

Das IGF-Forschungsvorhaben „Kostenoptimale Produktions- und Bevorratungsstrategie nach End of Production (EOP)“ (Förder-Nr.: 15697 N/1) ist im Zeitraum vom 01.09.2008 bis zum 31.01.2010 aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BmWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen »Otto von Guericke« e. V. (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL) gefördert worden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Problemstellung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Begriffsdefinitionen und Systemverständnis.....	3
2.2 Planung der Nachserienversorgung	8
2.2.1 Herausforderungen bei der Sicherstellung der Nachserienversorgung	8
2.2.2 Versorgungsstrategien und Versorgungsszenarien	16
2.2.3 Bestehende Konzepte und Ansätze zur Planung der Nachserienversorgung	19
3 Empirische Erhebung zur Nachserienversorgung in der Industrie.....	27
3.1 Ziel der Erhebung	27
3.2 Allgemeine Daten und Struktur der Erhebung.....	27
3.3 Auswertung der Erhebung	28
3.3.1 Allgemeine Unternehmensdaten (Teil A).....	28
3.3.2 Klassifizierung der laufenden Produktion (Teil B).....	29
3.3.3 Konzepte der Ersatzteilversorgung (Teil C).....	30
3.3.4 Interne Nachfertigung von Ersatzteilen (Teil D).....	33
3.3.5 Planung der Nachserienversorgung (Teil E)	34
3.4 Zusammenfassung	35
4 Planung der Nachserienversorgung.....	36
4.1 Kontextvariablen bei der Planung.....	40
4.1.1 Definition relevanter produktbezogener Merkmale.....	40
4.1.2 Definition relevanter prozessbezogener Merkmale	42
4.2 Designvariablen	46
5 Modellentwicklung.....	49
5.1 Anforderungen	49
5.2 Einführung in die Losgrößenplanung.....	50
5.3 Modellauswahl und Adaption für den Kontext der Nachserienversorgung.....	60
5.3.1 Formulierung des Modells	61

5.3.2	Produktspezifische Anforderungen.....	67
5.3.3	Entscheidungsrelevante Kosten im Kontext der Nachserienversorgung	68
5.4	Zusammenfassung	75
6	Modellimplementierung	77
6.1	Möglichkeiten zur Lösung des Modells.....	77
6.2	Spezifische Anforderungen an Software-Lösungen	78
6.2.1	Software-Alternativen	79
6.2.2	Wahl einer Software-Alternative	81
6.3	Implementierung des Modells als MS-Excel-basiertes Werkzeug.....	82
7	Validierung	85
7.1	Prototypische Erstanwendung	85
7.1.1	Aufbereitung der erforderlichen Unternehmensdaten	86
7.1.2	Unternehmensspezifische Auslegung des Modells und Optimierung mit Hilfe des MS-Excel-basierten Werkzeugs	87
7.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	91
8	Zusammenfassung	97
9	Anhang A	99
9.1	Fragebogen zur empirischen Erhebung	99
9.2	Auswertung der empirischen Erhebung.....	106
10	Literaturverzeichnis.....	116

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Aufbau der Ausarbeitung.....	2
Abbildung 2-1	Phasen der Ersatzteilversorgung (in Anlehnung an Bothe 2003, S. 27f.).....	5
Abbildung 2-2	Gründe steigender Komplexität in der Nachserienversorgung (nach Voss 2006, S. 8).....	8
Abbildung 2-3	Unterschiede zwischen Serien- und Nachserienphase (vgl. Dombrowski, Weckenborg 2009, S. 955).....	9
Abbildung 2-4	Bedarfsverlauf gemäß Ersatzteiltyp (vgl. Dombrowski, Bothe 2001).....	10
Abbildung 2-5	Zur Prognose von Ersatzteilbedarfen zu berücksichtigende Aspekte (s. Pfohl 2010, S. 216).....	11
Abbildung 2-6	Versorgungsstrategien zur Sicherstellung der Nachserienversorgung (vgl. Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b und Bothe 2003).....	16
Abbildung 2-7	Planungsprozess für die Nachserienversorgung mit elektronischen Komponenten (in Anlehnung an Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b, S. 199)	20
Abbildung 2-8	Vordefiniertes Versorgungsszenario (s. Dombrowski, Bothe 2001).....	20
Abbildung 2-9	Ansatz zur systematischen Auswahl und Anpassung von Strategien zur Deckung von Ersatzteilbedarfen (in Anlehnung an Knigge, Rosentritt 2009)	21
Abbildung 3-1	Unternehmens- und Zielbranche (n=76; a _{Branche} =76; a _{Zielbranche} =215).....	28
Abbildung 3-2	Kombination aus Fertigungsart und -prinzip (n=76).....	30
Abbildung 3-3	Zeithorizonte und Gründe für die Ersatzteilversorgung (n=64; a _{kurzfristig} =60; a _{langfristig} =122).....	31
Abbildung 3-4	Anteil der Normstrategien zur Ersatzteilversorgung in der Industrie (n=64; a=208).....	31
Abbildung 3-5	Kombinationen von ETV-Strategien (n=64; a=64)	32
Abbildung 3-6	Kombinationskriterien bezogen auf die ETV-Strategien (n=64; a _{VS} =208; a _{Kriterien} =70).....	32
Abbildung 3-7	Produktionsstrategien innerhalb der internen Nachfertigung (n=53; a=77)	33
Abbildung 3-8	Bewertungskriterien zur Planung von Versorgungskonzepten in der Nachserie (n=53; a=116).....	34
Abbildung 4-1	Planung der Nachserienversorgung unter Berücksichtigung von Produktions- und Bevorratungsstrategien (in Anlehnung an Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b ; Knigge, Rosentritt 2009).....	36

Abbildung 4-2	Gozintographen einer seriellen, konvergierenden, divergierenden und allgemeinen Erzeugnisstruktur (vgl. Rossi 2003, S. 46; Tempelmeier 2006, S. 103ff.).....	37
Abbildung 4-3	Verständnis von Produktionsstufen im Kontext der Ausarbeitung	38
Abbildung 4-4	Versorgungsszenarien unter Berücksichtigung von Produktions- und Bevorratungsstrategien (gemäß Dombrowski, Schulze 2008a).....	39
Abbildung 4-5	Zuteilung einzelner Wertschöpfungsprozesse/Produktionsstufen zu Ressourcen	44
Abbildung 4-6	Schematische Darstellung des Bestandes bei Fertigung eines Serienabschlussloses und bei Bedarfsfertigung	47
Abbildung 4-7	Schematische Darstellung des Bestandes bei Losgrößenbildung hinsichtlich verschiedener Optimierungsgrößen	47
Abbildung 4-8	Schematischer Bestandsverlauf bei simultaner Optimierung der Designvariablen.....	48
Abbildung 5-1	Übersicht zu Verfahren der Losgrößenbestimmung (s. Meers, Richter, Nickel 2009, S. 51)	50
Abbildung 5-2	Klassische Losgrößenberechnung nach Andler/Harris (vgl. Domschke, Scholl 2005, S. 135)	51
Abbildung 5-3	Abgrenzung unterschiedlicher Kostenbegriffe (in Anlehnung an Plinke, Rese 2006, S. 37).....	54
Abbildung 5-4	Problematiken produktionsstufenübergreifender Losgrößenplanung	60
Abbildung 5-5	Nutzung beschränkter Ressourcenkapazität in der Nachserienfertigung	65
Abbildung 5-6	Berücksichtigung kritischer Lagerfähigkeit bei der Losgrößenplanung.....	67
Abbildung 5-7	Modell zur kostenoptimalen Planung und Steuerung der Nachserienversorgung	75
Abbildung 6-1	Vorgehensweise zur Implementierung des Modells.....	82
Abbildung 6-2	Abbildung der Lagerbilanzgleichungen in MS-Excel (Auszug)	83
Abbildung 7-1	Kontext der Planung der Ersatzteilversorgung im Rahmen der prototypischen Erstanwendung	85
Abbildung 7-2	Prognostizierter Bedarfsverlauf für ABS-Sensor	88
Abbildung 7-3	Produkt- und Prozessspezifische Eingabegrößen	88
Abbildung 7-4	Dokumentation und Statusbericht der Optimierung	89
Abbildung 7-5	Lagerbestand y_{kt} , Losgröße q_{kt} und resultierende Gesamtkosten K_{ges} nach Optimierung	90
Abbildung 7-6	Aus Produkt- und Prozessstruktur abgeleitete Produktionskoeffizientenmatrix a_{ki}	91
Abbildung 7-7	Zuweisung der in den Produktionsstufen auszuführenden Prozesse zu den Ressourcen J.....	92

Abbildung 7-8	Produkt- und prozessspezifische Eingabegrößen für Szenario 1	93
Abbildung 7-9	Produkt- und prozessspezifische Eingabegrößen für Szenario 2	93
Abbildung 7-10	Lagerbestand y_{kt} , Losgröße q_{kt} und resultierende Gesamtkosten K_{ges} nach Optimierung (Szenario 1)	94
Abbildung 7-11	Lagerbestand y_{kt} , Losgröße q_{kt} und resultierende Gesamtkosten K_{ges} nach Optimierung (Szenario 2)	95
Abbildung 9-1	Nennung der Unternehmensbranche (n=76; a=76)	106
Abbildung 9-2	Mitarbeiterzahl der Unternehmen (n=76; a=76)	106
Abbildung 9-3	Jahresumsatz der Unternehmen (n=76; a=76)	107
Abbildung 9-4	Zielbranchen der Unternehmen (n=76; a=215).....	107
Abbildung 9-5	Produktstruktur der Unternehmen nach Komplexitätsgrad (n=76; a=99)...	108
Abbildung 9-6	Fertigungsarten der Unternehmen in der Produktion (n=76; a=105)	108
Abbildung 9-7	Fertigungsprinzipien der Unternehmen in der Produktion (n=76; a=113)..	109
Abbildung 9-8	Ersatzteilversorgung der Unternehmen für Produktstrukturen (n=76; a=122)	109
Abbildung 9-9	Zeitraum der Ersatzteilversorgung durch die Unternehmen (n=64; a=95).	110
Abbildung 9-10	Gründe der Ersatzteilversorgung durch die Unternehmen (n=64; a=162).	110
Abbildung 9-11	Verwendung der Normstrategie zur Ersatzteilversorgung durch die Unternehmen (n=64; a=208).....	111
Abbildung 9-12	Von den Unternehmen genutzte Kombinationskriterien zur Versorgungs- Szenarienbildung (n=64; a=126).....	111
Abbildung 9-13	Produktstrukturen für die von den Unternehmen eine Strategiekombination vorgenommen wird (n=64; a=86)	112
Abbildung 9-14	Umsetzung der internen Nachfertigung durch die Unternehmen (n=53; a=77)	112
Abbildung 9-15	Kombinationsansätze der Unternehmen für Produktionsstrategien (n=53; a=96)	113
Abbildung 9-16	Erzeugnisstrukturen für die die Unternehmen Produktionsstrategien kombinieren (n=53; a=64)	113
Abbildung 9-17	Aussage der Unternehmen zum Potenzial des Stufenkonzeptes (n=53) ..	114
Abbildung 9-18	Aussage über das Bestehen von Bewertungskonzepten von Nachserienversorgung in den Unternehmen (n=53).....	114
Abbildung 9-19	Interesse der Unternehmen an neuen Bewertungskonzepten der Nachserienversorgung (n=53).....	115
Abbildung 9-20	Bewertungskriterien der Unternehmen bei der Strategiewahl in der Nachserienproduktion (n=53; a=116).....	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Aufbau der empirischen Erhebung	27
Tabelle 4-1	Strategiebeeinflussende Produkteigenschaften	41
Tabelle 4-2	Alternative Möglichkeiten zur Integration von Ersatzteilbedarfen in die laufende Produktion.....	43
Tabelle 4-3	Strategiebeeinflussende Prozesseigenschaften.....	45
Tabelle 5-1	Kostenfaktoren des Maschinenstundensatzes (in Anlehnung an Westkämper 2006, S. 96).....	57
Tabelle 5-2	Ausprägung der entscheidungsrelevanten Kostenfaktoren bei alternativer Integration in die laufende Fertigung	74
Tabelle 6-1	Tabellarischer Vergleich alternativer Software-Lösungen.....	80
Tabelle 7-1	Ermittlung der variablen Produktionskosten	86
Tabelle 7-2	Ermittlung des Rüstkostensatzes	87
Tabelle 7-3	Variable Produktionskosten von (Zwischen-) Produkt k in Periode 1 p_{k1}	92

Abkürzungsverzeichnis

a_{ki}	Produktionskoeffizient bezüglich des aus Produktionsstufe k und des aus Produktionsstufe i resultierenden (Zwischen-)Produkte
b_{jt}	Verfügbare Kapazität der Ressource j in Periode t
β_{kt}	Binäre Rüstvariable
d_{kt}	Primärbedarf für (Zwischen-)Produkt k in Periode t
EDO	End of Delivery Obligation (Ende der Lieferverpflichtung)
EK	Einzelkosten
EOL	End of Life (Ende des Lebenszyklus)
EOP	End of Production (Ende der Serienfertigung/Serienauslauf)
EOS	End of Service (Ende der Ersatzteilversorgung)
ET	Ersatzteil
ETM	Ersatzteilmanagement
ETV	Ersatzteilversorgung
ETW	Ersatzteilwesen
FGK	Fertigungsgemeinkosten
FGKR	Restfertigungsgemeinkosten
FK	Fertigungskosten
FLK	Fertigungslohnkosten
GK	Gemeinkosten
HK	Herstellkosten
i	Kalkulatorischer Zinssatz
J	Anzahl der Ressourcen ($j = 1, 2, \dots, J$)
K	Anzahl der Produktionsstufen bzw. der aus den Produktionsstufen resultierenden (Zwischen-)Produkte ($k = 1, 2, \dots, K$)
K_A	Kosten durch kalkulatorische Abschreibungen
K_E	Energiekosten
K_I	Instandhaltungskosten
K_j	Indexmenge der Produktionsstufen und entsprechend inbegriffener Prozesse, die durch Ressource j vollzogen werden
k_l	Kosten der Lagerhaltung

K_M	Maschinenkosten
K_{MH}	Maschinenstundensatz
K_n	Maschine direkt zurechenbare Kosten
K_R	Raumkosten
K_Z	Kosten durch kalkulatorische Zinsen
l_k	Lagerkostensatz des (Zwischen-)Produktes k
LK	Lagerkosten
LP	Lineares Programm
L_w	Lagerwert
M	hinreichend große natürliche Zahl
MEK	Materialeinzelkosten
MGK	Materialgemeinkosten
MK	Materialkosten
MLCLSP	Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem (Kapazitiertes mehrstufiges Mehrprodukt-Losgrößenproblem)
MIP	Mixed Integer Program (Gemischt ganzzahliges Programm)
MRP	Material Requirements Planning (Materialbedarfsplanung)
N_k	Indexmenge der Nachfolger des Produktes k (direkt übergeordnete Produkte bzw. nachfolgende Arbeitsgänge)
NSV	Nachserienversorgung
OE	Original Equipment (Originalteile)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster/Originalhersteller)
OL	Optimallösung
p_{kt}	Ressourcenspezifische variable Produktionskosten des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-)Produktes in Periode t
y_{kt}	Lagerbestand an dem aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-)Produkt am Ende der Periode t
q_{kt}	Losgröße des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-)Produktes in Periode t
r_k	Ressourcenspezifischer Rüstkostensatz für (Zwischen-)Produkt k
SEK	Sondereinzelkosten der Fertigung
SOP	Start of Production, Serienstart

t_{Abk}	Zeitpunkt der Abkündigung von (Zwischen-)Produkt k
t_b	Belegungszeit
t_e	Stückbearbeitungszeit
t_{ek}	Stückbearbeitungszeit der in Produktionsstufe k auszuführenden Prozesse
Tier 1	Zulieferer auf der ersten Zulieferstufe in der Wertschöpfungskette
T	Länge des Planungszeitraums in Perioden ($t = 1, 2, \dots, T$)
t_{kmax}	Maximale Lagerfähigkeit des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-) Produktes
T_N	Nutzungszeit einer Fertigungseinrichtung
tr_k	Rüstzeit für Produktionsstufe k
VS	Versorgungsstrategie
VSz	Versorgungsszenario
wy	Wertmaßstab für eine Lagereinheit
x_{opt}	optimale Losgröße

1 Problemstellung

Zunehmender Konkurrenzdruck und Globalisierung veranlassen Unternehmen zur Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit die Produktivität und Flexibilität weiter zu erhöhen, um entsprechend schnell und effektiv Kundenwünschen zu entgegnen. Dies erfordert produktiv gestaltete Prozesse entlang des gesamten Wertstroms und eine konsequente Kundenorientierung (Dombrowski, Wrehde, Schulze 2007). In diesem Kontext kommt der Sicherung der Nachserienversorgung sowohl auf Basis bestehender Nachlieferverpflichtungen als auch in Bezug auf die Kundenbindung eine zentrale Bedeutung zu. Zudem trägt der Verkauf von Ersatzteilen nach Auslaufen der umsatzstarken Serienproduktion (End of Production) zum Unternehmensergebnis bei. Das bedeutende Potenzial einer adäquat gestalteten Nachserienversorgung zur Steigerung des Unternehmensergebnisses und somit der Wettbewerbsfähigkeit ist zu nutzen und durch eine entsprechend wirtschaftliche Planung der Ersatzteilversorgung (ETM) zu realisieren.

In der Literatur werden zur Sicherung der Nachserienversorgung verschiedene Normstrategien diskutiert. Vorrangig sind in diesem Zusammenhang die Nachfertigung (intern/extern), die Nutzung abwärtskompatibler Teile der Serie sowie die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altteilen und deren Kombination zu Versorgungsszenarien zu nennen. Jede dieser Strategien ist durch spezifische Herausforderungen gekennzeichnet. Bei der Altteilwiederverwendung besteht bspw. das Problem einer adäquaten Rückführung der Altteile und einer entsprechend großen Rückläuferzahl, um die gegebene Ersatzteilnachfrage zu bedienen.

Für die Nachserienproduktion ist es entscheidend, inwieweit es dem Unternehmen gelingt, die Strategie zur Absicherung der Lieferfähigkeit nach End of Production (EOP) optimal an die spezifischen Randbedingungen des Produktes sowie der Produktion anzupassen. Im Gegensatz zur Serienproduktion sind die Produktionsbedingungen in der Nachserienphase oftmals nicht optimal an die Randbedingungen der Nachserienfertigung angepasst. Durch zahlreiche weitere Herausforderungen in der Nachserienproduktion, wie sinkende Stückzahlen nach End of Production (Dombrowski 2004), die Verfügbarkeit von Fertigungseinrichtungen und von Bauteilen (Dombrowski, Lechnitz 2008) sowie die Bereitstellung der zur Bedienung der eingesetzten Fertigungseinrichtungen erforderlichen Mitarbeiterqualifikation (Bothe 2003), sind speziell in Bezug auf die entstehenden Kosten verschärfte Bedingungen gegeben. Auf der einen Seite sind steigende Rüst- sowie Inbetriebnahmekosten pro Stück zu erwarten. Auf der anderen Seite steigt bei der Produktion in größeren Losgrößen die Verweildauer der Produkte im Lager, wodurch steigende Lager- und Kapitalbindungskosten entstehen.

Um insbesondere kleinen und mittelständigen Unternehmen die Möglichkeit zu geben, auf dargestellte Schwierigkeiten angemessen zu reagieren, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Ansatz zur Planung der Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase entwickelt. Die Zielsetzung dieser Planung besteht in der Generierung **kostenoptimaler Produktions- und Bevorratungsstrategien**, wobei zentrale Anforderungen in der Berücksichtigung von Produktionsstufen, der Option zur Integration von Ersatzteilbedarfen in eine laufende mehrstufige Produktion ähnlicher Produkte und einer optimalen Anpassung der definierten Strategien

an die spezifischen Randbedingungen des Produktes sowie der laufenden Produktion zu sehen sind. In diesem Zusammenhang wird die Optimierung von Fertigungszeitpunkt und Losgröße je Produktionsstufe gemäß induzierter Produktions- und Logistikkosten angestrebt, die in einem Kostenmodell (MS-Excel-basiertes Werkzeug) abgebildet werden sollen. Durch die Möglichkeit zur rollierenden Planung der Prozesse sollen Unternehmen befähigt werden, die bestimmten Produktions- und Bevorratungsstrategien dynamisch an die gegebenen Produktionsbedingungen und weiterhin sich ändernder Eingangsgrößen anzupassen.

Die Erarbeitung der dargestellten Zielsetzungen erfolgt in zwei Abschnitten. Zunächst wird theoretisch eine Planungssystematik erarbeitet, die den oben dargestellten Anforderungen genügt. Anschließend wird die theoretisch ausformulierte Planungssystematik mathematisch modelliert und in einem quantitativen MS-Excel-basierten Planungswerkzeug umgesetzt.

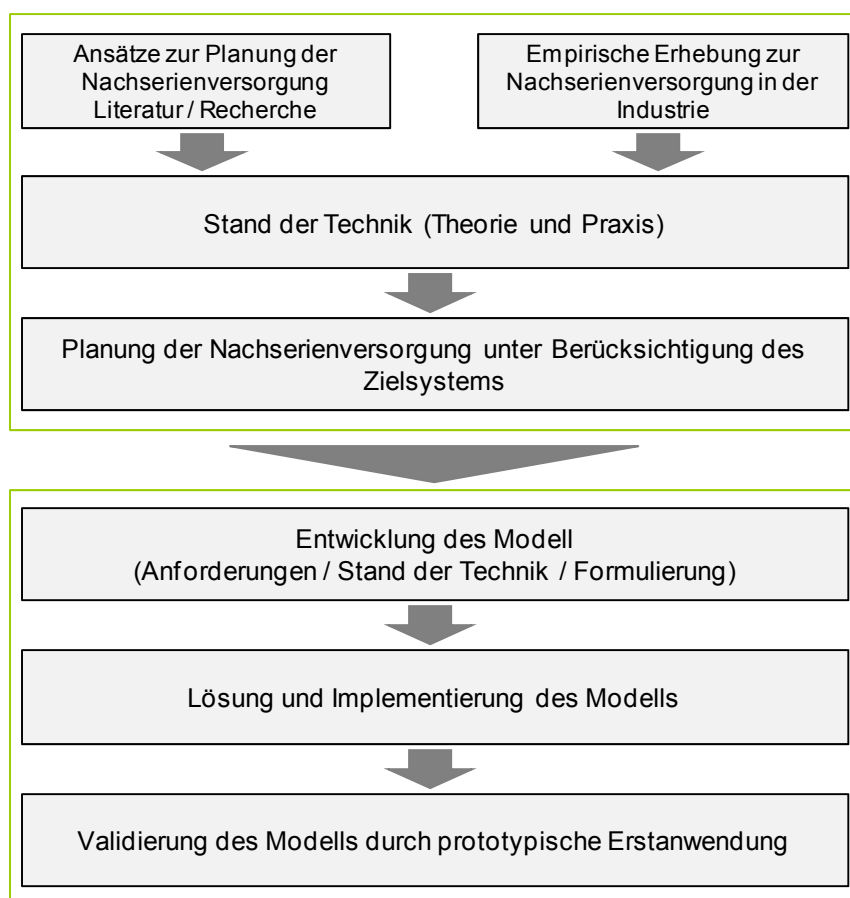


Abbildung 1-1 Aufbau der Ausarbeitung

Zur theoretischen Formulierung einer derartigen Planungssystematik wird zunächst der Stand der Technik erarbeitet. Zum einen werden hier auf Basis einer umfassenden Recherche das Ersatzteilmanagement und speziell Ansätze zur Planung der Nachserienversorgung analysiert (s. Kapitel 2). Zum anderen werden die durch die Recherche gewonnen Erkenntnisse durch eine empirische Erhebung zur Nachserienversorgung in der Industrie vertieft (s. Kapitel 3). Die gewonnenen Erkenntnisse werden in die Erarbeitung der Planungssystematik einbezogen (s. Kapitel 4). Hierauf aufbauend wird das Modell unter Berücksichtigung der Anforderungen, des Stand der Technik modelliert (s. Kapitel 5), implementiert (s. Kapitel 6) und validiert (s. Kapitel 7).

2 Stand der Technik

In den nachstehenden Abschnitten werden maßgebliche Begriffe im Kontext eines umfassenden Ersatzteilmanagements definiert (Unterkapitel 2.1). Anschließend steht die Nachserienversorgung im Fokus der Betrachtung/Analyse, wobei Herausforderungen und Wege zur Sicherstellung der Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase aufgezeigt und bestehende Konzepte zur Planung erläutert werden.

2.1 Begriffsdefinitionen und Systemverständnis

Vor einer weitreichenden Modellbildung zur Bestimmung von Produktions- und Bevorratungsstrategien werden die in dieser Ausarbeitung verwendeten Begrifflichkeiten voneinander abgegrenzt. In Anlehnung an zentrale Arbeiten im Kontext der Ersatzteilversorgung, wie bspw. von Dombrowski (Dombrowski, Bothe 2001, Dombrowski, Bothe 2002, Dombrowski, Bothe 2003; Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005a, Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b), Bothe (Bothe 2003), Hagen (Hagen 2003), Biedermann (Biedermann 2008) etc. und DIN Normen (Deutsches Institut für Normung 01.09.1976) werden maßgebliche Zusammenhänge erläutert und gemäß dem Verständnis dieser Arbeit festgelegt.

Ersatzteile werden allgemein definiert als „Teile (z. B. auch Einzelteile genannt), Gruppen (z. B. auch Baugruppen und Teilegruppen genannt) oder vollständige Erzeugnisse, die dazu bestimmt sind, beschädigte, verschlissene oder fehlende Teile, Gruppen oder Erzeugnisse zu ersetzen.“ (Deutsches Institut für Normung 01.09.1976). Gemäß dieser Definition sind Ersatzteile austauschbare Komponenten eines aus mehreren Komponenten bestehenden technischen Systems, welches als Primärprodukt bezeichnet wird. Ziel des Austausches ist die Wahrung der Funktionstüchtigkeit des Primärproduktes im Sinne des ursprünglichen Funktionsumfangs (Ihde, Merkel, Henning 1999, S. 1).

In der deutschen Normung werden Ersatzteile gemäß DIN 31051 zudem in Kleinteile, Verbrauchsteile und Reserveteile differenziert (Deutsches Institut für Normung 06.2003). Diese Unterscheidung basiert zum einen auf dem Grad zur Eignung für eine wirtschaftliche Instandsetzung. Dieser drückt sich maßgeblich über die Eindeutigkeit der Zuordnung zu der instandzusetzenden Anlage aus. Verbrauchsteile sind demnach Ersatzteile, die in mehreren Instandhaltungsobjekten einsetzbar und genormt sind (z. B. Normteile wie Schrauben, Muttern und Dichtungen). Eine derartige Beurteilung existiert vorrangig im Kontext des Instandhaltungsmanagements (Biedermann 2008) und wird von Bothe als weder pauschal möglich noch als sinnvoll bezeichnet (Bothe 2003, S. 27). Neben dieser Differenzierung werden Verbrauchsteile zum anderen durch ihr Ausfallverhalten von Reserveteilen unterschieden. Erstere zeigen Verschleiß und sind auf Grund der resultierenden Abnutzungserscheinungen erforderlich. Bei Reserveteilen hingegen ist nicht vorgesehen, dass diese während der geplanten Lebensdauer des Primärproduktes auf Grund von Verschleiß- oder Alterungserscheinungen auszutauschen sind (Bothe 2003, S. 27). Die Lebenserwartung von Reserveteilen entspricht folglich der des Primärproduktes oder übertrifft diese sogar (Hagen 2003, S. 6). Dombrowski verwendet synonym zu den Begrifflichkeiten Verbrauchs- und Reserveteil die Begriffe Verschleiß- und Ausfall-

teil und spezifiziert diese als Ersatzteiltypen (Dombrowski, Bothe 2001, S. 792). Diese Typisierung bildet Grundlage für die weiteren Ausführungen.

Die Organisation von Ersatzteilen im Unternehmen wird in der Literatur allgemein als Ersatzteilmanagement umschrieben. Der Begriff Ersatzteilmanagement wird jedoch selten und zu meist gleichbedeutend mit den Begriffen Ersatzteilwesen bzw. Ersatzteilwirtschaft verwendet (Hagen 2003). In Anlehnung an Hagen und Bothe wird daher eine detailliertere Differenzierung dieser Begriffe vorgenommen (Bothe 2003; Hagen 2003).

Das Ersatzteilwesen bildet das übergeordnete Handlungssystem innerhalb eines Unternehmens und umfasst Abwicklungsprozesse und Strukturprozesse. Abwicklungsprozesse erbringen eine Leistung für externe Kunden und erfolgen regelmäßig. Strukturprozesse hingegen werden einmalig oder sporadisch ausgeführt, da sie Aufbau und Pflege von Wissen und Fähigkeiten im Unternehmen unterstützen. Das Ersatzteilmanagement ist folglich als strukturbildender Prozess innerhalb des Ersatzteilwesens zu verstehen. Das Ersatzteilmanagement kontrolliert und gestaltet die Ersatzteilversorgung und wird als umfassendes Management, d. h. Planung, Steuerung und Überwachung sämtlicher an der Ersatzteilversorgung beteiligter Abwicklungsprozesse verstanden (Hagen 2003, S. 7). Durch das Ersatzteilmanagement werden alle Prozesse im Bereich der Ersatzteillogistik und der Ersatzteilversorgung (Abwicklungsprozesse) systematisch geplant. Der Ersatzteillogistik wird im Rahmen der Instandhaltung die Aufgabe zugeschrieben, Ersatzteile der benötigten Art zeitlich, räumlich und mengenmäßig abgestimmt mit defekten Primärprodukten zusammenzuführen sowie Ersatzgeräte zu stellen. Die physische Versorgung mit Ersatzteilen gemäß dem Anforderungsprofil der Instandhaltung und Produktion wird als übergeordnete Aufgabe angesehen (Ihde, Merkel, Henning 1999, S. 1; Bothe 2003, S. 27; Biedermann 2008, S. 7). Neben der physischen Versorgung mit Ersatzteilen im Sinne der Ersatzteillogistik beinhaltet die Planung der Ersatzteilversorgung auch übergreifende Aufgabenstellungen, wie zum Beispiel die Durchsetzung von Anforderungen in der Produktentwicklung (Bothe 2003, S. 27). Der Einfluss des Ersatzteilmanagements tangiert nach dieser Darstellung auch die Produktgestaltung in Form der Produktneugestaltung und -pflege. Das Ersatzteilmanagement ist ein unternehmensinterner Prozess, während die Abwicklung der durch das Ersatzteilmanagement geplanten Ersatzteilversorgung unternehmensübergreifend durch mehrere Versorgungspartner realisiert wird (Hagen 2003, S. 9). Daher ist die Perspektive zu berücksichtigen, aus der das Ersatzteilmanagement und speziell seine Aufgaben betrachtet werden. Es werden hersteller- oder abnehmerseitige Perspektive differenziert (Biedermann 2008, S. 6; Pfohl 2010; Ester 1997).

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Generierung von Produktions- und Bevorratungsstrategien, weshalb die Planung der Ersatzteilversorgung für produzierende Unternehmen fokussiert wird. Zu diesen zählen Primärprodukthersteller, gebundene und ungebundene Lieferanten sowie Nachbauer von Ersatzteilen (Finkenwirth 1993).

Die Ersatzteilversorgung weist bei produzierenden Unternehmen zwei zentrale Phasen auf (vgl. Abbildung 2-1). Als Serienphase wird der Zeitraum zwischen Beginn der Serienfertigung (Start of Production: SOP) und Ende der Serienfertigung (EOP: End of Production) verstan-

den. In dieser Phase werden bestehende Ersatzteilbedarfe in das gegebene Produktionsprogramm eingeplant und der laufenden Serienfertigung entnommen (Dombrowski, Bothe 2001, S. 50). Nach End of Production beginnt die Nachserie(-nphase), welche bis zum Ende der Lieferverpflichtung (EDO: End of Delivery Obligation) bzw. bis zum Ende der Ersatzteilversorgung (EOS: End of Service) reicht. Lieferverpflichtungen bestehen auf Grund von rechtlichen Anforderungen oder Versorgungsgarantien, die Unternehmen gegenüber Kunden eingehen. Bestehen keine derartigen Lieferverpflichtungen, basiert das Ende der Ersatzteilversorgung auf einem vom Unternehmen festgelegten Zeitpunkt, der zwangsläufig nach dem EDO liegt. In diesem Zeitraum wird die Versorgung mit Ersatzteilen (Nachserienversorgung) mit sogenannten Versorgungsstrategien (VS) bzw. Normstrategien sichergestellt (Inderfurth, Kleber 2008 ; Graf 2005, S. 21 und 91; Schröter 2006, S. 107 ff.). Versorgungsstrategien beschreiben Wege zur Ersatzteilversorgung, d. h. „geplante wiederholbare Vorgehensweisen für eine optimale Versorgung mit Ersatzteilen, die unter Berücksichtigung von Zielen, Gegebenheiten und Trends exemplarisch entwickelt werden und für einzelne oder viele Ersatzteile festgelegt und angepasst werden können“ (Hagen 2003, S. 8).

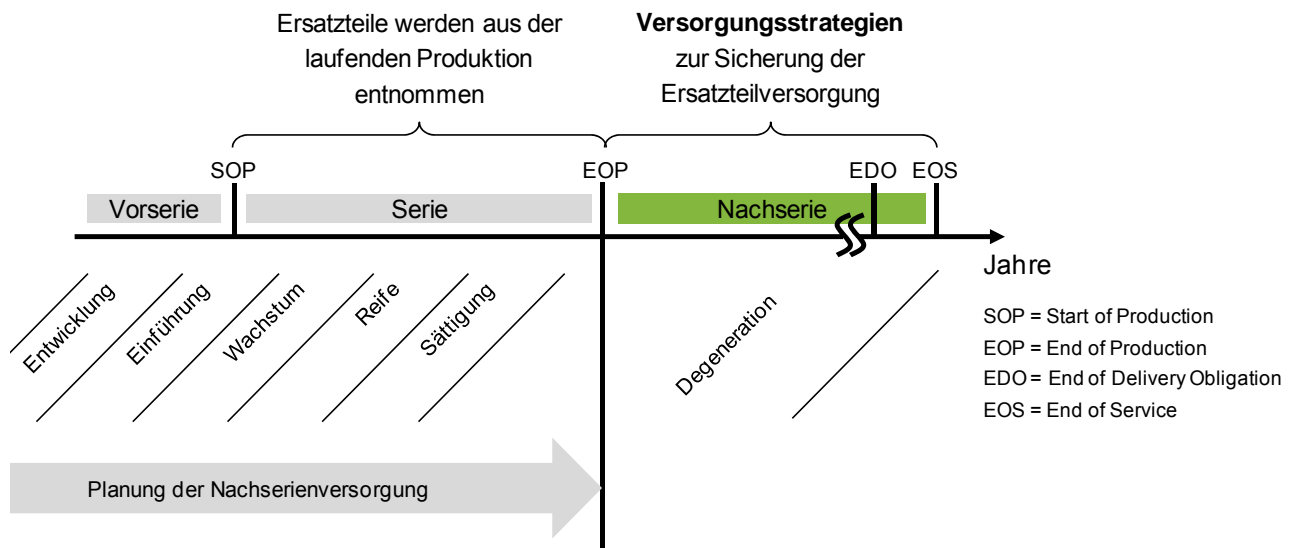


Abbildung 2-1 Phasen der Ersatzteilversorgung (in Anlehnung an Bothe 2003, S. 27f.)

Eine adäquate Planung, Steuerung und Überwachung der Nachserienversorgung im Rahmen des Ersatzteilmanagements erfolgt folglich durch Festlegung von Versorgungsstrategien für Ersatzteile und erfordert eine konsequente Zielorientierung. Dombrowski (Dombrowski, Schulze 2008a, S. 440) nennt die nachstehenden Ziele, auf Grundlage derer die Nachserienversorgung geplant, gesteuert und überwacht werden kann:

- Kostenminimierung,
- Erhöhung der Kundenbindung,
- Wahrung von Flexibilität sowie
- Risikominimierung.

Konkret kann bspw. das Risiko einer Versorgungsstrategie anhand der Wahrscheinlichkeit von Fehlmengen aufgezeigt werden (vgl. hierzu auch Graf 2005, S. 2). Die Wahl einer Versorgungsstrategie mit geringer Wahrscheinlichkeit zur Unterdeckung der Nachfrage kann folglich

das Ziel der Risikominimierung unterstützen. Die Kundenbindung wird bspw. durch die Lieferfähigkeit beeinflusst. Um einen entsprechenden Servicegrad zu ermöglichen bedarf es in der Nachserie flexibler Versorgungsstrategien. Abhängig von den für die Planung der Nachserieversorgung gewählten Zielgrößen sind folglich unterschiedliche Versorgungsstrategien zu präferieren. Die einzelnen Versorgungsstrategien und deren Vor- und Nachteile hinsichtlich verschiedener Zielgrößen werden in Abschnitt 2.2.2 detailliert vorgestellt.

Hagen (Hagen 2003) schlägt zur adäquaten Planung der Ersatzteilversorgung in der Nachseriephase die Zielorientierung in Form von Zielsystemen vor. Zur Definition dieser Zielsysteme differenziert er Kontext-, Performance- und Designvariablen. Kontextvariablen sind als externe Randbedingungen und Risiken zu verstehen, die das Ersatzteilmanagement unweigerlich beeinflussen und bei der Planung, Steuerung und Überwachung der Ersatzteilversorgung zu berücksichtigen sind. Performancevariablen sind Leistungsvorgaben, die an das Ersatzteilmanagement gestellt werden. Diese Performancevariablen sind gleichbedeutend mit den von Dombrowski definierten Zielgrößen. Zielsysteme ergeben sich gemäß dieser Definition aus Kontext- und Performancevariablen (Hagen 2003, S. 9). Designvariablen entsprechen den innerhalb des Ersatzteilmanagements direkt beeinflussbaren Stellgrößen. Die Dimension der Designvariablen wird durch den Grad an Einflussmöglichkeit/Befugnis des Ersatzteilmanagements bestimmt. Dieser wird durch die Systemumwelt vorgegeben. Wird das Ersatzteilmanagement als System in einer hierarchischen Systemstruktur betrachtet, bilden die Designvariablen der Systemumwelt Kontextvariablen für das Ersatzteilmanagement. Eine mögliche Befugnis, die die Reichweite der Designvariablen bestimmt, ist z. B. die zugewiesene Produktverantwortung in der Nachserie. Ist diese gegeben, sind in der Planung der Ersatzteilversorgung Veränderungen am Produkt realisierbar. Ist eine Produktverantwortung nicht gegeben und liegt ausschließlich bei der Konstruktion, reduzieren sich die Designvariablen auf die Wahl von Versorgungsstrategien hinsichtlich der Zielgrößen und deren Ausgestaltung ohne Änderungen am Produkt vornehmen zu können. Handlungsspielräume in Form der Designvariablen sind dementsprechend durch die unternehmensintern gegebenen intra- oder interorganisationalen Einflussmöglichkeiten vordefiniert. Um den Kontext zu verändern, wird eine Abstimmung über die Systemgrenzen hinaus erforderlich.

Zusammenfassend ist das Ziel des Ersatzteilmanagements in der nachhaltigen, d. h. langfristigen und kostenoptimalen Ersatzteilversorgung unter Berücksichtigung von Versorgungszielen und -risiken zu sehen. Eine Fokussierung auf ein Planungsziel allein ist in diesem Kontext zu vermeiden, da wesentliche Faktoren wie z. B. die Kundenbindung und das Risiko einer Versorgungslücke nicht systematisch bei der Planung berücksichtigt werden (Bothe 2003, S. 5). Durch das Ersatzteilmanagement werden Versorgungsstrategien zum einzelnen Ersatzteil festgelegt und im Rahmen der verfügbaren Designvariablen gestaltet. Hierzu werden Kontext-, Performance- und Designvariablen sowie interne Risiken in das System Ersatzteilmanagement eingegeben und eine gemäß dieser Planungsgrundlage gestaltete Ersatzteilversorgung zur betrachteten Komponente ausgegeben.

Eine effiziente Nachserieversorgung kann jedoch nicht durch eine einmalige Planung und Implementierung des gewählten Versorgungsszenarios gewährleistet werden. Neben der Pla-

nung der Ersatzteilversorgung bilden Steuerung und Überwachung zentrale Aufgaben des Ersatzteilmanagements. Dynamische Änderungen der Rahmenbedingungen (Kontextvariablen), z. B. von der Prognose abweichende Bedarfe erfordern eine stetige Anpassung der Nachserienversorgung. Durch Abgleich der Planungsgrundlage mit gegebenen Daten, speziell einer Überwachung der Einhaltung der Performancevariablen, können bei Abweichungen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Eine Steuerung erfordert eine Anpassung der Designvariablen oder den Versuch Einfluss auf Performance- oder Kontextvariablen zu nehmen. Der regelmäßige Vergleich der Prognosedaten mit der realen Bedarfsentwicklung kann eine Anpassung der Bedarfsprognose und bei zu hoher Abweichung von den Prognosedaten steuernde Maßnahmen erfordern, wie z. B. das Versorgungsszenario an sich oder bezüglich seiner Designvariablen anzupassen (Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b, S. 199).

Die Planung der Nachserienversorgung im Ersatzteilmanagement ist bis zum Übergang der betrachteten Komponente in die Nachserie abzuschließen. Je langfristiger und weitreichender diese Planung durchgeführt wird, desto größer ist das Potenzial eine hinsichtlich divergierender Zielgrößen adäquat gestaltete Nachserienversorgung zu gewährleisten. Dombrowski spricht in diesem Zusammenhang von Zukunftsgestaltung, zu der bspw. eine nachserienge-rechte Produktgestaltung gehört. Eine Gestaltung und Planung der Nachserienversorgung unter gegebenen Randbedingungen (Kontextvariablen) und Handlungsspielräumen ohne Berücksichtigung derart zukunftsgestaltender Maßnahmen bezeichnet er als Vergangenheitsbewältigung (Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b, S. 197).

Die der Literatur entnommenen sowie an dieser Stelle im Kontext neu definierten Begriffe sind erforderlich, um die spezifischen Zusammenhänge im betrachteten Themenfeld zu beschreiben. Sie werden in den weiteren Ausführungen durchgängig angewendet.

2.2 Planung der Nachserienversorgung

In den nachfolgenden Abschnitten werden Herausforderungen in der Nachserienversorgung beschrieben. Dargestellte Herausforderungen beschreiben Größen, die Einfluss auf die Planung der Nachserienversorgung haben, und in ihrer jeweiligen Ausprägung den Handlungsrahmen für einen betrachteten Anwendungsfall bestimmen (Kontextvariablen). Hierauf aufbauend werden Versorgungsstrategien, durch die eine Sicherstellung der Nachserienversorgung angestrebt wird, dargestellt. Zudem wird deren Eignung hinsichtlich verschiedener Rahmenbedingungen und Zielgrößen erläutert. Abschließend werden Ansätze und Konzepte vorgestellt, die entsprechende Herausforderungen berücksichtigen und die Planung der Nachserienversorgung durch systematische Vorgehensweisen unterstützen.

2.2.1 Herausforderungen bei der Sicherstellung der Nachserienversorgung

Die Orientierung am Kunden und seinen Wünschen hat eine steigende Individualisierung der Produkte und folglich ein komplexes und breites Produktspektrum zur Folge (Stark 2004). Neben der Beherrschung der Komplexität des Produktspektrums sind Unternehmen im Ersatzteilgeschäft zugleich mit einer großen Vielfalt und Varianten von Ersatzteilen konfrontiert, die wirtschaftlich für die Länge der Serviceperiode vorzuhalten sind (Voss 2006, S. 8) (vgl. Abbildung 2-2). Kürzere Innovations- und Produktlebenszyklen führen zudem dazu, dass langlebige Primärprodukte Komponenten beinhalten, die verschiedenen Generationen einer Produktreihe entstammen. Dies erhöht im Ersatzteilgeschäft zum einen die Anzahl vorzuhaltender Komponenten (Graf 2005, S. 25; Ihde u. a. 1980) und führt zum anderen speziell bei älteren Produktgenerationen zu Unsicherheiten der langfristigen Verfügbarkeit dieser Komponenten (Baumann, Höfferer, Mataushek 2008, S. 62). Sogenannte Bauteilabkündigungen stellen ein zentrales Risiko für die Sicherstellung der Nachserienversorgung dar. Insbesondere in den Bereichen der Elektronik, Elektrik und ähnlichen Technologien genügt die geringe Marktkraft der Automobil- und Maschinenbaubranche nicht, um eine langfristige Verfügbarkeit mit zugekauften Komponenten zu beeinflussen und entsprechend sicherzustellen (Dombrowski, Schulze 2008b).

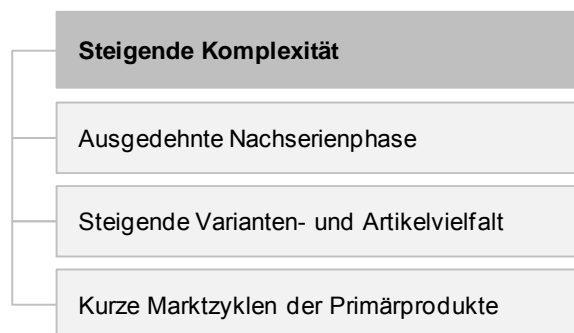


Abbildung 2-2 Gründe steigender Komplexität in der Nachserienversorgung (nach Voss 2006, S. 8)

Ausgangspunkt für die Planung der Nachserienversorgung einzelner Komponenten bildet die Länge der Serviceperiode (Inderfurth, Kleber 2008, S. 1f.). Der (geplante) Versorgungszeitraum resultiert aus rechtlichen Vorschriften, Verbandsempfehlungen oder strategischen Unter-

nehmenszielen (Dombrowski, Bothe 2001, S. 792). Rechtlich sind gesetzlich bzw. vertragsrechtlich vorgegebene Fristen zu beachten (Hesselbach u. a. 2004, S. 88; Finkenwirth 1993, S. 7; Schröter 2006, S. 17ff.). Zum Schutz des Verbrauchers sind bspw. Fahrzeughersteller zur Ersatzteillieferung für den üblichen Nutzungszeitraum eines Fahrzeugs (ca. 10-15 Jahre) verpflichtet (Hagen 2003, S. 13f.). Vertragsrechtlich werden diese Regelungen u. U. an gebundene Lieferanten weitergegeben. Unter Berücksichtigung rechtlicher Bedingungen hängt die Länge der Serviceperiode maßgeblich von den üblichen Nutzungszeiträumen der Primärprodukte ab, die branchenspezifisch sehr unterschiedlich sind. Produzierende Unternehmen sind u. U. verpflichtet, Ersatzteile bis zu 50 Jahre vorzuhalten. Wird einer Lieferung von Ersatzteilen in bestehendem Vertrags- oder Rechtsverhältnis nicht nachgekommen, resultieren Strafen, die den eigentlichen Ersatzteilverwert deutlich übersteigen (Biedermann 2008, S. 6). Neben rechtlichen Gründen, können strategische Überlegungen Unternehmen veranlassen, die Ersatzteilversorgung langfristig sicherzustellen (Graf 2005, S. 25; Dombrowski, Bothe 2001, S. 792). Hierzu zählen bspw. die Steigerung der Kundenbindung sowie die Generierung von Umsatz, da im Ersatzteilgeschäft durch die Marktmacht in vielen Branchen hohe Margen erzielt werden können (Barkawi, Baader, Montanus 2006).

Zentrale Herausforderung einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Sicherstellung der Ersatzteilversorgung und deren Planung im Ersatzteilmanagement ist in einer stark sinkenden Stückzahl nachgefragter Ersatzteile zu sehen. Für produzierende Unternehmen ergeben sich in der Nachserie grundlegend andere Rahmenbedingungen in der Produktion (vgl. Abbildung 2-3). Die Auslastung der in der Serienfertigung eingesetzten Betriebsmittel ist nicht gegeben, Automatisierungslösungen auf Grund der entstehenden Kosten (Investition, Betrieb, etc.) nicht zweckmäßig. Entstehende Fixkosten sind auf eine entsprechend geringe Ausbringungsmenge umzulegen, weshalb die pro Stück resultierenden Produktionskosten auf Grund mangelnder Skaleneffekte stark ansteigen (Hagen 2003, S. 109). Eine kontinuierliche Fertigung ist auf Grund der geringen Stückzahlen wirtschaftlich nicht möglich. Die Produktion erfolgt entsprechend diskontinuierlich.

	Serie	Nachserie
Stückzahlen	hoch	gering
Fertigung	kontinuierlich	diskontinuierlich
Automatisierung	hoch	gering
Auslastung	hoch	sehr gering
Ersatzteile für Betriebsmittel	gesichert	kritisch
Prozesstechnologie	neu	neu und alt

Abbildung 2-3

Unterschiede zwischen Serien- und Nachserienphase (vgl. Dombrowski, Weckenborg 2009, S. 955)

Eine flexible Fertigung zu wirtschaftlichen Bedingungen erfordert flexible und folglich gering automatisierte Lösungen. Eine Änderung der Prozessabläufe und eingesetzten Betriebsmittel erfordert jedoch in vielen Fällen die Zertifizierung der umstrukturierten Prozesse und Fertigungseinrichtungen durch den Endkunden (Bothe 2003; Friedrichs 2008). Des Weiteren ist die Funktionsfähigkeit und Verfügbarkeit der Betriebsmittel für den geplanten Versorgungszeitraum zu gewährleisten. Dies bezieht sich auf die Möglichkeiten zur Instandhaltung der Fertigungseinrichtungen, speziell die Verfügbarkeit von Ersatzteilen für alte Einrichtungen. Eine weitere Problematik ergibt sich in der eingesetzten Prozesstechnologie, Technologiesprünge erschweren die Sicherung von Know-How, welches zur Bedienung der Anlagen erforderlich ist. Zudem kann eine veraltete Prozesstechnologie wirtschaftliche Auswirkungen haben.

Eine weitere Problematik, speziell für die Planung der Ersatzteilversorgung, bildet die Ermittlung der nach End of Production für den Versorgungszeitraum nachgefragten Stückzahl an Ersatzteilen. Abhängig von den definierten Ersatzteiltypen ist ein unterschiedliches Nachfrageverhalten gegeben, welches zum einen die nachgefragte Stückzahl an sich und zum anderen die Prognostizierbarkeit der Nachfrage in Form von Bedarfsverläufen beeinflusst (vgl. Abbildung 2-4). Verschleißteile weisen einen meist kontinuierlichen Verlauf auf, der proportional zum Produktlebenszyklus und der in den Markt eingebrachten Menge an Primärprodukten verläuft, lediglich zeitlich versetzt. Ausfallteile weisen einen meist kontinuierlichen Verlauf auf, der proportional zum Produktlebenszyklus und der in den Markt eingebrachten Menge an Primärprodukten verläuft, lediglich zeitlich versetzt.

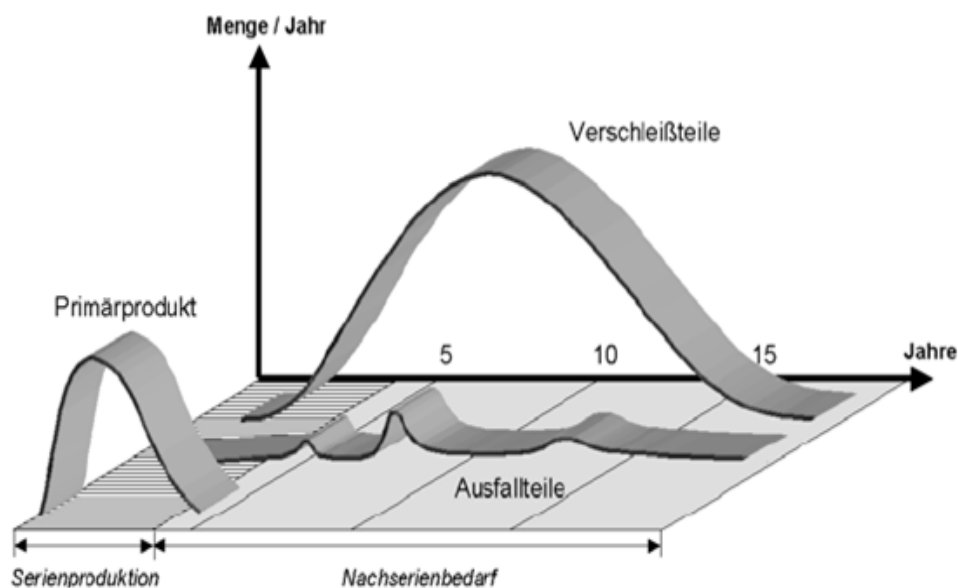


Abbildung 2-4 Bedarfsverlauf gemäß Ersatzteiltyp (vgl. Dombrowski, Bothe 2001)

Ausfallteile hingegen sind durch einen sowohl in Bezug auf die Nachfragehöhe als auch Nachfragezeitpunkt sporadischen Bedarf gekennzeichnet, der zudem stark ausreißerbehaftet ist und Bedarfsspitzen sowie Nullbedarfsperioden aufweist (Inderfurth, Kleber 2008; Wollenweber 2006, S. 10). Dieser Bedarf entspricht denen von Langsamdrehern eines Produktspektrums (Wollenweber 2006, S. 14).

Die aufgezeigten Charakteristika der Ersatzteiltypen beeinflussen die Quantifizierung der in der Nachserienphase erforderlichen Bedarfsmengen. Bedarfshöhe und -verlauf sind abhängig

von primärproduktbezogenen, ersatzteilspezifischen, marktseitigen sowie weiteren exogen bestimmten Einflussgrößen, die es zur Prognose des Bedarfsverlaufs zu berücksichtigen gilt (Loukmdis, Meyer 2006, S. 19; Meidlinger 2004, S. 100ff.; Gesellschaft Fördertechnik, Materialfluss und Logistik 2000, S. 74) (s. Abbildung 2-5). Diese Einflussgrößen bestimmen den Ersatzteilbedarf nach Volumen sowie zeitlicher und örtlicher Verteilung und werden nachstehend kurz aufgeführt.

Zu berücksichtigen sind Bestand sowie Bestandsentwicklung der Primärprodukte, d. h. zum einen die Anzahl in Umlauf befindlicher Primärprodukte sowie der zukünftige Planverkauf dieser Produkte (abhängig z. B. von derzeitiger Lebenszyklusphase). Diese ermöglichen u. a. kausale Schlussfolgerungen über erwartete Ersatzteilbedarfe. Die Nutzungsintensität (Betriebsstunden, außergewöhnliche Belastungen) und Einsatzbedingungen der Primärprodukte (Ort, Dauer) beeinflussen Verschleißerscheinungen einzelner Komponenten. In Kombination ist das Verschleißverhalten der in Primärprodukten verbauten Komponenten zu betrachten. Neben einer Analyse des Verschleißverhaltens gibt das Ausfallverhalten eine Vielzahl an Informationen, die direkt oder indirekt den Ersatzteilbedarf beeinflussen. Ausfallwahrscheinlichkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit, Ausfall- und Verschleißrate sind Schlüsselfaktoren bei der Ermittlung des Ersatzteilbedarfs. Weiterhin kann die Instandhaltungsstrategie (präventiv, reaktiv) den Bedarfsverlauf an Ersatzteilen beeinflussen (Ersatzteile werden deterministisch oder stochastisch nachgefragt) (Meidlinger 2004, S. 101).

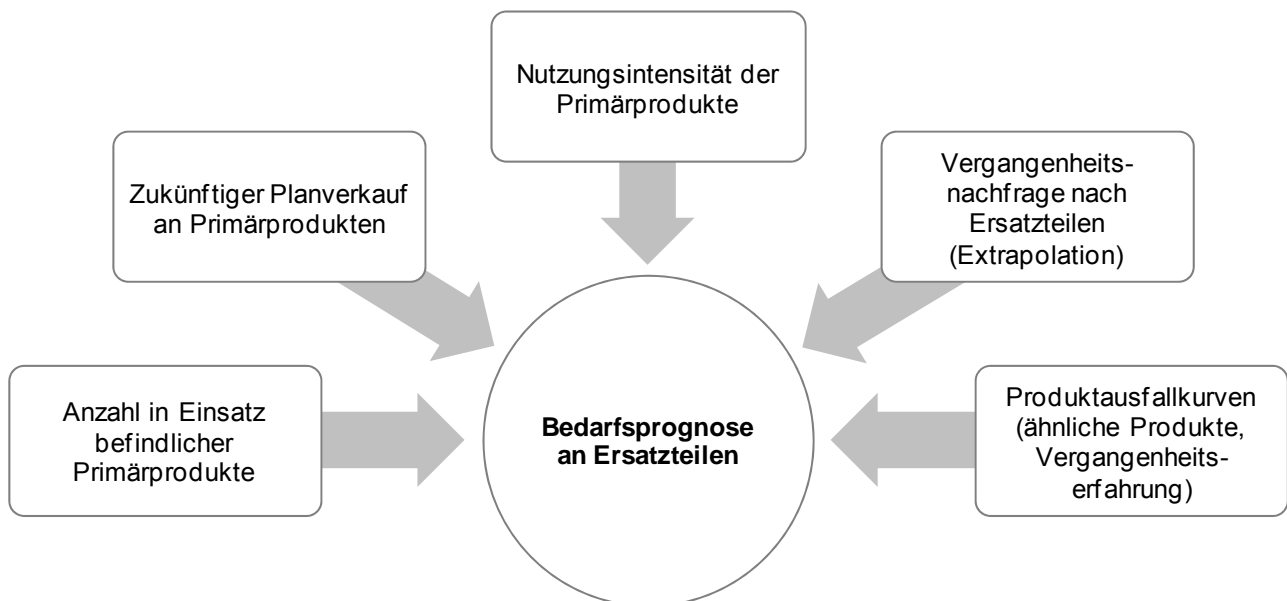


Abbildung 2-5 Zur Prognose von Ersatzteilbedarfen zu berücksichtigende Aspekte (s. Pfohl 2010, S. 216)

Die Bedarfsvorhersage für Ersatzteile nach Ende der Serienfertigung erfolgt, wie zuvor dargestellt, für verhältnismäßig lange Zeiträume. Bereits geringe Ungenauigkeiten addieren sich über dem langen Prognosezeitraum zu erheblichen Abweichungen auf, die zu Unter- oder Überdeckungen mit Ersatzteilen führen. Die Prognose sollte zur Vermeidung dieser Risiken entsprechend genau sein. Neben langen Versorgungszeiten bedingen zudem das stochastische Ausfallverhalten von Komponenten sowie unvorhersehbare technische Veralterung die

schwierige Prognostizierbarkeit von Zeitpunkt und Höhe der Ersatzteilnachfrage. Diese wird zusätzlich durch die hohe zeitliche Dynamik der Nachfrageentwicklung nach Ersatzteilen erschwert. Diese basiert auf der Abhängigkeit des Bedarfs von der variierenden Anzahl der sich in Gebrauch befindlichen Primärprodukte, die keinen zeitlich gleichmäßigen Grundverlauf der Nachfrage erwarten lässt (Inderfurth, Kleber 2008, S. 2; Hesselbach, Mansour, Graf 2002; Meidlinger 2004, S. 1ff.; Bothe 2003, S. 93ff.).

Unter Prognosen werden allgemein Vorher- oder Voraussagen verstanden, d. h. Aussagen über Ereignisse, Zustände oder Entwicklungen in der Zukunft (Mertens, Rässler 2005, S. 1ff.). Derartige Vorhersagemethoden existieren in zahlreichen Disziplinen. Die dargestellten Einflüsse verdeutlichen, dass eine Prognose von Ersatzteilbedarfen auf historischen Bedarfsdaten (statistische Zeitreihenverfahren), Erfahrungs- bzw. Analogiedaten (Analogieverfahren) oder kausalen Zusammenhängen wie Ausfallraten, Nutzungsbedingungen o. ä. aufbauen sollten (Bothe 2003, S. 93ff.). Der Einsatz von Prognoseverfahren sollte abhängig von der Ausprägung der oben dargestellten Einflussgrößen differenziert erfolgen (Meidlinger 2004, S. 101; Loukmdis, Meyer 2006, S. 19). Grundsätzlich werden qualitative und quantitative Verfahren unterschieden.

Qualitative Verfahren basieren auf Expertenwissen und ziehen Erfahrungs- und Analogiedaten zur Prognose der Ersatzteilbedarfe heran. Künftige Bedarfe werden hier unter Berücksichtigung der derzeitigen Rahmenbedingungen aus Erfahrungswerten abgeleitet. Ein weiteres auf Expertenwissen basierendes Verfahren ist das Analogieverfahren. Hier werden aus inhaltlich, technisch und kostenmäßig möglichst ähnlichen Szenarien Annahmen für Szenarien abgeleitet, für die keine Erfahrungswerte existieren. Diese Annahmen werden auf das betrachtete Szenario übertragen (Pepels, Aretz 2008, S. 180).

Qualitative Ansätze zur Ermittlung des Ersatzteilbedarfs umfassen zeitreihenanalytische, lebensdaueranalytische, koeffizientenbasierte und kausalanalytische Prognoseverfahren (Meidlinger 2004 ; Loukmdis, Meyer 2006, S. 19). Für den Anwendungsfall der Nachserienversorgung sind laut Bothe zeitreihenbasierte und kausalanalytische Verfahren zu fokussieren (Bothe 2003, S. 93).

Für die zeitreihenbasierten Verfahren liefert Tempelmeier eine Übersicht in der Literatur vielfach detailliert beschriebener Prognoseverfahren (Tempelmeier 2006). Der Bedarf der Vergangenheit wird als Folge periodenbezogener Bedarfe (Zeitreihe) angenommen. Der Verlauf dieser Zeitreihe bestimmt das für den Anwendungsfall angemessene Prognosemodell, welches aus den Vergangenheitswerten Bedarfe der Zukunft errechnet. Die Eignung zeitreihenbasierter Prognoseverfahren hängt folglich maßgeblich von den je Ersatzteiltyp gegebenen unterschiedlichen Bedarfsverläufen ab. Wesentliche Methoden sind der (un-)gewichtete gleitende Durchschnitt, die exponentielle Glättung (erster und zweiter Ordnung) sowie die Regressionsanalyse (linear und multiple linear) (Domschke, Scholl 2005, S. 140ff.). In der Literatur ist eine Vielzahl von Abwandlungen dieser Verfahren gegeben, die jedoch nicht näher erläutert werden. Durch den gleitenden Durchschnitt werden Vergangenheitswerte von n Perioden, ungewichtet oder mittels veränderlichen Koeffizienten gewichtet, gemittelt und als Nachfragewert

einer Periode t angenommen. Der resultierende Prognosefehler nimmt mit steigender Anzahl einbezogener Vergangenheitswerte ab. Die Regressionsanalyse erstellt einen mathematischen Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer bzw. mehreren unabhängigen Variablen. Diese Zusammenhänge werden in Form von Funktionen durch statistisch-mathematische Verfahren ermittelt (Domschke, Scholl 2005, S. 142). Neben dem Einsatz bei linearen Trends eignet sich die Regressionsanalyse auch für die Abbildung exponentiell oder hyperbelförmig verlaufender Trends (Tempelmeier 2006, S. 56). Durch eine multiple lineare Regression lassen sich zudem saisonale Schwankungen bzw. trigonometrische Einflüsse auf die Trendfunktion erfassen und beschreiben (Tempelmeier 2006). Die exponentielle Glättung basiert auf einer gewichteten Betrachtung von Vergangenheitswerten. Das Verfahren erster Ordnung gewichtet jüngere Prognosewerte stärker als bereits weiter zurückliegende (Tempelmeier 2006, S. 43). Verläuft der zugrunde liegende Bedarf nicht konstant, sondern einem linearen Trend folgend, ist das Verfahren exponentieller Glättung erster Ordnung mit einem systematischen Fehler belegt. Die exponentielle Glättung zweiter Ordnung wirkt diesem Fehler durch eine zweifache Glättung entgegen (Schröder 2005). Die unterschiedlichsten konventionellen Verfahren der Zeitreihenanalyse auf Basis von Vergangenheitswerten erscheinen infolge immer kürzer werdender Innovations- und Produktlebenszyklen zur Erstellung einer Bedarfsprognose immer weniger geeignet (Meidlinger 2004, S. 90), berücksichtigen jedoch implizit Störgrößen durch den Bedarfsverlauf (Bothe 2003, S. 91). Zudem sind diese Prognoseverfahren nicht ersatzteilspezifisch. Die beschriebenen komplexen kausalen Zusammenhänge und Randbedingungen (s. o.) werden von den zuvor dargestellten Verfahren i. d. R. nicht oder nur teilweise/implizit einbezogen.

Es existieren verschiedene ganzheitliche Ansätze, die diese Aspekte gezielt berücksichtigen. Eine Übersicht und Zusammenfassung dieser Verfahren bietet u. a. Bothe (Bothe 2003) sowie das IGF Forschungsvorhaben „Dynamische Gestaltung von Ersatzteilsystemen: Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes unter integrierter Betrachtung von Prognoseverfahren, Netzwerkstrukturen und Bestandpolitiken“ (Wollenweber 2006, S. 16). Dekker und Kleinjin entwickeln und validieren eine Prognosemethode auf Basis dreier Algorithmen, die die Relevanz des Bedarfs (kritisch/nichtkritisch) an Ersatzteilen und die Kosten der Nachserienversorgung berücksichtigen (Dekker, Kleinjin, de Rooij 1998). Meidlinger entwickelt bspw. einen umfangreichen kausalgestützten Ansatz auf Basis von Ausfallraten (Meidlinger 2004, S. 243ff.). Dem Prognosemodell von Pauli (Pauli 1998) liegt die Bayes-Statistik zugrunde, die eine Dichteverteilung der Ausfälle pro Mengeneinheit angibt (Wollenweber 2006, S. 16). Der idealisierte Verlauf der Ausfallrate über den Lebenszyklus eines Produktes ist badewannenförmig und liefert näherungsweise Werte für die generelle Ausfallwahrscheinlichkeit eines Produktes. In Kombination mit einem angenommenen normalverteilten Bestand des Primärproduktes lässt sich auf einen groben Zielwert der Ersatzteilmachfrage schließen. Ein weiterer Ansatz, der die Ausfallwahrscheinlichkeit in den Fokus rückt, ist die Erneuerungstheorie. Der Ansatz beschreibt die statistische Ausfallhäufigkeit innerhalb eines gewählten Zeitintervalls. Diese wird mit der Verkaufsfunktion des Primärproduktes (bezogen auf Produktion und/oder Verkauf) kombiniert und liefert so über den Produktlebenszyklus eine Verteilungsfunktion in Abhängigkeit der Zeit.

Ausgangspunkt dieser Ansätze bilden kausale Zusammenhänge, speziell auf Basis des Ausfallverhaltens. Bothe stellt Vor- und Nachteile dieser sowie weiterer Verfahren vor und bemerkt, dass bei bekannten Ausfallverhalten zur Prognose zwingend weitere Eingangsdaten erforderlich sind. Zudem kommt einer adäquaten Berücksichtigung von Störgrößen eine zentrale Bedeutung zu.

Derart umfassende Prognoseverfahren erfordern eine große Datenbasis. Erschwerend kommt hinzu, dass der Aufwand zur Datenerfassung mit steigender Prognosegüte und langen Prognosezeiträumen zunimmt. Aus diesen Gründen werden umfassende Ansätze in der Industrie zumeist nicht bzw. in geringem Umfang eingesetzt (Wollenweber 2006, S. 10). Zudem ist die Güte der Prognose stark abhängig von der Datenverfügbarkeit der Unternehmen (Knigge, Rosentritt 2009, S. 1149ff.). Der Bedarf wird in Ermangelung einer ausreichenden Datenbasis vielfach aus subjektiven Erwartungen und Erfahrungen abgeleitet und ist entsprechend mit hohen Sicherheitsbeständen behaftet. Vereinzelt wenden Unternehmen interne und hochspezifische Ansätze an, die jedoch nicht zu verallgemeinern sind (Mergenthaler, Lampe 2001).

Die Qualität der Planung der Nachserienversorgung wird maßgeblich von der Güte der Planungsgrundlage beeinflusst. Zentrale Größe bildet eine hinreichend genaue Prognose der Nachfragemengen. Da Bedarfshöhe und -verlauf abhängig von verschiedenen Einflussgrößen sind, ist eine Prognose im Hinblick auf das Nachfrageverhalten und die nachgefragte Stückzahl folglich nicht für jedes Ersatzteil als kritisch einzustufen (Dombrowski, Bothe 2001, S. 792). Eine Bedarfsvorhersage für Verschleißteile ist grundsätzlich deutlich einfacher, da höhere Bedarfsvolumen nachgefragt und das Ausfallverhalten bereits in der Produktentwicklung bewusst geplant werden kann. In diesem Zusammenhang sollte unter Berücksichtigung der dargestellten Einflussgrößen und in den Unternehmen bestehenden Datenbasis ein Prognoseverfahren eingesetzt werden, welches eine für die Ersatzteilversorgung in der Nachserie ausreichend genaue und angemessen aufwendige Prognose der Ersatzteilbedarfe unterstützt. Die Wahl einer adäquaten Prognosemethode für den spezifischen Anwendungsfall ist zentrales Gütekriterium für die Planung der Nachserienversorgung, da nur eine hinreichend genaue Planungsgrundlage belastbare Planungsergebnisse liefert.

Neben Eigenschaften, die wie das Ausfallverhalten einen maßgeblichen Ausschlag auf möglich Prognoseverfahren und deren Güte haben, sind weitere produktspezifische Charakteristika in die Planung zu integrieren. Restriktionen ergeben sich z. B. durch die produktspezifische Alterungsbeständigkeit von Bauteilen (Lagerfähigkeit) (VDA-Ausschuss Aftermarket 2006 ; Biedermann 2008, S. 16). Eine eingeschränkte Lagerfähigkeit begrenzt maximal mögliche Bevorratungszeiträume (Inderfurth, Kleber 2008). Zudem können spezifische Lagerbedingungen und Prüfverfahren erforderlich sein, um eine Lagerfähigkeit herzustellen bzw. zu verlängern (Mente, Kleikemper, Ernst 2008) und Qualitätsprobleme nach einer Einlagerung auszuschließen (Mente, Kleikemper, Ernst 2008). Hierzu werden oft kostenintensive Verfahren eingesetzt (Hagen 2003, S. 67), die es bei der Planung der Nachserienversorgung speziell unter wirtschaftlichen Aspekten zu berücksichtigen gilt. Analog verhält es sich mit hochwertigen Produkten, die hohe Kapitalbindung verursachen.

Die dargestellten Aspekte haben in ihrer jeweiligen Ausprägung (Anwendungsfall) maßgeblichen Einfluss auf die Wahl möglicher Versorgungsstrategien und auf die Realisierung fokussierter Zielgrößen (Kosten, Risiko). Das Marktverhalten, Produkteigenschaften, Prozessbedingungen, unternehmensspezifische und weitere Herausforderungen sind für den jeweiligen Anwendungsfall extern vorgegeben und bilden folglich Kontextvariablen des Ersatzteilmanagements und daher der Planung der Ersatzteilversorgung. Eine umfassende Berücksichtigung ebendieser Herausforderungen ist Kerngedanke und ausschlaggebendes Qualitätsmerkmal einer belastbaren Planung der Nachserienversorgung. Nachstehend werden die zur Sicherstellung der Nachserienversorgung eingesetzten Versorgungsstrategien dargestellt.

2.2.2 Versorgungsstrategien und Versorgungsszenarien

Um auf die dargestellten Herausforderungen adäquat zu reagieren, haben sich wiederholbare Vorgehensweisen etabliert, die eine optimale Versorgung mit Ersatzteilen in der Nachserienphase ermöglichen sollen. Die Wahl einer entsprechenden Versorgungsstrategie erfordert die Berücksichtigung des Zielsystems, d. h. der verfolgten Optimierungsgrößen (Performancevariablen) sowie der Gegebenheiten und Trends (Kontextvariablen). Unter Berücksichtigung dieser Kontextvariablen ist eine Anpassung an den spezifischen Anwendungsfall erforderlich (s. Hagen 2003, S. 8). Versorgungsstrategien beziehen sich im engeren Sinn hauptsächlich auf Herstell- und Bereitstellungsprozesse, fallweise jedoch auch auf Leistungsgestaltungsprozesse, wie beispielsweise die Produktpflege (Hagen 2003, S. 8). Sie weisen hinsichtlich des jeweils betrachteten Zielsystems eine unterschiedliche Eignung auf. Die einzelnen Versorgungsstrategien sowie deren Eignung (Generelle Einsetzbarkeit sowie Vor- und Nachteile unter Annahme bestimmter Herausforderungen, Erfüllung der Zielgrößen) werden nachstehend kurz erörtert.

Allgemein wird differenziert, ob der Austausch eines Teils durch ein Neuteil oder ein Altteil geschieht (s. Abbildung 2-6). Qualitäts- und Kundenanforderungen, speziell in der Automobilindustrie oder bei sicherheitsrelevanten Bauteilen, erlauben die Verwendung von Altteilen nicht oder nur begrenzt (Dombrowski, Schulze 2008a, S. 446). Strategien, die den Ersatz durch Neuteile vorsehen, sind die interne Nachfertigung (NF) bzw. die externe Nachfertigung (Outsourcing) und die Nutzung abwärts kompatibler Teile der Serienfertigung. Der Ersatz ausgefallener bzw. verschlissener Teile durch Altteile wird durch Aufarbeitung/Wiederinstandsetzung (Reparatur) und Wiederverwendung der eingesetzten realisiert (vgl. hier und im Folgenden Dombrowski, Bothe 2001, S. 792; Bothe 2003; Graf 2005, S. 91).

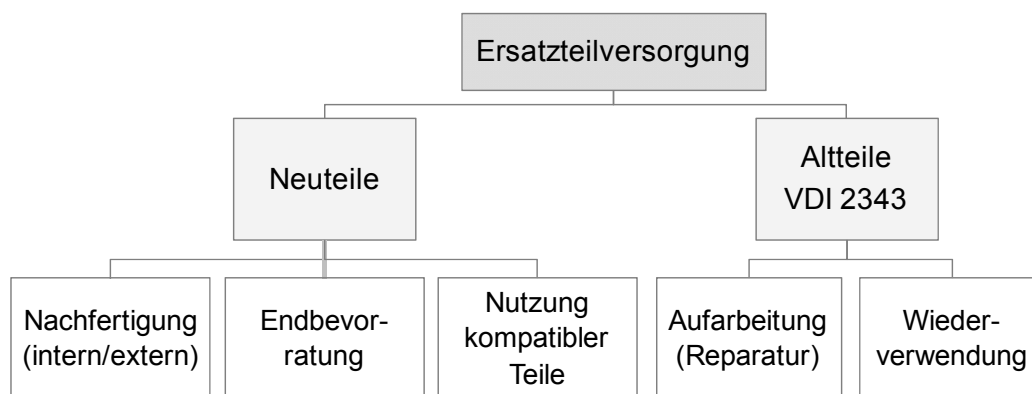


Abbildung 2-6 Versorgungsstrategien zur Sicherstellung der Nachserienversorgung (vgl. Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b und Bothe 2003)

Die Endbevorratung sieht die Fertigung eines Serienabschlussloses (Allzeitbedarf) vor. Durch Einlagerung der bei End of Production gefertigten Ersatzteile wird die Sicherstellung der Ersatzteilversorgung durch eine bis zum Ende des Versorgungszeitraums (EDO/EOS) ausreichend dimensionierte Teilemenge angestrebt. In diesem Zusammenhang ist die Abschätzung des für den Versorgungszeitraum erforderlichen Bedarfes als problematisch einzustufen. Eine

Prognose der Produktionsmenge über lange Zeiträume, insbesondere bei Ausfallteilen, ist kritisch und birgt die Gefahr der Unter- oder Überdeckung durch Fehlprognosen und/oder Bedarfsabweichungen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Zudem setzt die Einlagerung der Ersatzteile über den Versorgungszeitraum eine Lagerfähigkeit der Komponenten voraus. Diese ist, insbesondere bei elektronischen Bauteilen, begrenzt oder teilweise unbekannt. Neben dem großen Risiko der Verschrottung zu viel produzierter Ersatzteile und einer mangelnden Lieferfähigkeit bei Unterdeckung ist die Strategie der Endbevorratung durch hohe Kosten in Folge von gebundenem Kapital und Lagerkosten gekennzeichnet.

Vorteile der Endbevorratung sind in der Fertigung der Ersatzteile zu Bedingungen und Kosten der Serienfertigung zu sehen. Neben den geringen Herstellkosten ergibt sich u. a. die Möglichkeit, Fertigungseinrichtung der Serie nicht weiter vorzuhalten und steigendem Instandhaltungsaufwand entgegenzuwirken (Schröter 2006, S. 108f.). Die Endbevorratung stellt in diesem Zusammenhang eine insbesondere für schwierig nachzufertigende Komponenten wichtige Versorgungsstrategie dar und wird trotz häufig auftretender technischer Probleme bei der Einlagerung eingesetzt.

Die Nachfertigung von Ersatzteilen nach Ende der Serienproduktion ermöglicht die Eindeckung in regelmäßigen Bedarfsblöcken sowie eine Produktion von Einzelbedarfen. Durch eine am auftretenden Bedarf orientierte Produktionsmenge können bei dieser Strategie Lagerbestände vermieden werden. Die resultierenden geringen Lagerkosten sind vorteilhaft, solange die Fertigungskosten der Nachserie nicht weit über denen der Serienproduktion liegen. Grundsätzlich kann eine Nachfertigung intern beziehungsweise extern durchgeführt werden. Intern kann die Nachfertigung integriert oder organisatorisch getrennt zur eigentlichen Serienfertigung erfolgen und hat zumeist eine schlechte Auslastung der Fertigungseinrichtungen zur Folge. Bei externer Nachfertigung werden Fertigung und zumeist die Fertigungseinrichtung der Serienphase an ein drittes Unternehmen übergeben, die die Ersatzteile nach den Vorgaben der Serienproduzenten herstellen. Sogenannte Ersatzteilmfertiger sind speziell an die Bedingungen der Nachserie (Flexibilität bei kleiner Stückzahl) angepasst (Dombrowski, Weckenborg 2009, S. 955). Das Unternehmen kann sich auf die Kernkompetenzen in der Serienfertigung konzentrieren und das technologisch und organisatorisch stark abweichende Ersatzteilgeschäft separieren. Dies kann in Unternehmen analog durch eine intern getrennt zur Serienfertigung organisierte Ersatzteilmfertigung realisiert werden. Nachteilig in Bezug zur internen Nachfertigung wirkt sich die externe Fertigung z. B. durch die Herausgabe von wichtigem Fertigungs-Know-How und ggf. erhöhte Kosten aus. Unabhängig von der Wahl einer internen oder externen Nachfertigungsstrategie ergeben sich Probleme durch die mangelnde Verfügbarkeit spezieller Fertigungseinrichtungen oder Bauteile. In diesem Kontext sind schwierig zu reaktivierende Fertigungseinrichtungen, insbesondere spezielle Anlagen für die Fertigung von Elektronikkomponenten oder mikrotechnischen Bauteilen und nur für einen begrenzten Zeitraum am Markt verfügbare Bauteile wie z. B. Prozessoren zu nennen. Durch die bedarfsgerechte Nachfertigung können signifikante Nachteile der Endbevorratung, wie bspw. die voraussetzende Lagerfähigkeit oder einmalige (langfristige) Bedarfsprognose, umgangen wer-

den, jedoch kann diese Strategie auf Grund der Gefahr von Bauteilabkündigungen oder fehlender Fertigungseinrichtungen nicht realisierbar sein.

Eine weitere Alternative zur Realisierung der Ersatzteilversorgung mit Neuteilen ist die Nutzung abwärts kompatibler Teile der Serienfertigung. Die Nutzung kompatibler Komponenten erfordert, die Konstruktion neuer Komponenten der Serienfertigung derartig auszulegen, dass sie auch für die zu ersetzenden Vorgängerprodukte einsetzbar ist. Generell ist die Herstellung kompatibler Ersatzteile als aufwendig und kostenintensiv anzusehen (vgl. Bothe 2003, S. 52). Die Strategie stellt aus oben genannten Aspekten hohe Anforderungen an die Konstruktion, wobei die in der Regel als unproblematisch anzusehende Verwendung von Normteilen angestrebt werden sollte. Produktspezifische Konstruktionen sind derartig auszulegen, dass diese „hinsichtlich Funktionalität, Einbauspezifikationen und Schnittstellen kompatibel zu früher verwendeten Komponenten bleiben“ (Dombrowski, Bothe 2001, S. 794). Die Akzeptanz der Strategie ist teilweise gering, da die Anforderung einer (Abwärts-) Kompatibilität als Innovationshemmnis angesehen wird. Begründet ist dieser Nachteil besonders in innovationsstarken Bereichen wie der Elektronik, in denen die Innovationshemmnis neben Aufwand und Kosten besonders schwer wiegt. Ist eine abwärtskompatible Konstruktion gewährleistet, liegt der bedeutende Vorteil dieser Strategie in der unproblematischen und kostengünstigen Deckung von Ersatzteilbedarfen der Nachserie aus der laufenden Produktion des Nachfolgeproduktes. Das Risiko von Unter- und Überdeckung durch unsichere Bedarfsprognosen ist nicht mehr gegeben.

Die Möglichkeit zur Nutzung von rückgeführten Altteilen bieten die Strategien der Wiederinstandsetzung und der Wiederverwendung von Komponenten. Die Wiederinstandsetzung umfasst die Reparatur und Überholung defekter Komponenten, die die entsprechenden Komponenten in einen einheitlichen neuwertigen Zustand versetzen. Probleme ergeben sich durch die technische Machbarkeit. Zum einen ist die Reparaturfähigkeit der defekten Komponenten vorauszusetzen, zum anderen muss die Verfügbarkeit der Komponenten gewährleistet sein. Neben einem adäquaten Rückführsystem für defekte Teile müssen Know-how und Einrichtungen für die Reparatur und Prüfung der Komponenten bereitgestellt werden. Vorteile sind in geringeren Lagerbeständen zu sehen, da anstelle von gesamten Baugruppen lediglich Komponenten vorgehalten werden, die einen Defekt aufweisen können. Zudem wird die laufende Serienfertigung nicht beeinträchtigt und Produktionseinrichtungen der Serienfertigung können verschrottet werden. Im Rahmen der Instandsetzung ist die rechtliche Situation als kritisch anzusehen. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Teilen ist fraglich, wer für eine Reparatur zuständig ist und wer nach einer Reparatur die Produkthaftung übernimmt.

Die zweite Möglichkeit der Ersatzteilversorgung mithilfe von Altteilen ist die Altteilwiederverwendung. Hier werden noch funktionstüchtige Komponenten nach einer Überholung als Ersatzteil eingesetzt. Diese Möglichkeit wird analog zur Wiederinstandsetzung genutzt, um den Bedarf an Ersatzteilen durch zurückgeführte wiederverwendbare Teile zu verringern. Die Vorteile dieser Strategie sind äquivalent zu denen der Wiederinstandsetzung. Analog zur Wiederinstandsetzung bedarf es einer kontrollierten Rückführung der Altteile. Nachteilig ist, dass Anzahl und Restlebensdauer der rückzuführenden Altteile schwer prognostizierbar sind (Bothe

2003, S. 64). Insbesondere zu Anfang des Versorgungszeitraums sind Rückflüsse nicht gegeben. Neben der Quantität der rückgeführten Bauteile ergeben sich Probleme bezüglich der Qualität. Eine Wiederverwendung ist bei sicherheitsrelevanten Bauteilen in der Regel nicht möglich, da im Bereich der Bauteilprüfung vor dem Hintergrund der Produkthaftung zu komplexe Anforderungen bestehen (Dombrowski, Bothe 2001, S. 794f.).

Die jeweiligen Versorgungsstrategien sind mit unterschiedlichen Kosten und Risiken verbunden. Beispielsweise bietet die Nachfertigung neben der Altteil-Wiederverwendung das größte Flexibilitätspotenzial (Inderfurth, Kleber 2008). Die Anwendung einzelner Versorgungsstrategien erweist sich auf Grund der dargestellten Vor- und Nachteile als nicht zielführend im Sinne des Zielsystems. Generell wird die Möglichkeit genutzt diese Strategien in sogenannten Versorgungsszenarien zu kombinieren. Unter Versorgungsszenarien (VSz) i. e. S. wird die Auswahl von Versorgungsstrategien sowie der Festlegung ihrer zeitlichen Abfolge verstanden (Hagen 2003, S. 8). Fokussiert wird in diesem Zusammenhang die Bildung von Szenarien über die Versorgungszeit bezogen auf ein oder mehrere Ersatzteile. Ziel dieser Ausarbeitung ist es, Versorgungsszenarien im weiteren Sinn zu definieren und das zuvor beschriebene Verständnis auszuweiten. Generelle Möglichkeiten, ähnlich geartete Versorgungsszenarien zu realisieren, bestehen in der Kombination von Versorgungsstrategien über die Menge, Produktionsstufen etc.

Schwerpunkt der Planung der Ersatzteilversorgung bildet die Generierung derartiger Szenarien hinsichtlich des betrachteten Zielsystems. Die Vielzahl an Möglichkeiten zur Kombination sowie zu berücksichtigender Einflüsse in Bezug auf die gestellte Zielsetzung macht die Komplexität dieses Planungsproblems deutlich. Um diese Komplexität beherrschbar zu machen, werden strukturierte Vorgehensweisen vorgeschlagen, auf die nachstehend näher eingegangen wird.

2.2.3 Bestehende Konzepte und Ansätze zur Planung der Nachserienversorgung

In der gängigen Fachliteratur existieren umfangreiche Aufzeichnungen über übliche bzw. zielführende Ausprägungen von Versorgungsszenarien. Auf der einen Seite werden unternehmensinterne bzw. -spezifische Lösungen zur Realisierung der Ersatzteilversorgung dargestellt (Stark 2004; Meifarth, Weber, Bauer 2004). Auf der anderen Seite existieren unterschiedliche Ansätze, Konzepte und Vorgehensweisen, die eine Planung der Ersatzteilversorgung, d. h. die Bildung optimaler Versorgungsszenarien, unterstützen. Grundsätzlich werden qualitative und quantitative Herangehensweisen unterschieden. Zentrale Ansätze werden nachstehend kurz dargestellt.

Von Dombrowski wird eine ganzheitliche qualitative Planungssystematik vorgeschlagen, die sowohl Aspekte der Zukunftsgestaltung (Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005a) sowie der Vergangenheitsbewältigung (Dombrowski, Quantschnig 2007) umfasst. Im Kontext des Ersatzteilmanagements stehen Planung und Steuerung der Ersatzteilversorgung im Vordergrund, die unter festen Prämissen (Kontextvariablen) erfolgen. Dombrowski bezeichnet dieses Vorgehen als Vergangenheitsbewältigung und schlägt eine fünfstufige Vorgehensweise zur Planung und Steuerung der Ersatzteilversorgung vor (Abbildung 2-7).

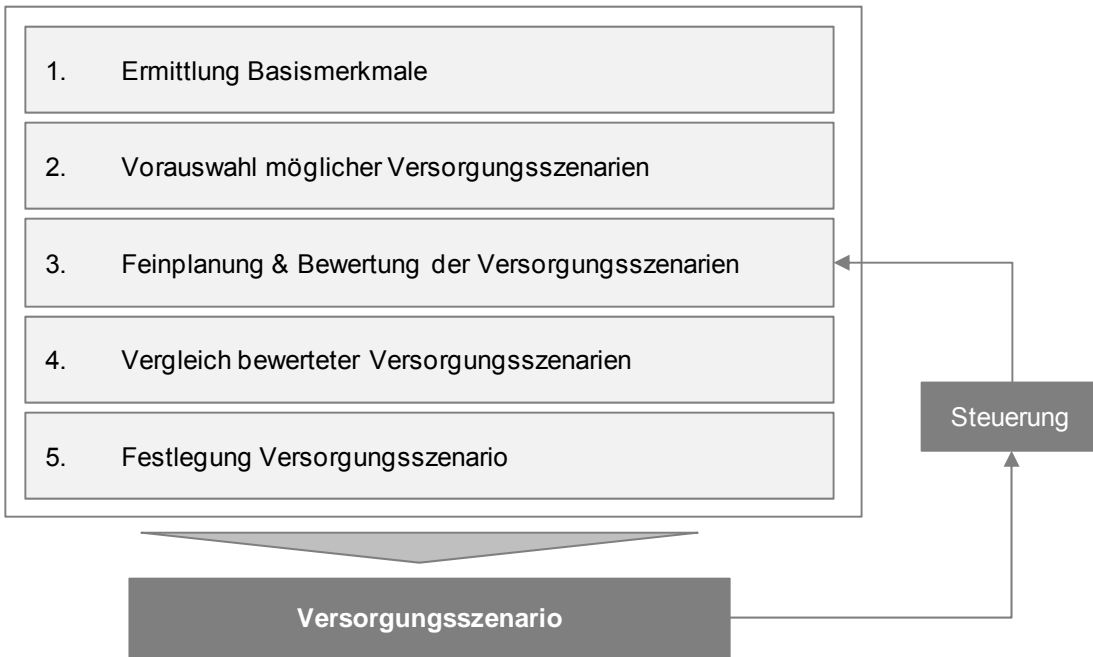


Abbildung 2-7 *Planungsprozess für die Nachserienversorgung mit elektronischen Komponenten (in Anlehnung an Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b, S. 199)*

Für die Planung der Nachserienversorgung werden zunächst Basismerkmale ermittelt. Diese beziehen sich vorrangig auf produktbezogene Merkmale wie z. B. die Lagerfähigkeit (Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b, S. 198ff.). Zudem sind u. a. der Versorgungszeitraum sowie eine Prognose zukünftiger Bedarfe anzugeben. Diese als Basismerkmale definierten Daten bestimmen die generelle Eignung einzelner Versorgungsstrategien zur Sicherstellung der Ersatzteilversorgung in der Nachserie. Der zweite Schritt der Planungssystematik umfasst eine Vorauswahl möglicher Versorgungsszenarien. Hierzu wird auf eine Auswahl vordefinierter „Standard-Versorgungsszenarien“ zurückgegriffen. Ein solches Szenario zeigt beispielhaft Abbildung 2-8.

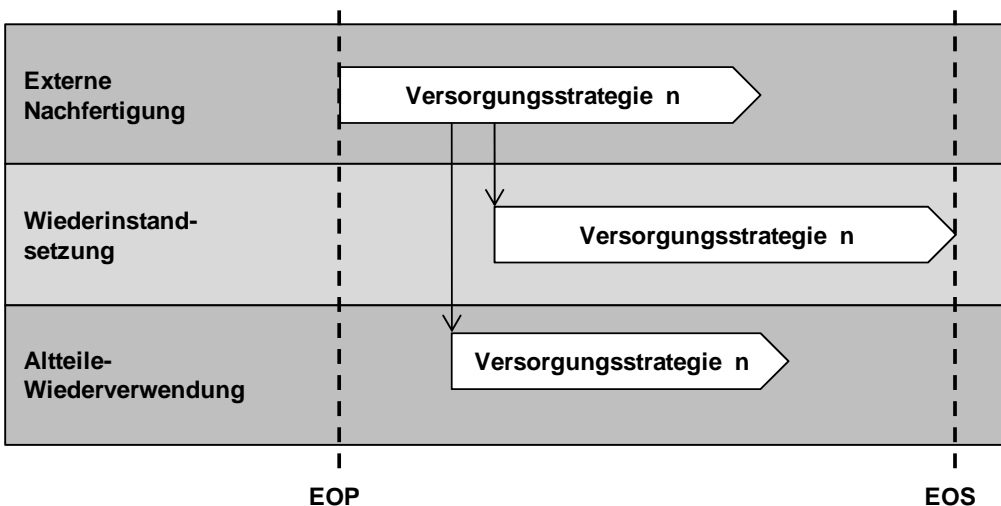


Abbildung 2-8 *Vordefiniertes Versorgungsszenario (s. Dombrowski, Bothe 2001)*

Eine Vorauswahl wird angestrebt, um die Komplexität der Planung durch die Eingrenzung möglicher Alternativen/Kombinationsmöglichkeiten zu reduzieren. In Rahmen der anschließenden Feinplanung werden die verbliebenen Versorgungsszenarien unter Berücksichtigung

der Zielgrößen (Kosten, Flexibilität, Risiko, Kundenbindung, vgl. Unterkapitel 2.1) detailliert analysiert, bewertet und verglichen, um ein Versorgungsszenario festzulegen. Da eine effiziente Nachserienversorgung nicht durch eine einmalige Planung und Implementierung des gewählten Versorgungsszenarios gewährleistet werden kann, ist im Rahmen der Planungssystematik eine stetige Steuerung der Nachserienversorgung vorgesehen. Durch Abgleich der ursprünglichen Planungsgrundlage (Sollwerte) mit den Istwerten resultieren steuernde Maßnahmen, z. B. eine Anpassung der Bedarfsprognose bei zu hoher Abweichung von den Prognosedaten. Eine angepasste Planungsgrundlage erfordert die erneute Feinplanung der Prozesse und kann ggf. eine Anpassung des Versorgungsszenarios nach sich ziehen. Es ist zu beachten, dass der dargestellte Planungsprozess abhängig vom betrachteten Produkt und unternehmensspezifischer Anforderungen anzupassen ist. Im Rahmen der oben bereits angesprochenen Zukunftsgestaltung und einem funktionsfähigen Wissensmanagement sollte zudem angestrebt werden, die im Rahmen der Planung und Steuerung der Nachserie gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse frühzeitig in die Planung nachfolgender Produktgenerationen einzubeziehen.

Das vom International Performance Research Institute (IPRI) in Kooperation mit dem Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) durchgeführte Forschungsvorhaben „Geregelte Ersatzteile-Bedarfsdeckungs-Strategien (GET)“ (Förderungszeitraum bis 31.03.2010) verfolgt zur Planung und Steuerung der Nachserienversorgung einen Ansatz zur systematischen Auswahl und Anpassung von Strategien zur Deckung von Ersatzteilbedarfen (vgl. Abbildung 2-9). Dieser fokussiert eine aufwandsarme, regelkreisbasierte Überprüfungsmethode für kleine und mittelständige Unternehmen zur Auswahl und kontinuierlichen Anpassung von Versorgungsstrategien (Knigge, Rosentritt 2009, S. 1149ff.).

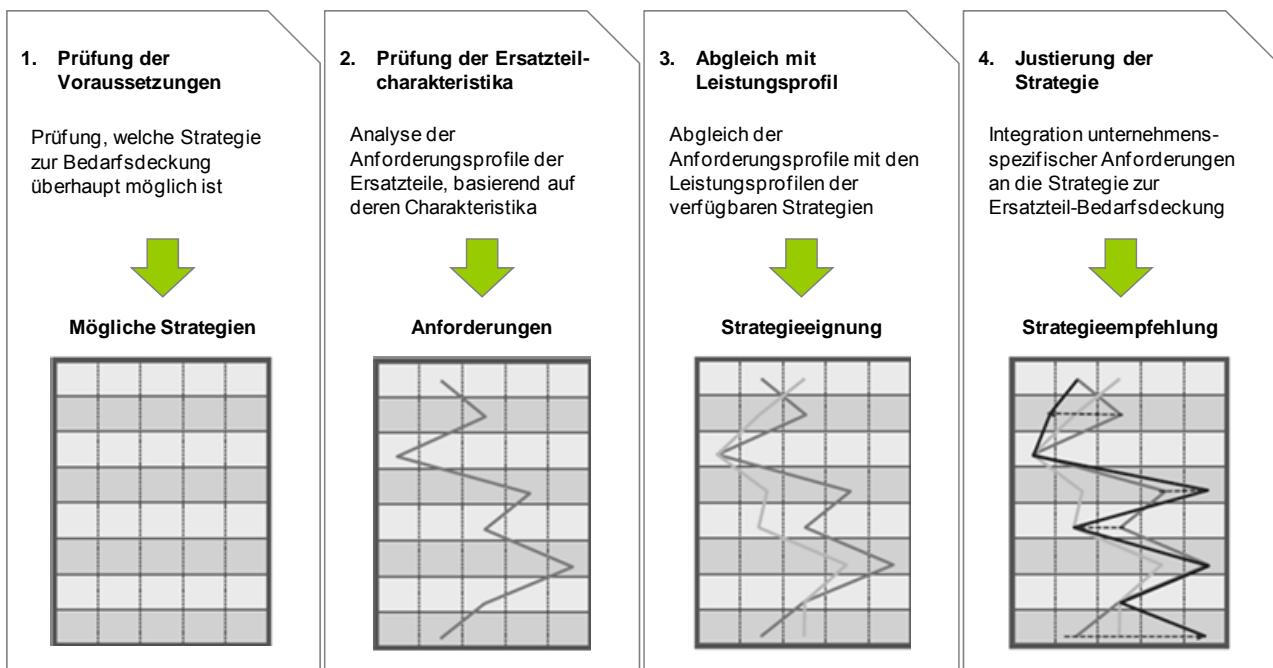


Abbildung 2-9 *Ansatz zur systematischen Auswahl und Anpassung von Strategien zur Deckung von Ersatzteilbedarfen (in Anlehnung an Knigge, Rosentritt 2009)*

Knigge und Rosentritt systematisieren den ganzheitlichen Betrachtungsansatz durch einen vierstufigen Planungszyklus (vgl. hierzu Abbildung 2-9). Die iterative Anwendung ermöglicht die Steuerung und dynamische Anpassung der Strategien. Ausgehend von den Produkteigenschaften und weiteren Charakteristika, werden die Ersatzteile zunächst spezifiziert und in zwei grundlegende Merkmalsgruppen differenziert. Die erste Merkmalsgruppe enthält Ausschlusskriterien für einzelne Strategien und ermöglicht eine Prüfung der Voraussetzungen und Vorauswahl möglicher Strategien. Produkte, die z. B. nicht zerstörungsfrei demontiert werden können, verhindern eine Ersatzteilversorgung durch Wiederinstandsetzung. Merkmale dieser Kategorie (Lager-, Demontage-, Reparaturfähigkeit) verringern die Komplexität der Planung und schließen entsprechende Strategien für eine weitere Betrachtung aus. Die zweite Merkmalsgruppe umfasst Charakteristika, die verschiedene Versorgungsstrategien begünstigen oder benachteiligen. Es wird zwischen statischen, wie beispielsweise dem Standardisierungsgrad und zeitlich veränderlichen Merkmalen, wie der Bedarfsprognose unterschieden. Aus den erfassten Merkmalen wird zusammen mit den Zielen des Ersatzteilmanagements, den Anforderungen an die Versorgungsstrategie und allgemeinen Unternehmenszielen ein Anforderungsprofil der Ersatzteils bzw. der Ersatzteilgruppe gebildet. In einem dritten Planungsschritt wird dieses Anforderungsprofil mithilfe eines morphologischen Kastens den spezifischen Leistungsprofilen der einzelnen Versorgungsstrategien gegenübergestellt und verglichen. Die Auswahl der Strategie erfolgt anhand des Grades, mit dem eine Versorgungsstrategie oder ein Versorgungsszenario das erstellte Anforderungsprofil erfüllt. Durch eine Wiederholung des Planungszyklus kann die Auswahl der Strategie(-kombination) jederzeit angepasst oder erneuert werden. Die zuvor analysierten zeitlich veränderlichen Merkmale bilden ausschlaggebende Einflussgrößen. Durch Vergleich verschiedener Versorgungsstrategien im Hinblick auf Einnahmen und Ausgaben, Chancen und Risiken sowie nicht-monetären Potenzialen (ganzheitlich bewertetes Anforderungsprofil) soll mit dieser Planungssystematik für jedes Ersatzteil in jeder Lebenszyklusphase des Primärproduktes eine geeignete Bedarfsdeckungsstrategie ausgewählt werden und zugleich neue Versorgungsstrategien und -szenarien entwickelt werden. Die Projektergebnisse sind derzeit noch nicht veröffentlicht, so dass eine detaillierte Betrachtung und abschließende Bewertung nicht möglich ist. Weitere qualitative Ansätze zur Planung der Nachserienversorgung geben Schröter durch die Entwicklung eines „Strategischen Ersatzteilmanagements in Closed-Loop Supply Chains“ (Schröter 2006), Hesselbach durch „Life Cycle Management als Ansatz für eine flexible Gestaltung der Ersatzteilversorgung“ (Hesselbach u. a. 2004, S. 86ff.) etc.

Die zuvor dargestellten Konzepte beschreiben allgemeingültige Vorgehensweisen, die unabhängig von der betrachteten Branche bzw. Ersatzteilen eine Planung von Versorgungsszenarien unter Berücksichtigung aller Strategien ermöglichen. Im Fokus der Betrachtungen stehen vielfach Überlegungen zum gesamten Lebenszyklus. Des Weiteren existieren qualitative branchenspezifische Ansätze, die die Möglichkeit bieten, die Planung der Nachserienversorgung weiter zu fokussieren und Versorgungsszenarien für bestimmte Ersatzteilgruppen zu generieren (unter Beachtung aller Versorgungsstrategien).

Hagen entwickelt in diesem Zusammenhang in seiner Dissertation ein „Methoden, Daten- und Prozessmodell für das Ersatzteilmanagement in der Automobilelektronik“ (Hagen 2003). Die Zielsetzung seiner Arbeit ist vielschichtig, wobei drei Hauptziele zu erkennen sind. Zum einen wird ein herstellerseitiges Ersatzteilmanagement für die Kfz-Elektronik ausgestaltet und formal in die Unternehmensstrukturen und -prozesse eingebettet. Hierzu werden methodische Ansätze, Handlungsspielräume und Anknüpfungspunkte erarbeitet. Das zweite Ziel besteht in der Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise inkl. Modellierungstechniken im Ersatzteilmanagement. Das dritte Ziel ist in der Konzeption und Bewertung eines konkreten Support Systems zu sehen, welches das Ersatzteilmanagement mit der zentralen Aufgabe der Planung der Ersatzteilversorgung optimal unterstützt. Hierzu wird das Ersatzteilwesen in der Kfz-Elektronik aus verschiedenen Sichtweisen intensiv beleuchtet. Auf Basis des Systems Engineering werden für das Ersatzteilwesen Ziel-, Objekt-, Prozess- und Handlungssysteme unterschieden. Zudem werden Anforderungen bestimmt, die durch das Supply Chain Management an das Ersatzteilwesen gestellt werden. Durch die Betrachtung als Lebenszyklusmodell werden die zeitlichen Abhängigkeiten im Ersatzteilwesen strukturiert erfasst. Die Modellierung des Ersatzteilmanagements erfolgt durch die Modellierungstechnik Unified Modelling Language (UML). Die Erarbeitung der zuvor genannten Untersuchungsaspekte erfolgt konkret bezogen auf einen Industriezweig, die modellierte Vorgehensweise und alle in diesem Kontext zu berücksichtigenden Entscheidungen sind jedoch allgemein anwendbar.

Bothe (Bothe 2003) entwickelt eine lebenszyklusorientierte Methodik zur Planung und Steuerung der Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienfertigung. Die Methode beschreibt in diesem Zusammenhang nicht einen zentral durchzuführenden Planungsablauf, sondern vielmehr die über den gesamten Lebenszyklus verteilten relevanten Aktivitäten und unterstützenden Prozesse, die in den jeweiligen Lebenszyklusphasen systematisch zu implementieren und durch Prozessbeschreibungen festzulegen sind. Für diese Zielsetzung werden Einflussfaktoren auf die Nachserienversorgung anhand einer lebenszyklusübergreifenden Analyse bestimmt, Ausgangssituation und wesentliche Grundlagen zum Thema erarbeitet. Zudem werden ein an den Kontext der Ersatzteilversorgung angepasstes Lebenszyklusmodell entwickelt, verschiedene Versorgungsstrategien und für die Nachserie relevante technologische Aspekte elektronischer Bauelemente sowie die Bedarfsprognose für Ersatzteile beleuchtet. Anschließend werden diverse Planungsziele für das Ersatzteilmanagement identifiziert und jeweils spezifische Bewertungsverfahren erarbeitet und miteinander verglichen, z. B. werden für das Planungsziel der Kostenminimierung verschiedene Verfahren zur Kostenrechnung und deren Eignung für den Kontext erörtert. Diese Aspekte werden in Form von Bausteinen zu einer zusammenhängenden Methode komprimiert, welche systematisch die notwendigen Schritte zur Beherrschung der Planung und Steuerung der Ersatzteilversorgung darstellt.

Hagen (Hagen 2003) und Bothe (Bothe 2003) zeigen qualitative branchenspezifische Ansätze, die eine umfassende Analyse des Ersatzteilmanagements und Planung der Ersatzteilversorgung speziell im Kontext der Automobilelektronik aufzeigen. Des Weiteren bestehen Ansätze, die die Potenziale ausgewählter Versorgungsstrategien näher beleuchten und weiter detaillie-

ren. Diese Ansätze sind anwendungsorientiert und zeigen konkrete Handlungsempfehlungen für gegebene spezifische Problemstellungen.

Durch das Projekt ReECar (geleitet durch das Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM) wird ein Ansatz aufgezeigt, die Kfz-Elektronik durch Einsatz von Gebrauchtteilen nachhaltig zu gestalten. Im Rahmen einer Fallstudie wird eine systematische Methode zur Auswahl einer nachhaltigen Ersatzteilversorgungsstrategie unter Berücksichtigung der Option Wiederverwendung dargestellt. ReECar stellt keine methodische Vorgehensweise im oben aufgezeigten Sinn dar, sondern erörtert differenziert, welche Herausforderungen im betrachteten Kontext zu beachten sind und analysiert diese umfangreich. Ausgangspunkt bildet die Überlegung, dass die verschiedenen Ersatzteilversorgungsstrategien einen unterschiedlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit liefern und durch verschiedene Aspekte der Zuverlässigkeit und durch spezifische Anforderungen an die Logistik gekennzeichnet sind. Unterschiedliche gebrauchte Baugruppen werden hinsichtlich ihrer Abnutzung und Funktionsfähigkeit untersucht, da die Kenntnis über die Zuverlässigkeit essentiell für den Einsatz von gebrauchten Baugruppen in der Ersatzteilversorgung ist. Die Integration gebrauchter Baugruppen in ein Ersatzteilversorgungs-Programm erfordert spezielle Logistik-Konzepte, weshalb ein System zum Datenaustausch zwischen Herstellern, Servicewerkstätten und Demontagebetrieben unter Einsatz von Standard-Dateninterfaces vorgestellt wird. Weiterhin wird die Verfügbarkeit von Gebrauchtteilen sowie der Zeitaufwand und Kosten der Demontage, Sammlung und Redistribution erörtert. Im Rahmen von ReECar wird die Versorgungsstrategie Wiederverwendung und gegebene Herausforderungen als geeignete ergänzende Option zur Nachserienversorgung im Kontext der Automobilelektronik herausgearbeitet und detailliert erörtert (Friedrichs 2008, Bochow-Neß 2008, Böckhorst 2008, Hohaus, Stobbe 2008, Kaerger 2008, Knode 2008, Mente, Kleikemper, Ernst 2008, Oberender 2008a, Oberender 2008b). Des Weiteren bestehen in diesem Kontext verschiedene vertiefende Betrachtungen zu einzelnen Strategien, z. B. zum Outsourcing (Dombrowski, Weckenborg 2009; Dombrowski, Schulze 2008b).

Diesen Ansätzen ist gemein, dass eine Typologie/Klassifizierung der Ersatzteile vorgenommen wird, zum einen um eine Auswahl bzw. Einschränkung möglicher Strategien vorzunehmen oder zum anderen die Eignung/Größen zur Ausgestaltung verschiedener Strategien zu beschreiben. Analog bilden diese Typologien bei auf gewisse Strategien beschränkten Ansätzen Voraussetzungen, unter denen eine Anwendung des jeweils dargestellten Planungsansatzes möglich ist.

Neben den auszugsweise dargestellten qualitativen Ansätzen zur Lösung des Ersatzteilversorgungsproblems in der Nachserienphase existieren unterschiedliche quantitative Ansätze, durch die eine Planung der Nachserienversorgung unterstützt wird. In diesem Zusammenhang kommen zum einen Optimierungs- bzw. Entscheidungsmodelle zum Einsatz. Zum anderen werden spezifische Methoden ausgewählt und im Rahmen des jeweils betrachteten Kontexts adaptiert. Der Umfang vorhandener quantitativer Verfahren im Rahmen der Ersatzteilversorgung ist deutlich geringer, als der der qualitativen Verfahren. Eine fokussierte Zusammenstellung und Ausarbeitung aller in den qualitativen Verfahren beschreibenden und erfassten Einflussvariablen in einem umfassenden quantitativen Modell ist in seltenen und spezifischen

Fällen vorgenommen worden. Im Folgenden werden exemplarisch verschiedene Ansatzpunkte derartiger Optimierungs- und Entscheidungsmodelle beschrieben und erläutert.

Im Kontext der Nachserienversorgung eingesetzte Optimierungs- und Entscheidungsmodelle bezogen sich zunächst auf die Bestimmung der Serienabschlusslosgröße. Der Ansatz von Fortuin (Fortuin 1980) ermittelt diese unter Berücksichtigung verschiedener Servicegrade. Grundlegende Annahme bildet eine exponentiell fallende stochastische Nachfrage nach Ersatzteilen. Hierauf aufbauend werden weitere Optionen in das Modell integriert. Zunächst wird das Modell um die Möglichkeit zur Aufarbeitung von Altteilen erweitert. Das Modell ermöglicht die Planung der Nachserie durch Festlegung eines Abschlussloses und wieder zu verwendender bzw. zu reparierender Altprodukte. Die Lagerhaltung von Altprodukten wird nicht berücksichtigt (Teunter, Fortuin 1997). In einer Modellerweiterung wird daher eine Regel zur Reduzierung möglicherweise zu hoher Altproduktbestände integriert. Zudem entwickeln Teunter/Fortuin Prognoseverfahren für die Parameter der Nachfrageverteilungen. Die hierzu verwendeten Algorithmen liefern unter Beachtung verschiedener vergangenheitsbezogener Daten eine nach Kosten und Relevanz gewichtete Prognose der Bedarfe (Teunter, Fortuin 1997) und den optimierten Zeitpunkt zur Produktion eines Abschlussloses.

Schröter (Schröter, Spengler 2003; Schröter 2006) führt auf Basis eines Entscheidungsmodells einen systematischen Vergleich der zur Ersatzteilversorgung möglichen Strategien durch, dieser ermöglicht allerdings keine Generierung und Auswahl einer optimalen Methode zur Gewährleistung der Ersatzteilversorgung.

Inderfurth und Mukherjee (Inderfurth, Mukherjee 2008) beschreiben das aufgezeigte stochastische Ersatzteilversorgungsproblem unter Einbeziehung aller Optionen als stochastisches dynamisches Optimierungsproblem und schlagen einen einfachen heuristischen Lösungsansatz vor. Inderfurth nutzt eine Variante dieser Modellierung und ermittelt hierauf aufbauend numerisch optimale Versorgungsentscheidungen, die sowohl die kombinierte Anwendung von Versorgungsstrategien als auch den isolierten Einsatz einzelner Versorgungsstrategien umfassen. Das Planungsziel besteht in der Minimierung der erwarteten Kosten, die durch die Maßnahmen der Ersatzteilbeschaffung, durch Lagerhaltung und eventuelle Fehlmengen während der Serviceperiode auftreten können (Inderfurth, Kleber 2008, S. 6f.).

Die quantitative Betrachtung der Nachserienversorgung umfasst analog zu qualitativen Verfahren ebenfalls branchenspezifische Ansätze, die teilweise das gesamte Spektrum bzw. ausgewählte Versorgungsstrategien berücksichtigen. Einen branchen- bzw. unternehmensspezifischen, quantitativen Ansatz bildet das vom VDA Ausschuss Aftermarket entwickelte MS-Excel-basierte Werkzeug zur Strategieentscheidung und Steuerung der Nachserienversorgung. In einem zweistufigen Planungsprozess werden hier verschiedene Versorgungsszenarien ausgewählt und strukturiert. Im ersten Planungsschritt wird unter Berücksichtigung der für den Anwendungsfall gegebenen Möglichkeit zum Einsatz kompatibler Teile, Lagerung (Lagerfähigkeit) und Aufarbeitbarkeit der Produkte ein Entscheidungsfeld aufgespannt, durch das die generelle Kombination der Versorgungsstrategien Nachfertigung, Nutzung kompatibler Teile und der Wiederinstandsetzung ermittelt werden kann. Realisierbare Kombinationen werden in

einem zweiten Planungsschritt bezüglich Abfolge und Einsatzzeit der einzelnen Versorgungsstrategien optimiert. Diese Optimierung erfolgt auf Basis der jeweils erforderlichen Investitionshöhe und wird mit einer MS-Excel-basierten Berechnungsgrundlage unterstützt (VDA-Ausschuss Aftermarket 2006).

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass alle Ansätze unterschiedliche Schwerpunkte in Bezug auf die betrachteten Versorgungsstrategien sowie die gewünschten Zielgrößen verfolgen. Jedoch kann unterschieden werden, inwieweit durch die einzelnen Ansätze eine quantitative oder qualitative Entscheidungsgrundlage generiert wird. Zudem kann der Detaillierungsgrad der einzelnen Verfahren differenziert werden. Einige Verfahren fokussieren die allgemeine Auswahl von Versorgungsstrategien bzw. die Bildung von Versorgungsszenarien i. e. S., während andere versuchen, bereits gewählte Strategien zu detaillieren und zu optimieren. Der Umfang bereits bestehender Untersuchungen und die Breite des Anwendungsfeldes verdeutlichen das Erfordernis zur tiefgreifenden Analyse der Problemstellung, bestimmte Zielsetzungen und ausgewählte Strategien zu fokussieren.

Eine detaillierte Betrachtung von Produktions- und Bevorratungsstrategien auf Basis von Produktionsstufen unter Ausgabe quantitativer kostenoptimaler Ergebnisse ist im Kontext der Nachserienversorgung derzeit nicht gegeben. Analog zu den dargestellten Ansätzen werden durch die im Rahmen des Forschungsvorhabens angestrebte Planung der Ersatzteilversorgung daher diese Strategien und Zielsetzungen fokussiert. Zusammenfassen besteht das Ziel in der Analyse und Optimierung von Produktions- und Bevorratungsstrategien hinsichtlich der entstehenden Produktions- und Logistikkosten. Zusätzlich werden die Optionen Integration in die laufende Fertigung und eine Berücksichtigung von Produktionsstufen untersucht (siehe Kapitel 1). Die zuvor aufgezeigten Herausforderungen erschweren die Generierung kostenoptimaler Strategien und repräsentieren allgemein die Kontextvariablen des zu betrachtenden Planungsproblems.

3 Empirische Erhebung zur Nachserienversorgung in der Industrie

3.1 Ziel der Erhebung

Vor dem Hintergrund der Auswahl einer kostenoptimalen Strategie wird durch die empirische Erhebung der Ist-Zustand der Ersatzteilversorgung in der Industrie aufgenommen. Zentrales Ziel ist die Identifikation bestehender Konzepte zur Sicherstellung der Nachserienversorgung mit Ersatzteilen. Zudem sollen in der Literatur nicht beschriebene Strategien identifiziert und folglich Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit aufgedeckt werden. Schwerpunkt der Erhebung bildet die Nachserienproduktion bzw. Bevorratung von Ersatzteilen nach End of Production. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise von Interesse, inwieweit Ansatzpunkte bestehen, die Produktion von Ersatzteilbedarfe in die laufende Serienproduktion ähnlicher Produkte zu integrieren, um die bestehende Produktionsumgebung und damit Synergieeffekte zu nutzen.

3.2 Allgemeine Daten und Struktur der Erhebung

Die Erhebung erfolgte in zwei Intervallen. In der ersten Phase ist interessierten Unternehmen der Fragebogen (siehe Anhang A, Unterkapitel 9.1) auf der Internet-Plattform Onlineforschung bereitgestellt worden. Diese sind über das Netzwerk Xing kontaktiert worden. In der zweiten Phase ist ausgesuchten Unternehmen, z. B. des projektbegleitenden Ausschusses, der Fragebogen zugesandt worden. In Summe sind 602 Personen angeschrieben worden, von denen 76 den Fragebogen vollständig beantworteten (Rückläuferquote 13%). Thematisch gliedert sich der Fragebogen in fünf unterschiedliche Abschnitte, durch die die im Kontext der Nachserienversorgung relevanten Aspekte abgefragt wurden. Diese sind nachfolgend kurz dargestellt (vgl. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1 *Aufbau der empirischen Erhebung*

Teil A	Allgemeine Unternehmensdaten
	Klassifizierung der teilnehmenden Unternehmen durch Abfrage allgemeiner Daten wie z. B. der Branchenzugehörigkeit, des Jahresumsatzes oder der Anzahl beschäftigter Mitarbeiter.
Teil B	Fragen zur laufenden Produktion
	Beschreibung der bestehenden Produktionsbedingungen für Serien- und Ersatzteile.
Teil C	Fragen zu Konzepten der Ersatzteilversorgung
	Analyse der in Unternehmen bestehenden Versorgungskonzepte und -szenarien zur Sicherung der Nachserienversorgung.
Teil D	Fragen zur internen Nachfertigung von Ersatzteilen
	Erfassung der von Unternehmen verfolgten Strategien zur internen Nachfertigung (Berücksichtigung betroffener Produktgruppen, verwendeter Kombinationen von Strategien, Gründe für eine Kombination etc.).
Teil E	Fragen zur Planung der Nachserienversorgung
	Untersuchung der Bewertungskonzepte zur Planung und Steuerung der Nachserienversorgung, speziell unter Berücksichtigung der maßgeblich zu berücksichtigenden Bewertungsparameter.

3.3 Auswertung der Erhebung

Die Auswertung der Erhebung erfolgt prozentual, wobei alle Angaben sich auf die jeweilige Anzahl der Antworten a beziehen. Abhängig von der Struktur der Fragen übersteigt die Summe der gegebenen Antworten a den Stichprobenumfang n des jeweiligen Abschnitts (Mehrfachauswahl; $a > n$) oder entspricht diesem (Einfachauswahl, $a = n$). Aus Textfeldern resultierende Antworten wurden auf Grund stark streuender Antworten nicht klassifiziert, die gewonnenen Informationen dienen jedoch zur Einordnung und Bewertung der vorhandenen Daten. Von Unternehmen ausgelassene Fragen sind in der Kategorie „keine Angabe“ zusammengefasst. Umfrage und Auswertung erfolgten anonymisiert. Personenbezogene Daten dienen der Zustellung der Umfrageergebnisse.

3.3.1 Allgemeine Unternehmensdaten (Teil A)

Nachstehender Abschnitt gibt einen Überblick über die befragten Unternehmen und bildet die Grundlage zur branchenspezifischen Betrachtung der gewonnenen Erkenntnisse. Abbildung 3-1 zeigt Branchenzugehörigkeit und nachfragende Branchen der Unternehmen. Knapp 70 % der befragten Unternehmen ordnen sich gemäß der Klassifizierung produzierender Unternehmen des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) der Automobil- oder Maschinenbauindustrie zu. Die hohe Beteiligung von Unternehmen des Automobil- und Maschinenbaus verdeutlicht das große Interesse und die Relevanz der Thematik innerhalb der Kernbranchen in Deutschland. Die hergestellten Produkte werden jedoch von Unternehmen aus allen Branchen abgenommen (19,5 % Automobilindustrie).

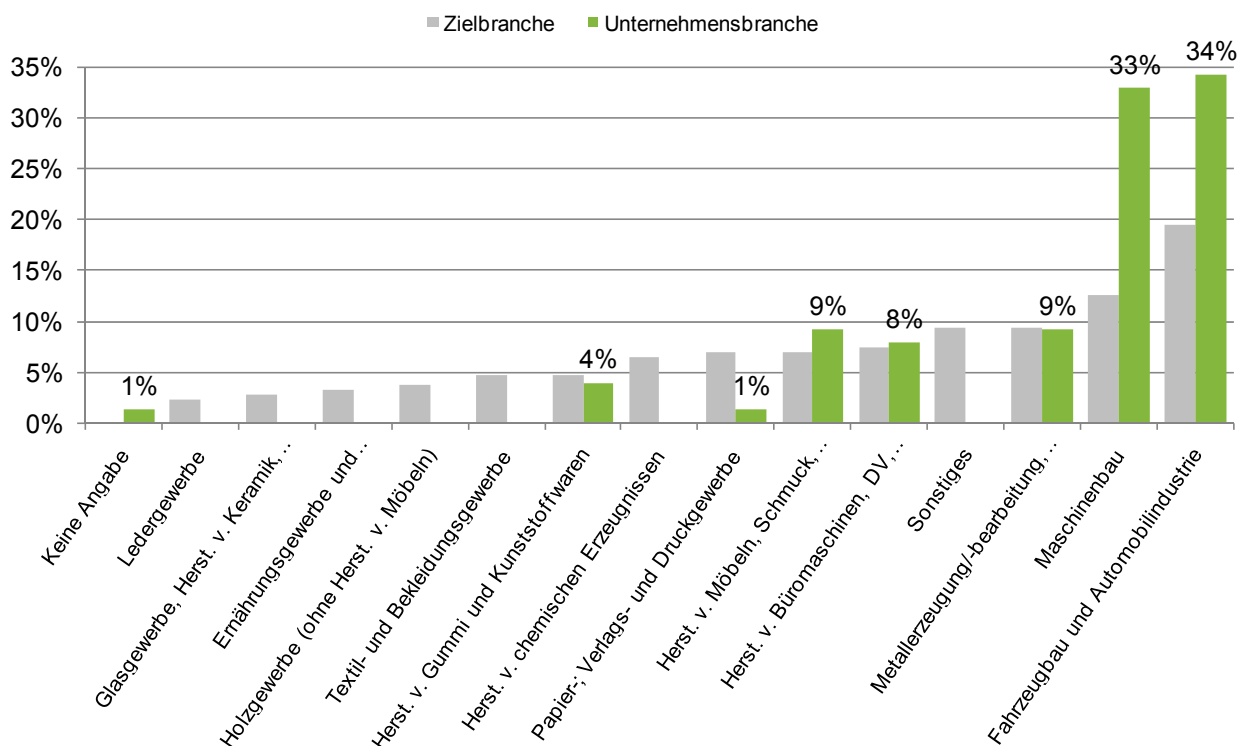


Abbildung 3-1 Unternehmens- und Zielbranche ($n=76$; $a_{\text{Branche}}=76$; $a_{\text{Zielbranche}}=215$)

Das Produktportfolio der Unternehmen sollte durch Angabe der Anzahl der hergestellten bzw. verkauften Produkte erfasst werden. Für die Abfrage ist eine statistisch valide Auswertung nicht möglich, da die Streuung der gemachten Angaben zu hoch ist. Das Antwortspektrum variiert zwischen einteiligen Erzeugnissen (z. B. Gussteilen) und einem Kunden-Bestell-Portfolio von 400.000 Positionen. Zudem verhindert die inhaltliche Streuung der Antworten eine adäquate Bewertung. Es wurden Produktgruppen, -varianten, Materiallistenpositionen und weitere Angaben gemacht, die auf ein unterschiedliches Verständnis der Fragestellung hindeuten. Die ausgewerteten Angaben dienen der Einordnung der Unternehmen in den Gesamtkontext und zeigen die unternehmenseigene Definition des Produktspektrums.

Die Größe der teilnehmenden Unternehmen ist in Anlehnung an die Definitionen der Industriel- len Gemeinschaftsforschung (IGF) und des Instituts für Mittelstandsforschung (IfM) auf Basis der Kriterien „Anzahl beschäftigter Mitarbeiter“ und „Jahresumsatz“ bestimmt worden. Mit 21 % der befragten Unternehmen, die bis zu 500 Mitarbeiter beschäftigen und einen jährlichen Um- satz kleiner 50 Millionen Euro generieren, beteiligte sich ein signifikanter Anteil kleiner und mittelständiger Unternehmen an der Befragung.

3.3.2 Klassifizierung der laufenden Produktion (Teil B)

Die Analyse der laufenden Produktion der befragten Unternehmen gibt Aufschluss über die in der Serienphase (s. Unterkapitel 2.1) gegebenen Randbedingungen der Produktion. Zentrale Kenngrößen bilden der zu fertigende Produktmix und die zu Grunde liegende Organisation der Fertigung, charakterisiert durch Fertigungsart und -ablaufart (Wiendahl 2008, S. 29ff. und 40). Basierend auf drei Erzeugnisklassen (Glaser, Geiger 1992, S. 383f.; Schuh, Schmidt 2006) ist der Produktmix der Unternehmen wie folgt klassifiziert worden:

- Einteilige Erzeugnisse, bestehend aus einer Stücklistenposition
- Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur, bestehend aus 2 bis 199 Stücklistenpo- sitionen
- Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur, bestehend aus mehr als 200 Stücklis- tenpositionen.

84 % der Unternehmen produzieren mehrteilige Erzeugnisse (in Kombination mit einteiligen Erzeugnissen oder ausschließlich), wobei knapp 53 % der Produkte einfach-strukturiert und gut 47 % der Produkte komplex-strukturiert sind.

Zur Differenzierung der Fertigungsart ordneten sich die Unternehmen der Einzelfertigung (Produktion kleinster Mengen individueller Erzeugnisse), der Kleinserienfertigung (Produktion kleiner, begrenzter Mengen gleichartiger/individueller Erzeugnisse), der Großserienfertigung (Produktion großer, begrenzter Mengen gleichartiger Erzeugnisse) oder der Massenfertigung (Produktion großer Mengen identischer Erzeugnisse) zu (Wiendahl 2008, S. 40). Analog ist die Ablaufart der Fertigung in Anlehnung an die allgemeine Definition nach Eversheim in Baustel- lenfertigung, Werkstattfertigung, Gruppenfertigung und Fließfertigung beschrieben worden (Eversheim 1989). Abbildung 3-2 setzt die genannten Fertigungsarten in Relation zu den ge- nannten Fertigungsablaufarten.

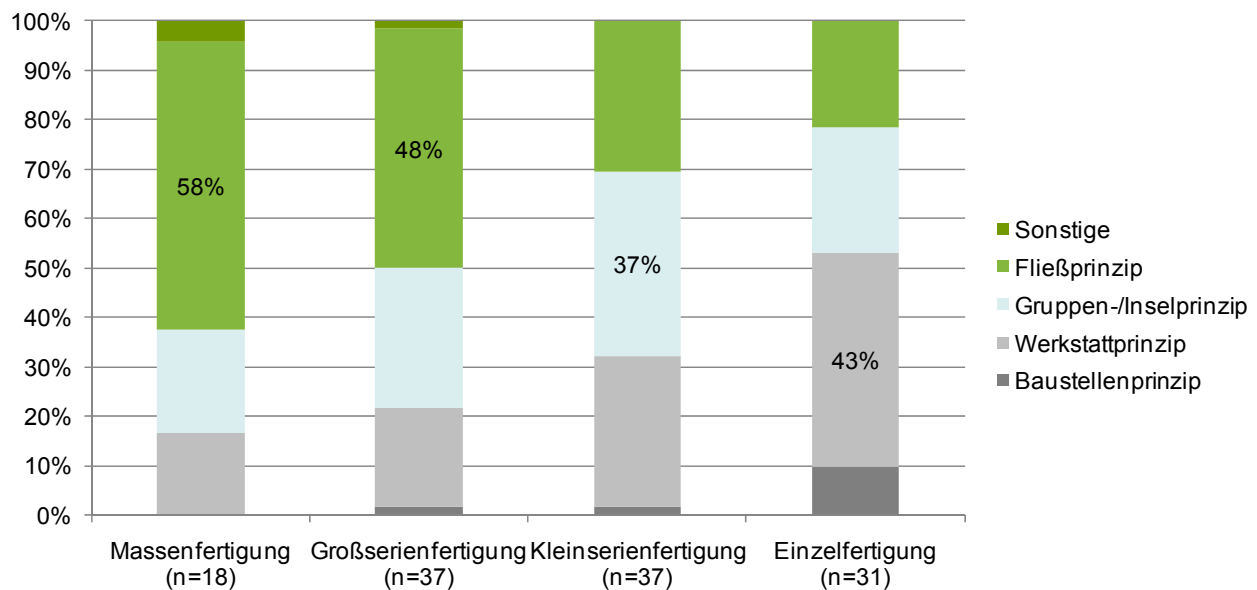


Abbildung 3-2 Kombination aus Fertigungsart und -prinzip (n=76)

Ersichtlich ist, dass der Anteil flexibler Produktionsprinzipien (Gruppen-/Inselfertigung, Werkstattfertigung) mit der Individualität des Produktspektrums und der entsprechend geringen Wiederholhäufigkeit (Einzelfertigung, Kleinserienfertigung) zunimmt. Die Produktion ist den Produkten folglich spezifisch angepasst, bspw. durch Automatisierungslösungen, sofern eine große Wiederholhäufigkeit/Ausbringungsmenge gegeben ist. Die in den Unternehmen vorgefundene Organisation der Produktion ist Abbild der produzierenden Unternehmen in Deutschland und bildet Ausgangspunkt und Rahmenbedingung für die angestrebte Integration der Ersatzteilbedarfe in die laufende Fertigung.

3.3.3 Konzepte der Ersatzteilversorgung (Teil C)

Zentrale Größen zur Beschreibung von Konzepten im Kontext der Ersatzteilversorgung bilden sowohl Gründe und Zeithorizont für die Ersatzteilversorgung als auch die genutzten Versorgungsstrategien und ihre Kombination zu Versorgungsszenarien (siehe Abschnitt 2.2.1 und Abschnitt 2.2.2). Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Erkenntnisse und Handlungsweisen in der Industrie werden nachstehend kurz beschrieben.

Die Ersatzteilversorgung in den befragten Unternehmen umfasst analog zum Produktmix der laufenden Serienfertigung mit 70 % vorrangig mehrteilig und komplex-strukturiert Ersatzteile und ist tendenziell langfristig (Zeithorizonte größer 10 Jahre) ausgelegt. Lediglich 12,6 % der Unternehmen realisieren eine Versorgung mit Ersatzteilen über einen Zeitraum kleiner 5 Jahren, 28,4 % der Unternehmen über 20 Jahre. Die Zeit, die Unternehmen für die Ersatzteilversorgung nach End of Production vorsehen, wird kurzfristig vermehrt aus wirtschaftlichen Gründen, d. h. zur Stärkung der Kundenbindung oder zur Nutzung von Umsatzchancen, realisiert. Bei einer langfristigen Ersatzteilversorgung von über 10 Jahren sind maßgebliche Gründe für eine Ersatzteilversorgung in der gesetzlichen oder vertraglichen Verpflichtung der Unternehmen zu sehen. Insbesondere Lieferverträge innerhalb der beiden stark vertretenden Kernbranchen (Automobil- und Maschinenbauindustrie, vgl. hierzu 3.3.1) führen in der Industrie zu langen Versorgungszeiträumen und folglich langen Planungshorizonten.

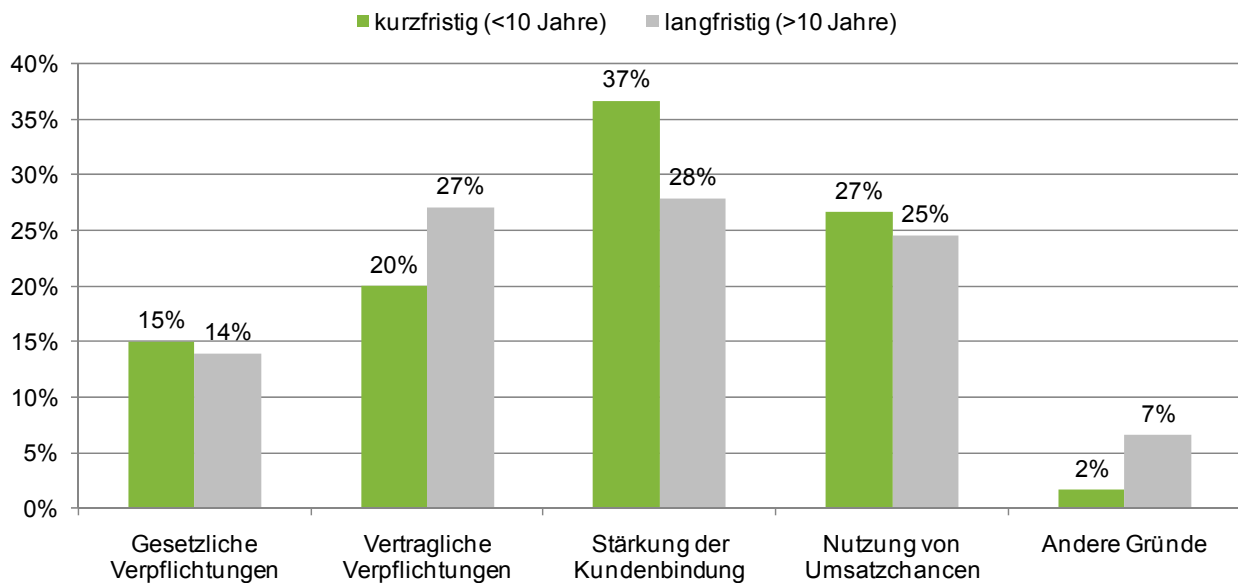


Abbildung 3-3 Zeithorizonte und Gründe für die Ersatzteilversorgung (n=64; a_{kurzfristig}=60; a_{langfristig}=122)

Zur Sicherung der Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase werden von den befragten Unternehmen die in Abschnitt 2.2.2 bereits theoretisch erläuterten Versorgungsstrategien herangezogen, unternehmens- und produktspezifisch angepasst und zu Versorgungsszenarien kombiniert. Die Relevanz der einzelnen Strategien zeigt Abbildung 3-4. Die Strategien Nachfertigung und Endbevorratung bilden mit 59 % den Hauptanteil der genutzten Normstrategien. Der größte Anteil liegt mit 25 % auf der Nutzung interner Nachfertigung, welche daher den wichtigsten Ansatz innerhalb der Versorgungsstrategien darstellt.

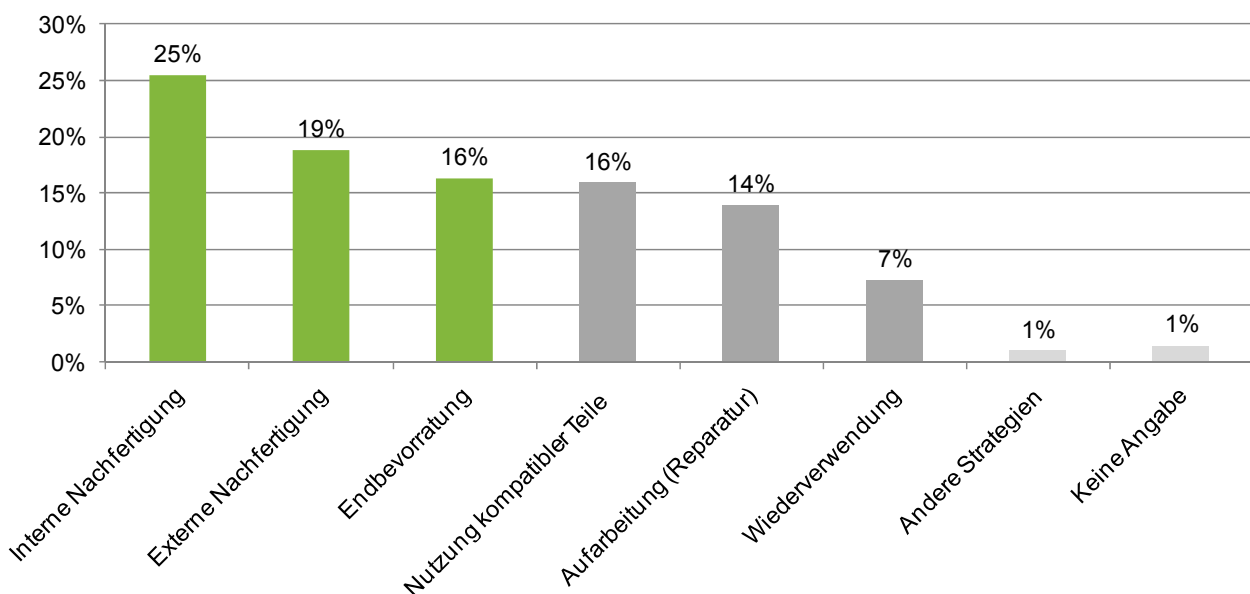


Abbildung 3-4 Anteil der Normstrategien zur Ersatzteilversorgung in der Industrie (n=64; a=208)

Zur Sicherstellung der Ersatzteilversorgung in der Nachserie und Erfüllung verschiedener bzw. divergierender Zielkriterien wird in der Industrie zu 86 % eine Kombination von Strategien zu Versorgungsszenarien vorgenommen. 14 % der Unternehmen bilden entsprechend keine Versorgungsszenarien, wobei der ausschlaggebende Teil dieser Unternehmen ausschließlich intern nachfertigt (11 % von 14 %). Zudem unterstreicht der Anteil der internen Nachfertigung

von 82 % an allen Kombinationsmöglichkeiten Relevanz und Potenzial dieser Strategie zur Sicherstellung der Nachserienversorgung (vgl. Abbildung 3-5).

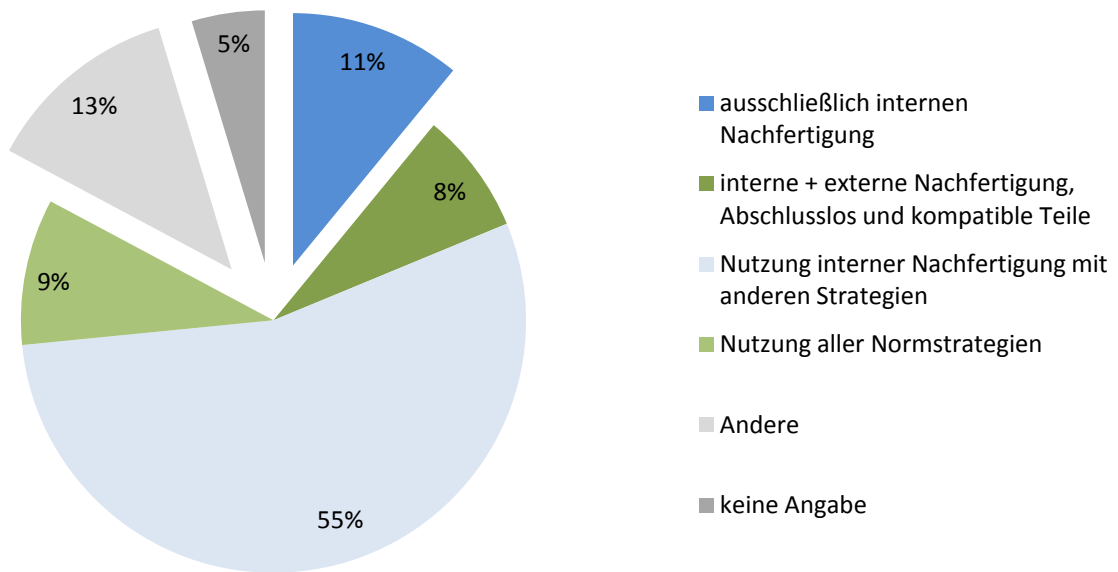


Abbildung 3-5 *Kombinationen von ETV-Strategien (n=64; a=64)*

Neben der Wahl der Versorgungsstrategien und Kombination zu Versorgungsszenarien ist entscheidend, auf Basis welcher Kriterien diese Szenarien gebildet werden (s. Abbildung 3-6).

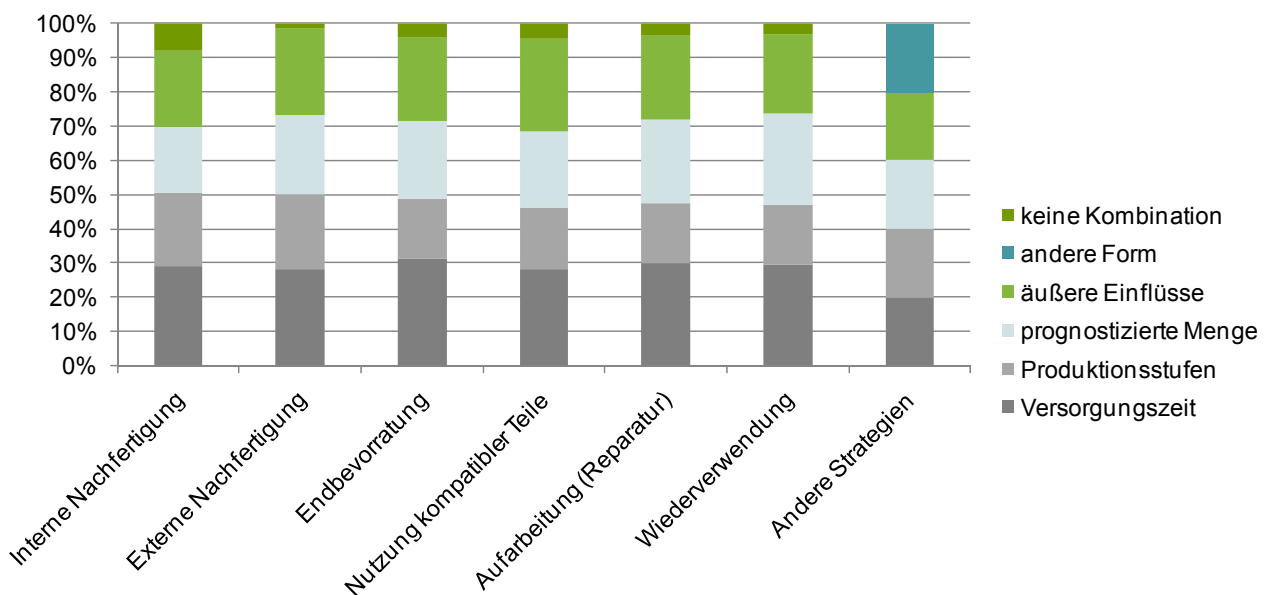


Abbildung 3-6 *Kombinationskriterien bezogen auf die ETV-Strategien (n=64; a_{VS}=208; a_{Kriterien}=70)*

Analog zum grundlegenden Verständnis in der Ersatzteilversorgung (s. Abschnitt 2.2.2) wird ein Versorgungsszenario i. e. S. durch die Kombination unterschiedlicher Versorgungsstrategien in ihrer zeitlichen Abfolge bestimmt. Das Kriterium zur Bildung von Versorgungsszenarien ist in diesem Sinn die Versorgungszeit, die den größten Anteil zur Bildung von Szenarien in der Industrie stellt. Die von den Unternehmen gemachten Angaben zeigen jedoch, dass weitere Kriterien herangezogen werden, um Versorgungsszenarien i. w. S. zu bilden. Unternehmen setzen verschiedene Versorgungsstrategien für Produktionsstufen/Wertschöpfungsstufen ei-

nes Ersatzteils ein und bilden Versorgungsszenarien entsprechend abhängig von Produktionsstufen. Des Weiteren werden Szenarien gebildet, in denen Unternehmen für einzelne Teilmengen an Ersatzteilen unterschiedliche Strategien vorsehen, z. B. werden 80 % der Ersatzteile aus interner Nachfertigung und 20 % aus externer Nachfertigung bereit gestellt. Allgemein wird deutlich, dass in der Industrie unterschiedliche Kriterien herangezogen werden, um unternehmensspezifisch je Ersatzteil ein adäquates, mit den Zielgrößen vereinbares Versorgungsszenario zu generieren. Die Wahl einer Strategie ist in diesem Zusammenhang nicht signifikant abhängig vom Kriterium, auf Basis dessen ein Versorgungsszenario gebildet wird (s. Abbildung 3-6).

3.3.4 Interne Nachfertigung von Ersatzteilen (Teil D)

Zur Klassifizierung der Produktionsabläufe bei interner Nachfertigung sind mögliche Produktionsstrategien abgefragt worden, wobei das Hauptaugenmerk auf der Bildung von Losgrößen und der Zyklus der Fertigung lag.

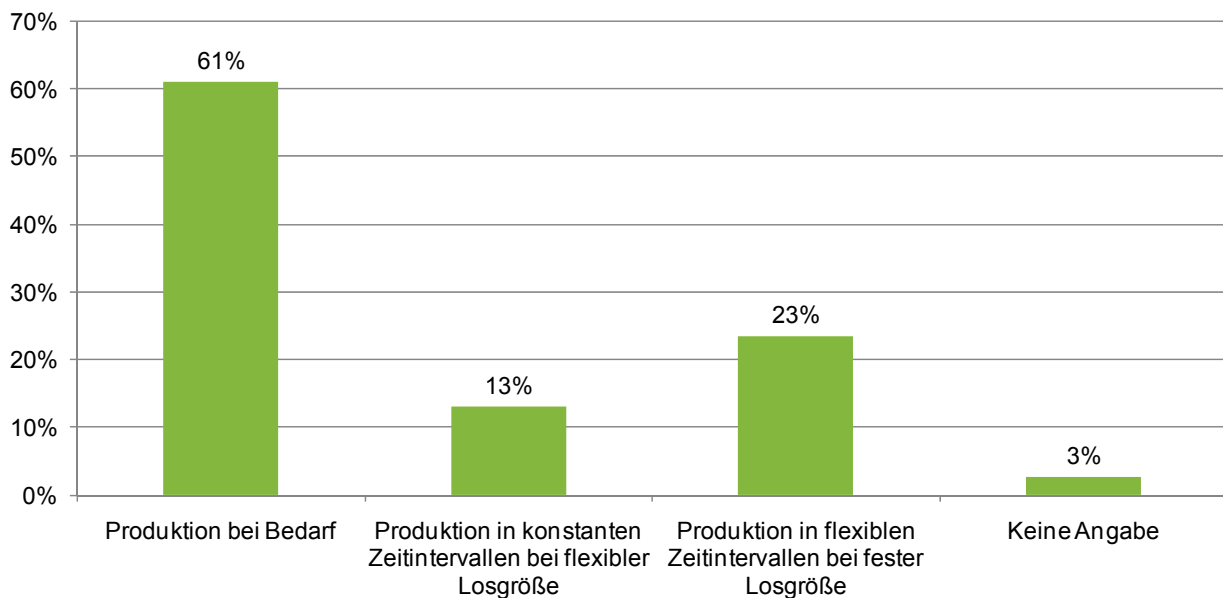


Abbildung 3-7 Produktionsstrategien innerhalb der internen Nachfertigung (n=53; a=77)

Abbildung 3-7 zeigt, dass 61 % der befragten Unternehmen bei konkret bestehendem Bedarf an Ersatzteilen nachfertigen. Ein Viertel (23 %) der produzierenden Unternehmen realisieren flexible Losgrößen, die in konstanten Zeitintervallen gefertigt werden. Weitere 13 % der Unternehmen bestimmen feste Losgrößen, die in flexiblen Zeitintervallen aufgelegt werden. Insgesamt bestehen lediglich in 36 % der Unternehmen Ansätze, trotz geringer Stückzahlen und Auslastung die Produktion durch Bildung von Losgrößen oder Einplanung von Produktionsfenstern (Zeitintervall) zu glätten und hinsichtlich Aufwand und entstehender Kosten zu optimieren.

3.3.5 Planung der Nachserienversorgung (Teil E)

Zur Gewährleistung und Planung einer geeigneten Nachserienversorgung existieren in der Literatur zahlreiche Bewertungskonzepte, die u. a. auch branchen- und unternehmensspezifische Ansätze umfassen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Von den befragten Unternehmen legen 50 % ihre Nachserienversorgung auf Basis von Bewertungskonzepten aus.

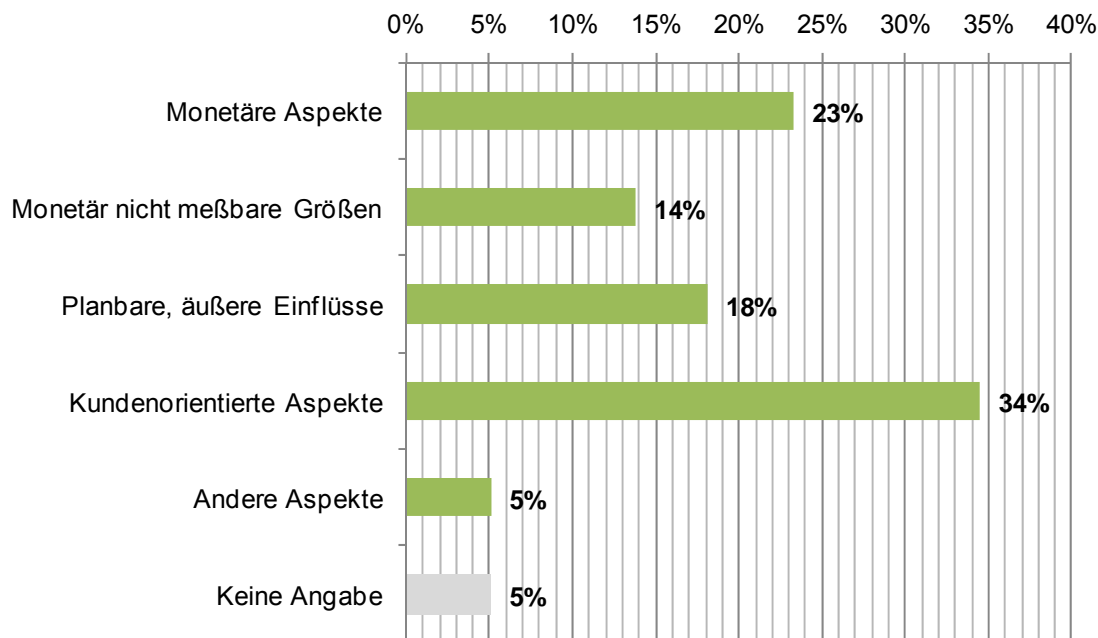


Abbildung 3-8 Bewertungskriterien zur Planung von Versorgungskonzepten in der Nachserie (n=53; a=116)

Kriterien (s. Abbildung 3-8), die Unternehmen in die Entscheidung für eine Versorgungsstrategie oder -szenario einbeziehen, sind mit einem Anteil von 34 % zumeist kundenorientierte Aspekte, wie beispielsweise die Gewährleistung von Lieferfähigkeit. Bei 23,3 % der Unternehmen erfolgt die Entscheidung für ein Versorgungsszenario auf Basis monetärer Gründe, z. B. durch Berücksichtigung von Lager- und Kapitalbindungskosten und Verschrottungskosten. Monetär nicht messbare Faktoren werden bei 14 % der Unternehmen herangezogen. In diesem Zusammenhang werden als zentrale Aspekte die Flexibilität der gewählten Versorgungsstrategie, die Ausnutzung von Kapazitäten und Wiederbeschaffungszeiten aufgeführt. Weiterhin werden zu 18 % planbare äußere Einflüsse einbezogen. Die befragten Unternehmen nennen in diesem Kontext die Außerbetriebnahme von Fertigungseinrichtungen, den erwarteten Verbrauch (insbesondere bei Verschleißteilen), vom Kunden angekündigte Bauteilabkündigungen und geplante Änderungen des Produktportfolios. Unter anderen Aspekten, die zu 5 % die Wahl der Versorgungsstrategie beeinflussen, sind von den Unternehmen vertragsrechtliche Verpflichtungen aufgeführt worden.

3.4 Zusammenfassung

Die empirische Erhebung vertieft den Stand der Technik in der Industrie und insbesondere die zur Analyse und Optimierung von Produktions- und Bevorratungsstrategien gegebenen Herausforderungen weiter. Die zuvor dargestellten Umfrageergebnisse verdeutlichen die Komplexität der Thematik und zahlreiche unterschiedliche Möglichkeiten zur Gewährleistung der Nachserienversorgung mit Ersatzteilen. Durch die hohe Komplexität der untersuchten Strukturen und deren stark unternehmensspezifischen Aufbau ist es nicht möglich, Muster innerhalb der vorhandenen Versorgungsszenarien zu identifizieren. Eine ausgeführte Korrelationsanalyse zeigte keine signifikanten Zusammenhänge.

Eine Generierung und Planung von Versorgungskonzepten in der Nachserie kann ausschließlich unter Berücksichtigung unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen und Restriktionen erfolgen. Eine Identifikation der „idealen“ oder optimalen Strategie ist nur auf Grundlage unternehmensspezifischer Randbedingungen und Zielgrößen möglich. Nur eine detaillierte Definition der Kontext- und Performancevariablen gewährleistet eine adäquate Planung und quantitative Bewertung dieser. Bei der Bestimmung einer kostenoptimalen Strategie sind daher Restriktionen zu berücksichtigen, die sich aus unternehmensseitigen Bedingungen, Produkteigenschaften der Ersatzteile sowie äußeren Einflüssen ergeben und den Unternehmen ermöglichen, die Versorgung mit Ersatzteilen wirtschaftlich zu gestalten. Diese Größen sind in Abschnitt 2.2.1 bereits allgemein erläutert worden und werden für den im Forschungsvorhaben gegebenen Kontext im nächsten Kapitel ausführlich diskutiert.

Die weite Verbreitung der internen Nachfertigung und Bevorratung von Ersatzteilen als Versorgungskonzept in der Nachserie zeigt einerseits die Relevanz von Produktions- und Bevorratungsstrategien im Feld der Nachserienversorgung und verdeutlicht zugleich das Potenzial und den mit der angestrebten Optimierung einhergehenden erzielbaren Nutzen für die Unternehmen. Des Weiteren unterstreicht die aufgenommene Produktstruktur vorwiegend mehrteiliger und komplex strukturierter Produkte die Relevanz einer Betrachtung auf Produktionsstufenebene, die weiteres Optimierungspotenzial eröffnet.

Neben der gegebenen Produktstruktur stellt die mangelnde Optimierung der Produktion hinsichtlich Losgröße oder Einplanung von Produktionsfenstern für Ersatzteilbedarfe (Zeitintervall) trotz geringer Stückzahlen und Auslastung Grund für eine effiziente Produktions- und Bevorratungsplanung dar. Insbesondere hinsichtlich der fokussierten Zielgröße der Kosten.

4 Planung der Nachserienversorgung

Ziel des Ersatzteilmanagements ist die Planung, Steuerung und Überwachung der Nachserienversorgung unter Berücksichtigung des Zielsystems (Kontext- und Performancevariablen) und die Definition der Variablen zur bestmöglichen Erfüllung dieses Zielsystems (Designvariablen) (vgl. Unterkapitel 2.1). Das allgemein formulierte Zielsystem ergibt sich wie folgt:

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens angestrebte Planung der Ersatzteilversorgung konzentriert sich auf die Analyse und Optimierung von Strategien zur Nachserienproduktion und Bevorratung von Ersatzteilen oder deren Komponenten. Diese Optimierung erfolgt hinsichtlich der entstehenden Produktions- und Logistikkosten. Zusätzlich sind die Optionen der Integration in die laufende Fertigung und die Planung für verschiedene Produktionsstufen zu berücksichtigen (siehe Kapitel 1 und Abschnitt 2.2.3). Des Weiteren soll eine Möglichkeit zur dynamischen Anpassung, d. h. zur rollierenden Planung bei geänderten Randbedingungen, gegeben sein.

In Anlehnung an die in Abschnitt 2.2.3 dargestellten Planungsansätze nach Dombrowski (Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b) und des IPH (Knigge, Rosentritt 2009) basiert die Planung der Ersatzteilversorgung im Rahmen dieses Zielsystems auf den in Abbildung 4-1 dargestellten Schritten. Eine Vorauswahl möglicher Strategien auf Basis von spezifischen produkt- und prozessbezogenen Merkmalen ist nicht erforderlich, da vordefiniert ist, dass Produktions- und Bevorratungsstrategien zu fokussieren sind. Vielmehr dienen jene produkt- und prozessspezifischen Merkmale, die Strategien in ihrer Anwendung unterbinden, als Kontext/Voraussetzungen für die weitere Planung und sind folglich näher zu spezifizieren.

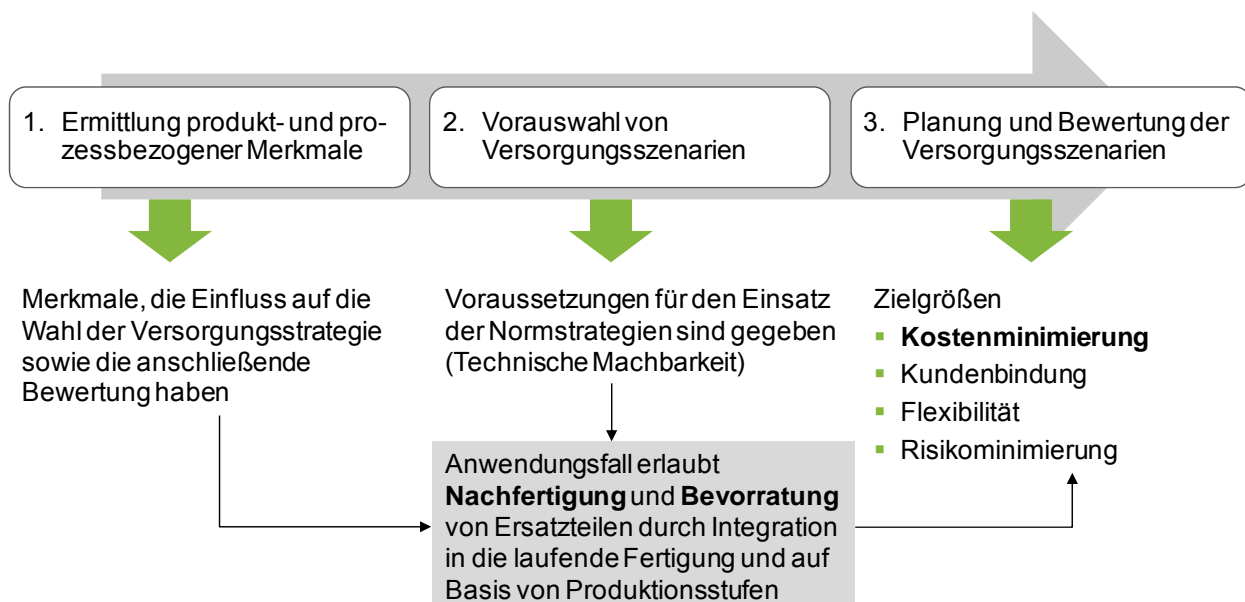


Abbildung 4-1 Planung der Nachserienversorgung unter Berücksichtigung von Produktions- und Bevorratungsstrategien (in Anlehnung an Dombrowski, Horatzek, Wrehde 2005b; Knigge, Rosentritt 2009)

Zudem sind, insbesondere vor dem Hintergrund der im Zielsystem fokussierten Kostenminimierung (zentrale Performancevariablen), jene Merkmale zu beschreiben, die Strategien in ihrer Anwendung begünstigen oder erschweren.

Zur Identifikation und Detaillierung dieser Merkmale sind neben den in Abschnitt 2.2.1 allgemein dargestellten Aspekten Anforderungen und Auswirkungen zu berücksichtigen, die sich durch die Betrachtung von Produktionsstufen und durch die Möglichkeit zur Integration in die laufende Fertigung ergeben. Aus diesem Grund wird zunächst der Begriff Produktionsstufe näher definiert, bevor in Unterkapitel 4.1 die verschiedenen Merkmale unter Berücksichtigung des Anwendungsfalls detailliert erläutert werden.

Produktionsstufen

Unter einer Produktionsstufe wird allgemein ein Wertschöpfungsabschnitt zur Fertigstellung eines Erzeugnisses verstanden, der einen oder mehrere der dafür erforderlichen Prozesse umfasst, für deren Durchführung Bauteile, Baugruppen, Module bzw. Systeme einzusetzen sind. Für die Beschreibung von Produktionsstufen ist folglich die produkt- und prozessbezogene Darstellung des Erzeugniszusammenhangs erforderlich.

Eine produktbezogene Darstellung des Erzeugniszusammenhangs dient vor allem der Abbildung der mengenmäßigen Interdependenzen zwischen über- und untergeordneten Produkten (Rossi 2003, S. 46; Tempelmeier 2006, S. 103ff.). Sogenannte Produkt-/Erzeugnisstrukturen können graphisch, tabellarisch oder über Matrizen abgebildet werden. Eine graphische Darstellungsform ist der Gozintograph, bei dem Erzeugnisse durch Knoten und deren Beziehungen untereinander durch Pfeile dargestellt werden. Bezüglich der Komplexität der Produkte werden serielle, konvergierende, divergierende und generelle mehrstufige Erzeugnisstrukturen unterschieden.

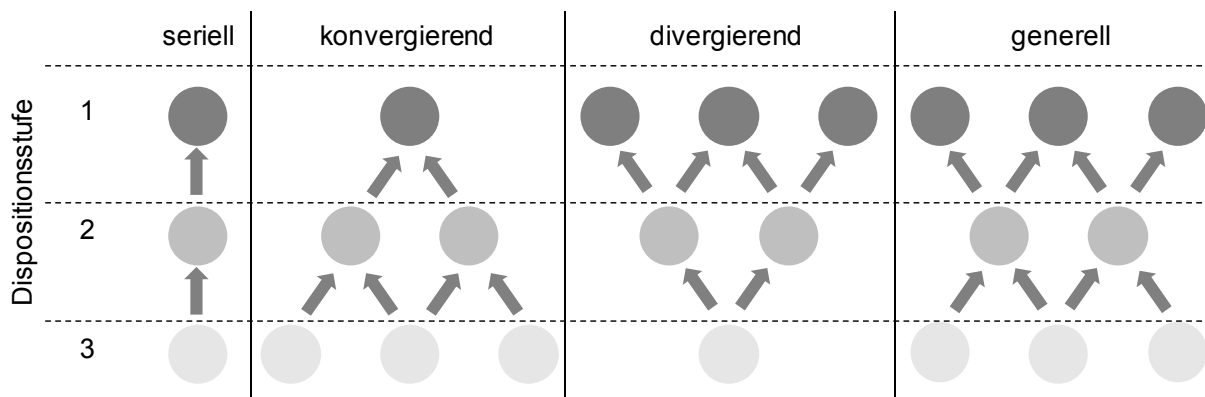


Abbildung 4-2 Gozintographen einer seriellen, konvergierenden, divergierenden und allgemeinen Erzeugnisstruktur (vgl. Rossi 2003, S. 46; Tempelmeier 2006, S. 103ff.)

Der Arbeitsplan eines Erzeugnisses setzt sich jedoch aus diversen Prozessen zusammen, die durch unterschiedliche Ressourcen ausgeführt werden (Tempelmeier 2006, S. 203ff.) Dementsprechend nehmen nicht Produkte, sondern die an ihnen zu verrichtenden Prozesse Ressourcen in Anspruch. Eine Integration in die laufende Produktion kann folglich nur unter Berücksichtigung der in der Produktion zur Verfügung stehenden freien Kapazitäten der Ressourcen erfolgen. Aus diesem Grund sind die Strukturen der Produktionsprozesse zu berücksichtigen und in Kombination mit einer mehrstufigen Produktstruktur, d. h. den mengenmäßigen Zusammenhängen, zu betrachten.

Im speziellen Kontext werden Produktions- und Bevorratungsstrategien betrachtet, so dass die aus einer Produktionsstufe resultierenden (Zwischen-) Produkte sinnvolle Einheiten darstellen müssen, die auf Grund ihrer geometrischen Beschaffenheit theoretisch einlagerbar sind, wobei hier nicht die Lagerfähigkeit im zeitlichen Sinn gemeint ist (s. Abschnitt 2.2.1). Eine Berücksichtigung der Auslastung der in einer Produktion gegebenen Ressourcen erfordert, dass die zu einer Produktionsstufe zusammengefassten Prozesse einer Ressource zugeordnet werden können. Eine derartige Zuordnung basiert auf verschiedenen prozessbezogenen Merkmalen und erfordert eine Definition der Ressourcen. Hier ist die Skalierbarkeit des Systems zu beachten. Je detaillierter die Prozesse und Produktionsstufen definiert werden, desto differenzierter sind die Ressourcen zu klassifizieren.

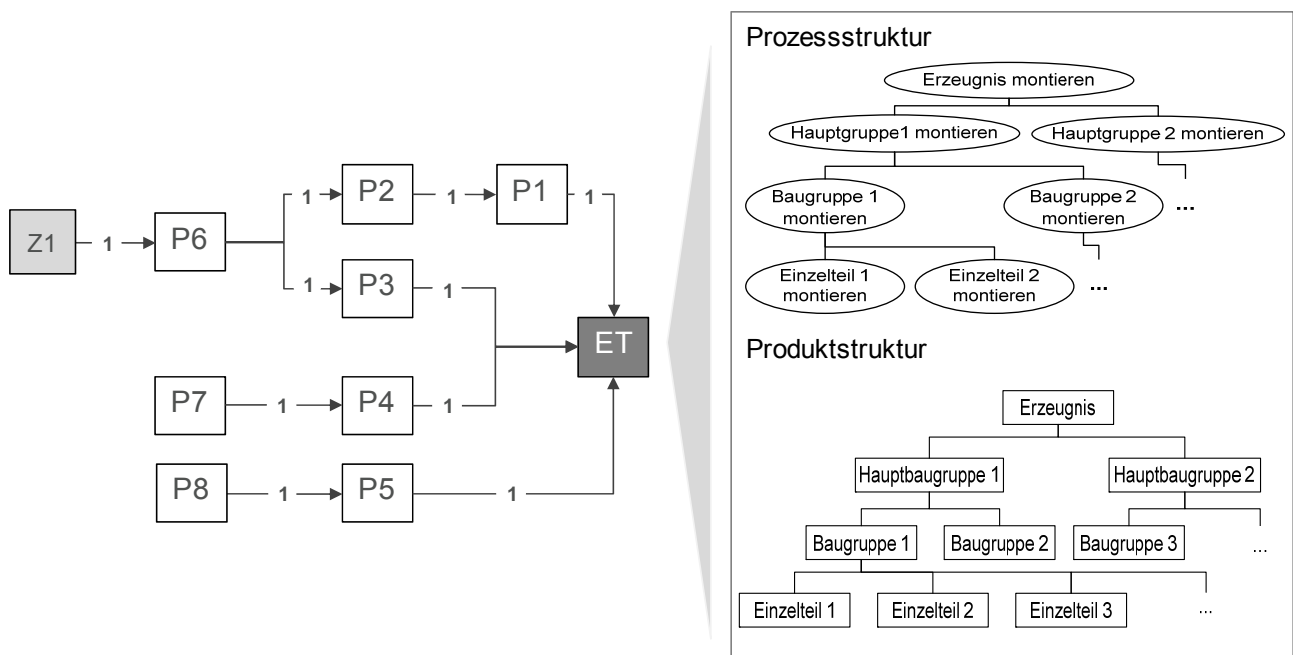


Abbildung 4-3 *Verständnis von Produktionsstufen im Kontext der Ausarbeitung*

Die in Abbildung 4-3 dargestellten Produktionsstufen (Kästchen) werden folglich durch eine kombinierte Produkt- und Prozessstruktur repräsentiert, die im gegebenen Kontext Restriktionen unterliegen. Produktionsstufen im Verständnis dieser Ausarbeitung stellen lagerbare (Zwischen-) Produkte dar, die nach Durchlauf eines oder mehrerer Prozesse (Wertschöpfungsabschnitte) entstehen, welche jedoch eindeutig einer Ressource zugeordnet werden können. (Zwischen-) Produkte sind z. B. Bauteile, Baugruppen, Module, Systeme oder Kompletzteile. Speziell können bspw. auch zugekaufte Bauteile betrachtet werden, die gemäß der Definition keine Wertschöpfungsprozesse umfassen und folglich keine Kapazitäten beanspruchen.

Zur Ausgestaltung des Zielsystems sind, aufbauend auf dem zu detaillierenden Kontext, mögliche Stellgrößen zur Optimierung der Produktions- und Bevorratungsstrategien zu bestimmen. Generell kann die Ausgestaltung auf die Definition von Versorgungsszenarien durch interne Nachfertigung und Endbevorratung begrenzt werden. Eine weitreichende Ausgestaltung, z. B. durch eine Anpassung der Produkteigenschaften, ist nicht möglich (Vergangenheitsbewältigung).

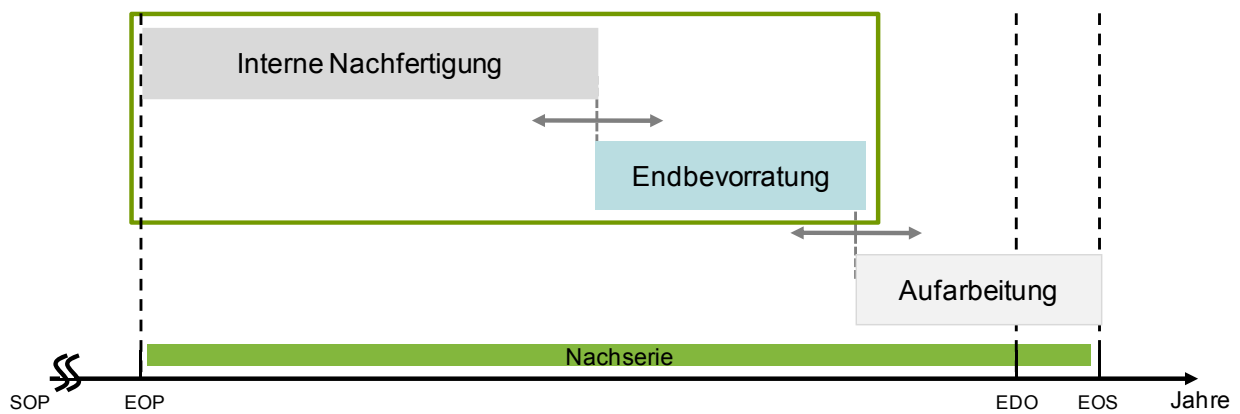
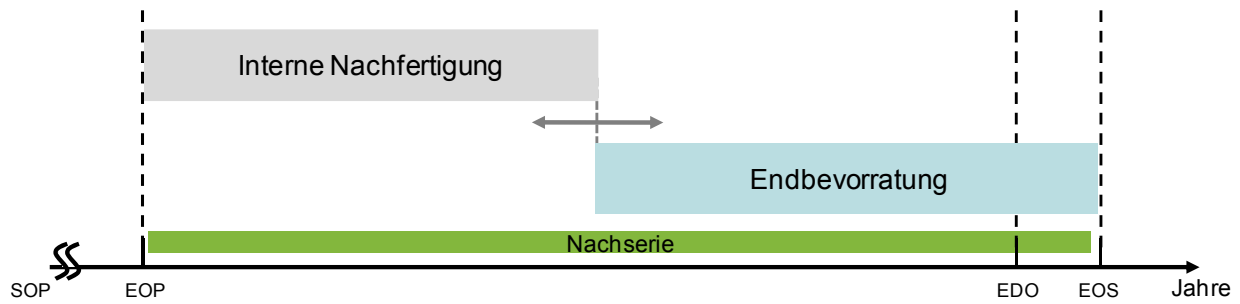


Abbildung 4-4 Versorgungsszenarien unter Berücksichtigung von Produktions- und Bevorratungsstrategien (gemäß Dombrowski, Schulze 2008a)

Die Versorgungsszenarien werden in diesem Zusammenhang im engeren Sinn über die Versorgungszeit, und im hier definierten weiteren Sinn über verschiedene Produktionsstufen gebildet. Zudem soll die Möglichkeit gegeben sein, Teile eines in Kombination mit anderen Strategien gebildeten Szenarios auszugestalten (vgl. Abbildung 4-4).

4.1 Kontextvariablen bei der Planung

Nachstehend werden zunächst jene Größen näher detailliert, die eine Planung unter dem soeben grob beschriebenen Kontext unterbinden. Anschließend werden Aspekte aufgezeigt, welche die Ausgestaltung der Strategien im Rahmen der Feinplanung beeinflussen.

Größen, die eine Anwendung von Produktions- und Bevorratungsstrategien unterbinden, sind im Fall der Endbevorratung vor allem in einer nicht gegebenen Lagerfähigkeit der (Zwischen-) Produkte zu sehen. Neben der Lagerfähigkeit bildet die Fähigkeit zur Prognose eines Allzeitbedarfes mit entsprechender Prognosegüte, unter Berücksichtigung des Aufwands, ein limitierendes Merkmal (Knigge, Rosentritt 2009, S. 1149). Für die Nachfertigung hingegen ist von Relevanz, dass die zur Fertigung der (Zwischen-) Produkte erforderlichen Betriebsmittel und entsprechendes Fertigungs-Know-How vorhanden sind. Sind diese Merkmale in ihrer Gesamtheit nicht erfüllt, kann eine Planung im dargestellten Kontext nicht erfolgen, da das betrachtete Problem außerhalb des Handlungsrahmens liegt. Auf Grund der kombinierten Betrachtung von Produktions- und Bevorratungsstrategien kann jedoch bei Nichterfüllung eines dieser Merkmale alternativ die jeweils andere Strategie eingesetzt werden. Dementsprechend sind die erörterten Merkmale, insbesondere in den jeweiligen Ausprägungen, als strategiebeeinflussend anzusehen und in das Modell aufzunehmen.

Merkmale, die Strategien in ihrer Ausgestaltung beeinflussen, ergeben sich maßgeblich durch spezifische Eigenschaften der betrachteten (Zwischen-) Produkte und den durchzuführenden Prozessen, die unternehmensspezifisch in ihrer Ausprägung variieren, aber allgemeingültig betrachtet werden. Die Analyse erfolgt daher differenziert nach produkt- und prozessspezifischen Merkmalen. Generell sind statische und zeitlich veränderliche Merkmale zu unterscheiden. Letztere erfordern eine nach der Planung der Ersatzteilversorgung systematische Anpassung, d. h. Überwachung und fortlaufende Steuerung der Ersatzteilversorgung (Knigge, Rosentritt 2009, S. 1149ff.).

4.1.1 Definition relevanter produktbezogener Merkmale

Ein grundlegendes, durch das zu betrachtende Ersatzteil vorgegebenes, statisches Merkmal ist der Versorgungszeitraum für den die Planung der Nachserienversorgung erfolgen soll. Dieser ergibt sich, wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, aus verschiedenen Gründen wie rechtlichen Verpflichtungen oder strategischen Unternehmensentscheidungen. Typische dynamische produktbezogene Merkmale sind Größen, die die in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Bedarfsprognose beeinflussen. Dies sind die aus den grundsätzlichen Ersatzteiltypen, d. h. Verschleißteilen und Ausfallteilen, resultierenden Bedarfsverläufe und Konstanz dieser Bedarfe (Dombrowski, Bothe 2001, S. 792ff.). In diesem Zusammenhang erhöht zudem die Länge der Versorgungszeit Komplexität und Güte der Prognose. Je länger der im Rahmen des Ersatzteilmanagements zu planende Versorgungszeitraum im Modell gewählt wird, desto schwieriger wird eine Prognose, insbesondere unter Berücksichtigung eines angemessenen Aufwandes. Produktspezifische typologische Merkmale bilden in diesem Zusammenhang der Versorgungszeitraum, die Prognosefähigkeit sowie Bedarfskonstanz und -verlauf (vgl. Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1 **Strategiebeeinflussende Produkteigenschaften**

Merkmal		Ausprägungen					
Produkt	Versorgungszeitraum	< 5 Jahre	5-10 Jahre	10-15 Jahre	15-20 Jahre	>20 Jahre	
	Bedarfsprognosefähigkeit	sehr hohe Güte			sehr geringe Güte		
	Bedarfskonstanz	regelmäßig		unregelmäßig		sporadisch	
	Bedarfsverlauf	konstant		trendförmig	schwankend	zufällig schwankend	
	Produktstruktur	Unternehmensspezifisch vorgegeben					
	Mögliche Bevorratungsebene	Bauteilebene	Baugruppen- ebene	Modulebene	Systemebene	Kompletteil	
	Lagerfähigkeit der (Zwischen-) Produkte	nein	<1 Jahr	> 1 bis < 5 Jahre	> 5 bis < 10 Jahre	> 10 Jahre	
	Spezifische Lagerbedingun- gen der (Zwischen-) Produkte	erforderlich			nicht erforderlich		
	Prüfung nach Lagerung (Qualitätsprobleme)	erforderlich			nicht erforderlich		
	Wert der (Zwischen-) Produkte	gering			hoch		
	Obsoleszenzrisiko der (Zwischen-) Produkte	sehr hohes Risiko			sehr geringes Risiko		

Weitere statische Merkmale ergeben sich aus den spezifischen Produkthanforderungen. Zur Definition der Produktionsstufen im oben dargestellten Verständnis, ist eine produktbezogene Darstellung des Erzeugniszusammenhangs erforderlich. Diese muss in spezifischer Form im Unternehmen vorhanden sein. Das Ersatzteil beeinflusst die Ausgestaltung der Strategien zudem durch die Alterungsbeständigkeit der (Zwischen-) Produkte. Für jede mögliche Bevorratungsebene im Sinne der Produktionsstufen ist folglich zu definieren, für welchen Zeitraum das (Zwischen-)Produkt zu bevorraten ist. Dieser Zeitraum beschränkt die im Modell zu berücksichtigende mögliche Einlagerungsdauer. Spezielle Lagerbedingungen und Qualitätsprobleme nach einer langen Lagerung und daraus resultierende Prüfungen sind in den entstehenden Kosten bei eingeschränkter Lagerfähigkeit zu berücksichtigen. Zudem hat neben der einzulagernden Menge, die im Modell optimal auszulegen ist, der Wert der (Zwischen-) Produkte eine bedeutende Rolle, da dieser Ausdruck der Kapitalbindung ist und in den Kosten zu berücksichtigen ist. Zudem ist das Obsoleszenzrisiko der (Zwischen-) Produkte zu berücksichtigen. Dieses beschreibt die künstliche Veralterung von Produkten und entspricht einer Abkündigung im eigentlichen Sinn noch gebrauchsfähiger Produkte (Bothe 2003; Hagen 2003; Dombrowski, Lechnitz 2008). Dementsprechend sind (Zwischen-) Produkte ggf. nur für einen begrenzten Zeitraum am Markt verfügbar und müssen bei einer Abkündigung für den verbleibenden Zeitraum endbevorratet werden. Dies geschieht vorrangig in der Elektronikindustrie, z. B. bei Prozessoren (Dombrowski, Bothe 2001, S. 793).

4.1.2 Definition relevanter prozessbezogener Merkmale

Prozessbezogene Aspekte, welche die Ausgestaltung der Produktions- und Bevorratungsstrategien beeinflussen, ergeben sich vorrangig aus der Tatsache, dass die Produktionsbedingungen in der Nachserienphase zumeist nicht oder in geringem Maße an die Randbedingungen der Nachserienfertigung angepasst sind. Für den Produktionsablauf in der Nachserie ist es entscheidend, inwieweit Unternehmen die Produktion an spezifische Randbedingungen anpassen. Generell bestehen in diesem Zusammenhang unterschiedliche Möglichkeiten die Produktion in der Nachserie zu gestalten, auf die nachstehend kurz eingegangen wird.

Möglichkeiten zur Integration in die laufende Fertigung

Die Nachfertigung kann organisatorisch und räumlich getrennt oder in die eigentliche Serienfertigung integriert durchgeführt werden. In jedem Fall werden jedoch Kapazitäten in Form von Personal und Fertigungseinrichtungen erforderlich, so dass bestehende Konzepte unabhängig von der organisatorischen und räumlichen Durchführung als Integration in eine laufende Fertigung verstanden werden. In diesem Zusammenhang existieren unterschiedliche Möglichkeiten einer Integration, die jeweils durch verschiedene Voraussetzungen und Auswirkungen, insbesondere auf die Kosten, gekennzeichnet sind. Abstrahiert bestehen zur Integration in die laufende Produktion die Möglichkeiten der Neuproduktion, der Neukonfiguration und der Einlasung in die Serienfertigung ähnlicher Produkte (vgl. Tabelle 4-2). Diese werden nachstehend detailliert.

Bei Neuproduktion werden die Serienfertigungseinrichtungen unverändert zur Produktion in der Nachserienphase eingesetzt. Dies ist erforderlich, sofern (Zwischen-) Produkte z. B. auf Grund der Automatisierung nur mit speziellen Fertigungseinrichtungen herzustellen sind. Bedingt durch sinkende Stückzahlen nach EOP ist eine geringe Auslastung der Betriebsmittel gegeben. Die Fertigung kann räumlich getrennt oder in der Serienfertigung erfolgen. Bei Realisierung der zweiten Option ergeben sich ggf. knappe Personalkapazitäten, sofern die Produktion durch das Personal der Serienfertigung erfolgt. Zudem ist eine hohe Flächenkapazität erforderlich. Bei einem knappen Flächenangebot können die Fertigungseinrichtungen optional eingelagert und entsprechend zur Produktion wieder ausgelagert werden. Neben den ggf. resultierenden Lagerungskosten der Fertigungseinrichtungen muss zum einen mit langen Produktionsstillständen auf Grund mangelnder Auslastung und entsprechend erhöhten Kosten für Inbetriebnahme- und Instandhaltungsaufwand gerechnet werden. Zum anderen entstehen erhöhte Betriebskosten je Stück, da keine anteilige Berechnung vorgenommen werden kann. Demgegenüber ist ein Rüstaufwand nur zu berücksichtigen, sofern verschiedene Varianten des Ersatzteils gefertigt werden, da die Fertigungseinrichtungen lediglich für das spezifische Ersatzteil betrieben werden (kein Rüsten wegen Produktwechsel erforderlich).

Im Rahmen der Neukonfiguration werden die Prozesse und folglich die Serienfertigungseinrichtungen abgeändert, um eine flexible Fertigung zu erhalten. Hierbei wird die Nutzung spezieller, auf die flexible Ersatzteilmontage angepasster Fertigungseinrichtungen angestrebt, wobei analog die Möglichkeit besteht die Serienfertigungseinrichtungen an sich rückzubauen und

dementsprechend zu flexibilisieren. Voraussetzung für eine Neukonfiguration ist in der generellen Möglichkeit zur Zertifizierung und Qualifizierung von der Serie abweichender Prozesse zu sehen. Problematisch ist, dass dies durch den Endkunden geschehen muss. Zudem ist eine gewisse Modularität der Betriebsmittel, d. h. die Rückbaumöglichkeit, oder die Existenz entsprechender flexibler Fertigungseinrichtungen erforderlich (Friedrichs 2008). Sind diese Voraussetzungen gegeben, bietet die Neukonfiguration die Möglichkeit die neukonfigurierten Fertigungseinrichtungen ggf. durch verschiedene Produkte auszulasten, die jedoch um die verfügbare Kapazität konkurrieren. Üblicherweise findet eine derartige Fertigung getrennt von der eigentlichen Serienfertigung statt, so dass sich das Unternehmen auf seine Kernkompetenz in der Serienfertigung konzentrieren und das technologisch stark abweichende Ersatzteilgeschäft separiert werden kann (Dombrowski, Bothe 2001, S. 793). Durch die Neukonfiguration des Produktionssystems entstehen Kosten für den Umbau und die Zertifizierung der Betriebsmittel. Zudem entstehen Rüstaufwände sowie anteilige Inbetriebnahme- und Betriebskosten durch die Fertigung verschiedener Produkte in einem System.

Tabelle 4-2 *Alternative Möglichkeiten zur Integration von Ersatzteilbedarfen in die laufende Produktion*

	Neuproduktion	Neukonfiguration	Einlastung in Serienfertigung ähnlicher Produkte
Prinzip	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Serienfertigungseinrichtungen des betrachteten Ersatzteils werden für die Nachserienproduktion eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualifizierung von der Serie abweichender Prozesse (Remanufacturing) ▪ Nutzung spezieller, angepasster Fertigungseinrichtungen ▪ Rückbau der Serienfertigungseinrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktion von Ersatzteilbedarfen auf Serienfertigungseinrichtung ähnlicher Produkte
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flächenkapazität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spezielle Fertigungseinrichtungen vorhanden (Nachserienfabrik) ▪ Möglichkeit zum Remanufacturing 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ähnlichkeit der Prozesse von betrachtetem Ersatzteil und gewähltem Serienteil ▪ Flexibilität/Kompatibilität der Fertigungseinrichtungen
Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ geringe Auslastung ▪ unbegrenzte Kapazitäten der Fertigungseinrichtungen ▪ ggf. mangelnde Personalkapazität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ggf. kritische Auslastung ▪ ggf. Aufteilung der verfügbaren Kapazitäten auf mehrere (Zwischen-) Produkte, Ressourcenkonkurrenz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ggf. kritische Auslastung ▪ Aufteilung der verfügbaren Kapazitäten auf mehrere (Zwischen-) Produkte, Ressourcenkonkurrenz
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instandhaltungsaufwand/Inbetriebnahme ▪ ggf. geringer Rüstaufwand ▪ Betriebskosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umbau-/Zertifizierungsaufwand ▪ anteiliger Inbetriebnahmeaufwand ▪ Rüstaufwand ▪ anteilige Betriebskosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ggf. Anpassung der Werkzeuge ▪ anteiliger Inbetriebnahmeaufwand ▪ Rüstaufwand ▪ anteilige Betriebskosten

Eine Einlastung von Ersatzteilbedarfen in die Serienfertigung ähnlicher Produkte basiert auf der Idee, nicht genutzte Kapazitäten in der Serienfertigung zu nutzen, wodurch es jedoch auch zu Ressourcenkonkurrenz kommen kann. Die Produktion von Ersatzteilen der Nachserie erfolgt dabei auf den Serienfertigungseinrichtungen ähnlicher Produkte. Diese Vorgehensweise stellt hohe Anforderungen an die Produkt- und Prozessähnlichkeit der betrachteten Produkte. Die Ähnlichkeit hängt zum einen von der Komplexität der Prozesse und zum anderen von den zur Fertigung eingesetzten Verfahren ab. Ähneln sich der Prozessablauf der betrachteten Produkte nicht, insbesondere bei einem hohen Automatisierungs- bzw. Spezialisierungsgrad, ist eine derartige Einlastung nur schwer möglich. Zudem ist die Flexibilität und Kompatibilität der Serienfertigungseinrichtungen zu berücksichtigen. Nur standardisierte und z. B. durch Adapter abwärts kompatibel gestaltete Fertigungseinrichtungen unterstützen diese Integrationsform (Friedrichs 2008). Andernfalls wäre ein zu hoher Anpassungsaufwand der Betriebsmittel erforderlich. Ist eine Einlastung von Ersatzteilbedarfen in die Serienfertigung ähnlicher Produkte möglich, ergeben sich neben den ggf. aufzubringenden Kosten für die Anpassung der Werkzeuge, Rüstaufwände sowie anteilige Inbetriebnahme- und Betriebskosten.

Zur Planung der Ersatzteilversorgung ist folglich zu Beginn zu spezifizieren, in welcher Form die Nachserienfertigung erfolgen soll, da sich unterschiedliche Aufwände und Kostenfaktoren ergeben. Die Wahl einer Integrationsform bedingt zudem, dass die betrachteten (Zwischen-) Produkte, bzw. vielmehr die in einer Produktionsstufe auszuführenden Prozesse, den zur Fertigung vorgesehenen Ressourcen zugewiesen werden können (vgl. Abbildung 4-5). Durch diese Zuweisung ergibt sich, neben den oben dargestellten unterschiedlichen Aufwendungen und Kosten, die Höhe der Maschinen- und Rüstkosten. Die Ressourcen sind in diesem Kontext frei skalierbar, sollten jedoch, wie in Unterkapitel 4.1 dargestellt, abhängig bzw. abgestimmt mit den Produktionsstufen festgelegt werden, um die Anforderung der eindeutigen Zuteilbarkeit zu erfüllen.

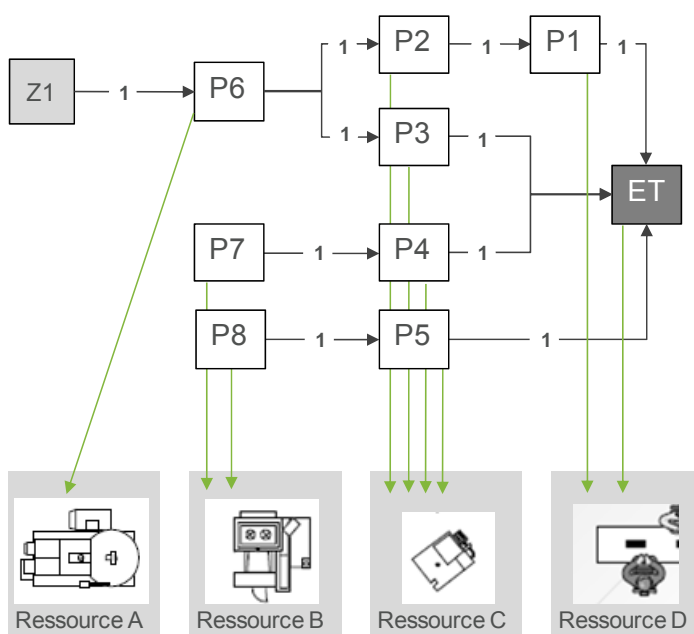


Abbildung 4-5

Zuteilung einzelner Wertschöpfungsprozesse/Produktionsstufen zu Ressourcen

Zusammenfassend sind folglich prozessspezifische strategiebeeinflussende Merkmale je nach gewählter Integrationsform in der Technologie bzw. Automatisierung der Fertigungseinrichtungen (Arbeitsverfahren, Spezialbetriebsmittel etc.), der Komplexität der Abläufe und der Kompatibilität sowie Modularität der Fertigungseinrichtungen zu sehen (s. Tabelle 4-3). In diesem Zusammenhang ist die Auslastung der zur Fertigung gewählten Ressourcen zu berücksichtigen und entsprechend zu prognostizieren.

Eine weitere strategiebeeinflussende Größe stellt die Obsoleszenz von Fertigungseinrichtungen dar. Eine Nachfertigung kann bspw. nicht möglich sein, weil spezielle Fertigungseinrichtungen benötigt werden, die nicht mehr verfügbar sind, wie bspw. schwierig zu reaktivierende Fertigungseinrichtungen (Dombrowski, Bothe 2001, S. 793). Auch hier sind Standards für Fertigungs- und Prüfmittel vorzusehen, um eine entsprechend langfristige Ersatzteilverfügbarkeit zu gewährleisten. Sind Fertigungseinrichtungen jedoch nicht zu reaktivieren, ist dies im Modell durch entsprechend nicht vorhandene Fertigungskapazitäten abzubilden und hat zwangsläufig einen Wechsel zur Strategie der Endbevorratung zu bedingen.

Tabelle 4-3 **Strategiebeeinflussende Prozesseigenschaften**

Prozess	Technologie/Automatisierung	niedrig/manuell			hoch/vollautomatisiert	
	Komplexität der Abläufe	sehr hoch	hoch	mittel	gering	sehr gering
	Produktionsablauf	einstufig			mehrstufig	
	Kompatibilität der Fertigungseinrichtungen	gering			hoch	
	Modularität der Fertigungseinrichtungen	gering			hoch	
	Obsoleszenzrisiko der Fertigungseinrichtungen	gering			hoch	
	Verfügbare Kapazitäten	uneingeschränkt			eingeschränkt	

Die unterschiedlichen Formen zur Integration in die laufende Fertigung haben unterschiedliche Aufwendungen und Kosten (Einmalkosten) zur Folge, die zudem in ihrer Ausprägung variieren. Des Weiteren sind die Alternativen unterschiedlich kritisch in Bezug auf die Auslastung und die verfügbaren Kapazitäten. Im Rahmen einer adäquaten Planung der Ersatzteilversorgung sind diese Aspekte und dementsprechend die unterschiedlichen Formen zur Integration zu berücksichtigen und im zu formulierenden Modell abzubilden.

4.2 Designvariablen

Da die zu betrachtenden Versorgungsstrategien für die Planung der Nachserienversorgung im Kontext dieser Ausarbeitung festgelegt sind (vgl. Unterkapitel 4.1), umfasst die Planung der Ersatzteilversorgung eine Optimierung und detaillierte Ausgestaltung der Nachfertigung und Endbevorratung hinsichtlich der festgelegten Performancevariablen und unter Berücksichtigung der zuvor aufgezeigten Kontextvariablen. Zentrale Zielgröße ist die Optimierung der durch Nachfertigung und Bevorratung entstehenden Kosten.

Möglichkeiten zur Nachfertigung bestehen generell in einer Eindeckung in regelmäßigen Bedarfsblöcken, der sogenannten Losgrößenfertigung, oder mittels Umsetzung von Einzelbedarfen, d. h. einer Bedarfsfertigung (Dombrowski, Bothe 2001, S. 792). Ein Fertigungslos entspricht in diesem Zusammenhang einer internen Auftragsgröße und benennt „diejenige Menge eines Endprodukts, einer Baugruppe oder eines Teils, die hintereinander auf einer bestimmten Produktionsanlage gefertigt wird, bevor die Produktion unterbrochen und die Anlage zur Produktion eines anderen Produktes, einer anderen Baugruppe oder eines anderen Teils umgerüstet wird“ (Voigt 2008, S. 569). Der Beginn der Fertigung eines Produktes oder einer Komponente ist daher mit Auftragswechselkosten, d. h. Rüstkosten, verbunden (Meers, Richter, Nickel 2009). Bestimmungsfaktoren bei der Ermittlung adäquater bzw. wirtschaftlicher Losgrößen bilden Rüst- und Lagerkosten, da mit steigender Losgröße und folglich steigendem Bestand die Lagerkosten einer Planperiode steigen, während die Rüstkosten der Planperiode auf Grund einer geringeren Anzahl erforderlicher Umrüstvorgänge sinken. Zudem beeinflussen variable Produktionskosten die Losgrößenplanung, sofern diese abhängig von der produzierten Menge (Rabatte etc.) und Zeit (Materialpreissteigerungen) sind. Eine kostenoptimale Losgröße ergibt sich aus dem Minimum der **entscheidungsrelevanten Gesamtkosten** (Voigt 2008, S. 569). Mit dieser Planung wird eine kostenminimale Positionierung zwischen Auftragswechsel- und Bestandskosten angestrebt (Meers, Richter, Nickel 2009). Eine Ausgestaltung der Nachfertigung und Endbevorratung in der Nachserie erfordert dementsprechend eine adäquate Losgrößenplanung, die es im Kontext des zu entwickelnden Planungsansatzes zu generieren gilt. Designvariablen bilden folglich die Losgröße und der entsprechende Fertigungszeitpunkt, die einen optimalen Kompromiss zwischen Produktions- und Logistikkosten gewährleisten. Nachstehend werden alternative Ausprägungen dieser Variablen und deren Wirkung auf Performancevariablen qualitativ dargestellt. Fokus liegt auf der resultierenden Kostenwirkung, wobei weitere Zielgrößen wie Flexibilität, Risiken (Über- und Unterdeckung) etc. berücksichtigt werden.

Die Strategie der Endbevorratung beschreibt das Fertigen eines Serienabschlussloses bei End of Production d. h. die Zusammenfassung des gesamten Bedarfs zu einem Los (Allzeitbedarf). Durch die Endbevorratung können je Stück ggf. sehr geringe Produktionskosten realisiert werden, da die Produktionsbedingungen der Serienfertigung genutzt und Instandhaltungsaufwendungen vermieden werden können. Prinzipiell besteht die Möglichkeit die erforderlichen Produktionsanlagen zu verschrotten. Demgegenüber stehen hohe Lager- und Kapi-

talbindungskosten auf Grund der über den restlichen Versorgungszeitraum vorzuhaltenden Bevorratungsmenge (s. Abbildung 4-6).

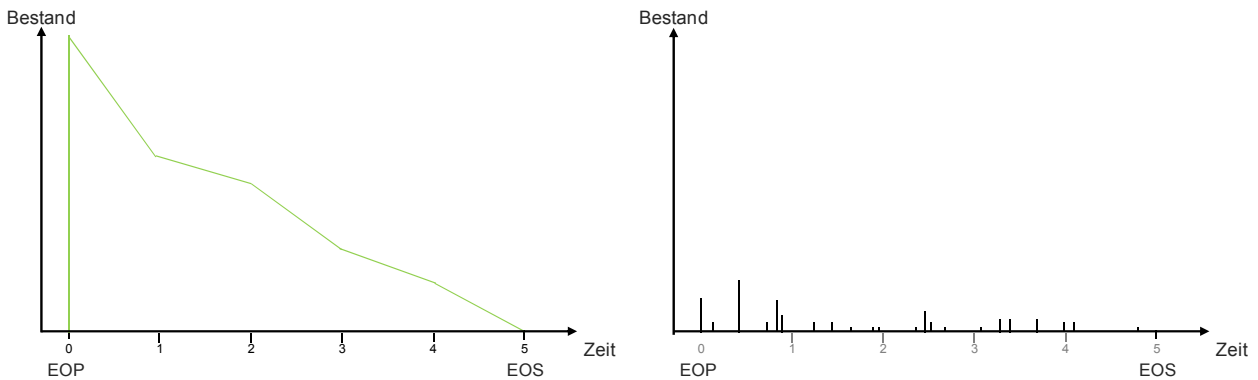


Abbildung 4-6 Schematische Darstellung des Bestandes bei Fertigung eines Serienabschlusses und bei Bedarfserfertigung

Spezifische Voraussetzungen sind in einem lagerfähigen (Zwischen-) Produkt und einer zuverlässigen Bedarfsprognose zu sehen, da ansonsten Fehlkalkulation und Mehrkosten in Form von ungeplanter Nachfertigung oder Verschrottung überschüssiger nicht benötigter Teile resultieren. Demgegenüber ist die Bedarfserfertigung durch geringe Bestandskosten, jedoch hohe Produktionskosten, gekennzeichnet. Diese liegen insbesondere in der unkalkulierbaren Anzahl an Rüstvorgängen mit entsprechend hohem Instandhaltungsaufwand und resultierenden Rüstkosten begründet. Zudem entstehen je nach Art der Fertigung ggf. Umbaukosten (s. Abschnitt 4.1.2). Das Risiko für aus Fehlprognosen resultierende zusätzliche Kosten ist durch die Fertigung eines eingegangenen Auftrags folglich gering bzw. nicht gegeben.

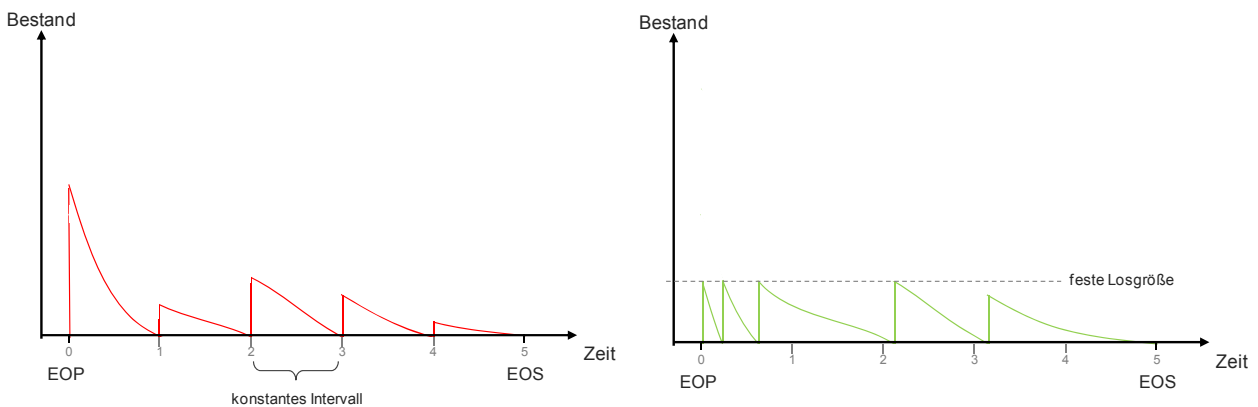


Abbildung 4-7 Schematische Darstellung des Bestandes bei Losgrößenbildung hinsichtlich verschiedener Optimierungsgrößen

Eine Produktion in Losen versucht den durch eine Endbevorratung auf der einen Seite und einer Bedarfserfertigung auf der anderen Seite entstehenden Problematiken entgegenzuwirken und diese zu relativieren. Wird bspw. in der laufenden Produktion ein entsprechendes Produktionsfenster zur Produktion von Ersatzteilbedarfen geschaffen, entsteht ein konstantes Zeitintervall, in dem das Ersatzteillager aufgefüllt wird (s. Abbildung 4-7). Dieses Intervall kann z. B. auf die maximale Lagerfähigkeit des Ersatzteils und die entstehenden Kapitalbindungskosten eingestellt werden. Zudem sind die Anzahl der Rüstvorgänge und folglich die resultierenden Rüstkosten kalkulierbar. Durch die Festlegung einer konstanten Losgröße, die in flexiblen vom

Verbrauch abhängigen Zeitintervallen nachgefertigt wird, ist ein konstanter Lagerbestand zur besseren Dimensionierung des Lagers einstellbar. Die Produktion von Ersatzteilen wird erst angestoßen, sofern die eingelagerte Losgröße aufgebraucht ist.

Generell können durch derartige Losgrößenstrategien Lagerbestände und folglich Lager- und Kapitalbindungskosten gesenkt und Rüstkosten entsprechend kalkulierbar gemacht werden. Zudem können Bedarfe kurzzyklischer geplant und Risiken einer Fehlprognose verringert werden. Orientiert sich das Zeitintervall zur Nachproduktion jedoch an der maximalen Lagerfähigkeit, besteht die Möglichkeit, dass zum Zeitpunkt der angedachten Nachproduktion noch Bestand besteht oder dieser bereits früher aufgebraucht wurde. Daher sollte nicht die Optimierung einer Größe, sondern eine simultane Planung von Losgrößen und Fertigungszeitpunkten über einen bestimmten Planungszeitraum angestrebt werden (s. Abbildung 4-8) (Rossi 2003, S. 21). Werden Losgröße und Fertigungszeitpunkt simultan geplant ergibt sich entsprechend der über eine gewisse Zeit einzulagernde Bestand.

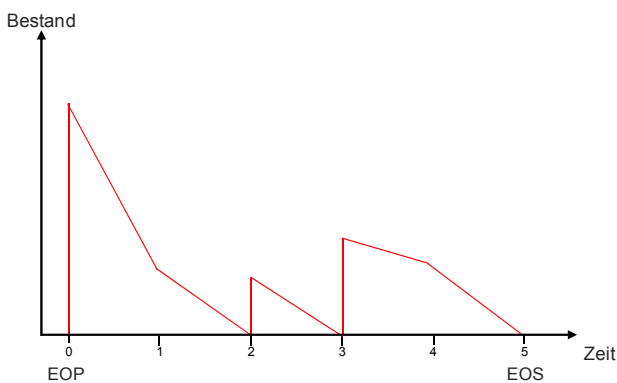


Abbildung 4-8 Schematischer Bestandsverlauf bei simultaner Optimierung der Designvariablen

Die simultane Planung von Losgröße und Fertigungszeitpunkt ist für eine mehrstufige Produkt- und Prozessstruktur durchzuführen, um eine Betrachtung von Produktionsstufen zu berücksichtigen. In diesem Sinn werden für alle Produktionsstufen Produktions- und Bevorratungsstrategien gebildet, in dem die jeweils zu realisierende Losgröße und die Fertigungszeitpunkte bestimmt werden. Für jedes (Zwischen-) Produkt werden folglich die einzulagernde und zu produzierende Menge und der kostenoptimale Zeitpunkt zur Lagerung eines Allzeitbedarfs festgelegt.

Durch die Beschreibung der Performance-, Kontext- und Designvariablen, konnte die theoretische Planungssystematik konkretisiert werden. Gemäß den gewonnenen Erkenntnissen kann die Planungssystematik durch Formulierung als produktionsstufenübergreifende Losgrößenentscheidung in ein mathematisches Modell überführt werden. Hierzu muss eine kostenoptimale Bestimmung der Losgröße und des Fertigungszeitpunktes auf Basis entscheidungsrelevanter Rüst-, Lager- und variabler Produktionskosten und unter Berücksichtigung der oben dargestellten Kontextvariablen vorgenommen werden, um das Zielsystem in Gesamtheit zu erfüllen.

5 Modellentwicklung

Auf Basis der Beschreibung des Zielsystems (Kontext- und Performancevariablen) in Unterkapitel 4.1 sowie den zur Ausgestaltung kostenoptimaler Produktions- und Bevorratungsstrategien gegebenen Designvariablen der Losgröße und des Fertigungszeitpunktes (Unterkapitel 4.2) wird nachstehend ein Modell entwickelt, welches die Planung unter Berücksichtigung ebendieser Aspekte ermöglicht und quantitativ abbildet. Hierzu werden die gegebenen Anforderungen kurz reflektiert (Unterkapitel 5.1) und Probleme sowie bestehende Konzepte im Rahmen der Losgrößenplanung detailliert vorgestellt (Unterkapitel 5.2). Abschließend wird das Modell für die Planung der Ersatzteilversorgung formuliert (Unterkapitel 5.3).

5.1 Anforderungen

Zentrale Anforderungen an das zu entwickelnde Modell ergeben sich aus dem zuvor definierten Zielsystem und speziell den im Rahmen der Kontextvariablen aufgeführten Merkmalen, die eine Ausgestaltung der gewählten Strategien beeinflussen. Zur Ausgestaltung der fokussierten Produktions- und Bevorratungsstrategien sind Fertigungszeitpunkte und Losgrößen der einzelnen Produktionsstufen in der Art zu variieren, dass sich minimale Produktions- und Logistikkosten in Form der Lager-, Rüst- und variablen Produktionskosten ergeben. Zusammengefasst soll eine derartige Planung und Modellierung unter Berücksichtigung von

- Produktionsstufen, d. h. einer mehrstufigen Produkt- und Prozessstruktur bei der die Planungsobjekte die nach Durchlauf einer Wertschöpfungsstufe vorliegenden (Zwischen-)Produkte darstellen,
- produktspezifischen Anforderungen, wie
 - dynamischen Bedarfsverlauf über den betrachteten Planungszeitraum
 - der Lagerfähigkeit und Obsoleszenz von (Zwischen-) Produkte
- prozessspezifischen Anforderungen, wie
 - Alternativen zur Integration in die laufende Fertigung und den jeweils gegebenen Aufwendungen und Kosten sowie Zuteilung zu den Ressourcen,
 - Auslastung der laufenden Produktion und verfügbaren Kapazitäten,
 - der Obsoleszenz von Fertigungseinrichtungen,
- entscheidungsrelevanten Kosten im Rahmen der Nachserienversorgung sowie
- der Möglichkeit zur rollierenden Planung bei geänderten Restriktionen.

Die Bestimmung von Losgröße, Fertigungszeitpunkt, Lagerdauer und -bestand unter Berücksichtigung des Zielsystems lässt sich, wie bereits dargestellt, generell als Losgrößenproblem betrachten, welches als entscheidungsrelevante Kosten Lager-, Rüst- und variablen Produktionskosten betrachtet. Die nachstehende Einführung in die Losgrößenplanung umfasst daher sowohl bestehende Ansätze im Rahmen von Losgrößenentscheidungen als auch eine Detaillierung der entscheidungsrelevanten Kostenfaktoren.

5.2 Einführung in die Losgrößenplanung

Die Losgrößenplanung stellt das zentrale Entscheidungsproblem innerhalb der operativen Produktionsplanung dar. Aus den getroffenen Produktionsentscheidungen werden neben der Festlegung der Produktionsmengen Materialbedarfe abgeleitet und die Auslastung der Ressourcen (Kapazitäten der Fertigungseinrichtungen und des Personals) bestimmt (Rossi 2003, S. 16). Generell werden zur Losgrößenbestimmung statische und dynamische Verfahren unterschieden (Tempelmeier 2006; Zäpfel 2001, S. 132ff.) (s. Abbildung 5-1).

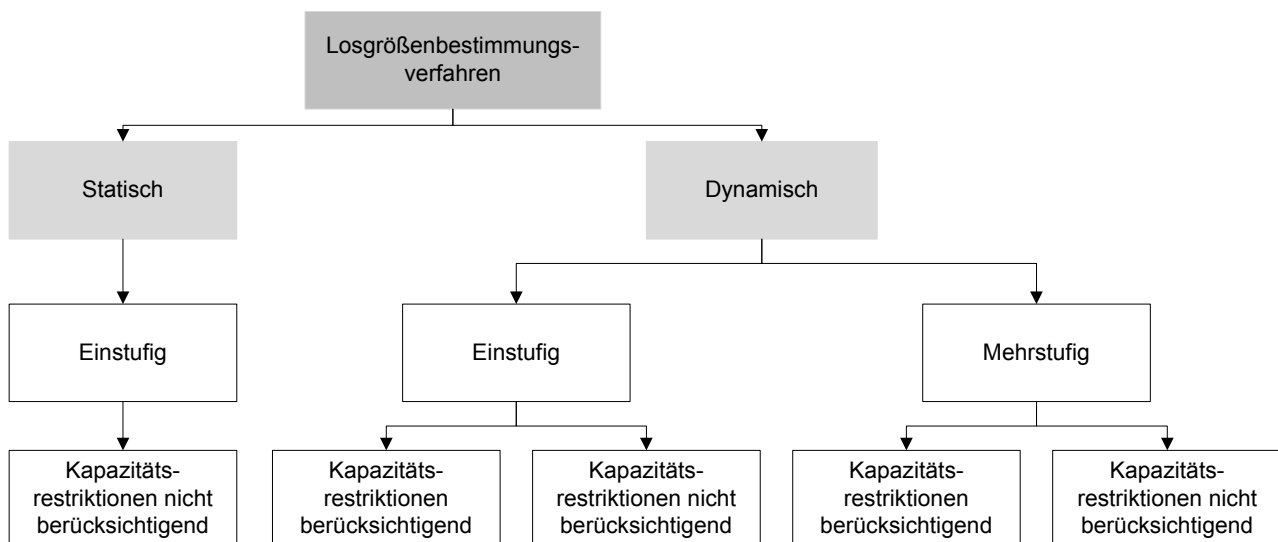


Abbildung 5-1 Übersicht zu Verfahren der Losgrößenbestimmung (s. Meers, Richter, Nickel 2009, S. 51)

Allgemein gehen statische Verfahren von einer über alle Perioden des Planungszeitraumes konstanten Nachfrage aus. Bei dynamischen Verfahren hingegen werden die Nachfragemengen der einzelnen Planungsperioden als zeitabhängig angenommen. Hier können für jede Periode des Planungszeitraumes spezifische Nachfragewerte und somit ein schwankender Bedarf abgebildet werden (Meers, Richter, Nickel 2009).

Statische Verfahren zur Losgrößenbestimmung existieren nur für einstufige Probleme, d. h. einstufige Erzeugnis- und Prozessstrukturen, während dynamische Verfahren nach Ein- und Mehrstufigkeit differenziert werden (vgl. Abschnitt 4.1.1) (Tempelmeier 2006, S. 203ff.). Eine Zusammenfassung mehrerer Periodenbedarfsmengen eines Endproduktes bzw. eines übergeordneten Zwischenproduktes (nach Fertigstellung eines Arbeitsganges) zu einem Fertigungslos und eine entsprechend frühzeitige Fertigstellung und Einlagerung dieser Produktmengen bedingt, dass gleichermaßen die zur Fertigstellung dieser Produkte erforderlichen Mengen an untergeordneten Zwischenprodukten zu einem früheren Zeitpunkt produziert und gelagert werden müssen. Diese durch die Mehrstufigkeit bedingten Interdependenzen werden lediglich im Rahmen der Losgrößenbestimmung durch mehrstufige dynamische Verfahren berücksichtigt, die bei Bestimmung der Losgröße entsprechend Lagerkostenzuwächse durch Bestandsaufbau auf allen Stufen gegenüber den Rüstkosteneinsparungen abwägen.

Ein zusätzliches Klassifizierungsmerkmal sowohl ein-, als auch mehrstufiger dynamischer Losgrößenverfahren besteht in der Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen (Meers, Rich-

ter, Nickel 2009). Kapazitäten sind zu berücksichtigen, wenn Ressourcen (z. B. Maschinen, Arbeitskräfte etc.) die Produktion in einer Periode limitieren. Werden diese Restriktionen nicht berücksichtigt, führt diese Vernachlässigung zur Nichterfüllbarkeit des geplanten Produktionsprogrammes, da zur Verfügung stehende Kapazitäten und aus der Planung resultierende Bedarfe divergieren. Unter Einbeziehung von Kapazitätsrestriktionen in die Bestimmung der Losgrößen/des Produktionsprogramms werden ressourcenbezogene Rüstkosten (bzw. Rüstzeiten) gegenüber Lagerkosten abgewogen. Sind in diesem Zusammenhang mehrstufige Produkt- und Prozessstrukturen gegeben, nehmen die einzelnen Arbeitsgänge zur Fertigung der Zwischenprodukte (vgl. Abschnitt 4.1.1) unterschiedliche Ressourcen in Anspruch (s. Abschnitt 4.1.2). Wird hingegen eine einstufige Modellierung der Losgrößenproblematik zu Grunde gelegt, ist eine arbeitsgangbezogene Darstellung (Produkt- und Prozessstruktur) und folglich eine detaillierte Kapazitätsbelegung verschiedener Ressourcen nicht möglich (Tempelmeier 2006, S. 203ff.). Hier wird undifferenziert eine verfügbare Gesamtkapazität einem Gesamtbedarf gegenübergestellt. Bei einer mehrstufigen Betrachtung wird die jeweils verfügbare Kapazität der verschiedenen Ressourcen durch die zur Produktion der entsprechenden Menge erforderlichen Zeiten sowie die aus Rüstvorgängen resultierenden Rüstzeiten beansprucht (Rossi 2003, S. 35). Nachstehend werden bedeutende Ansätze zur Losgrößenmodellierung dargestellt.

Bestehende Ansätze zur Modellierung von Losgrößenproblemen

Eines der bekanntesten statischen Verfahren zur Bestimmung einer wirtschaftlichen Produktionslosgröße ist das Berechnungsverfahren nach K. Andler, welches im englischsprachigen Raum auf F.W. Harris zurückgeht und als klassische Bestellmengen- bzw. Losgrößenplanung bekannt sowie in der Literatur vielfach detailliert erörtert worden ist (vgl. hier und im Folgenden Corsten 2007, S. 452ff.; Dyckhoff 2006; Andler 1929; Harris 1913; Domschke, Scholl 2005, S. 135ff.; Wagner, Whitin 1958; Zäpfel 2001, S. 134ff.). Die Losgrößenberechnung basiert auf den je aufgelegten Los entstehenden Rüstkosten (Rüstaufwand) und den aus der Lagerung gefertigter Produkte resultierenden Lagerkosten. Diese werden einander gegenübergestellt und summiert. Das Minimum der Gesamtkosten ist die kostenoptimale Losgröße (s. Abbildung 5-2).

$$x_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{2 \times f \times d}{h}}$$

x_{opt}	optimale Losgröße
f	Rüstkostensatz
d	Periodenbedarf
h	Lagerkostensatz

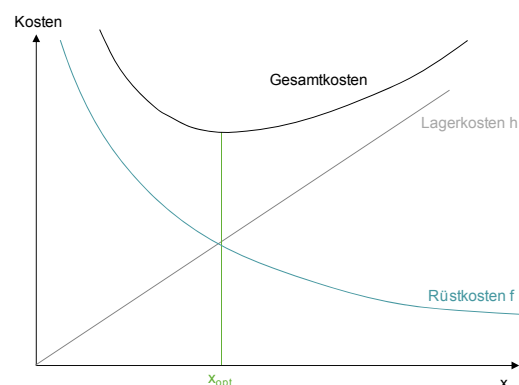


Abbildung 5-2 *Klassische Losgrößenberechnung nach Andler/Harris (vgl. Domschke, Scholl 2005, S. 135)*

Das Verfahren hat in der Praxis weite Verbreitung gefunden, da sich anwendbare Lösungen aufwandsarm berechnen lassen. Die klassische Bestellmengen- bzw. Losgrößenplanung unterliegt jedoch einigen Prämissen und vernachlässigt wesentliche Aspekte. Die Planung ist auf ein Produkt und einen Lagerkostensatz beschränkt. Eine Berücksichtigung der Prozess- und Produktstruktur findet folglich nicht statt. Die Nachfrage wird über alle Perioden des Planungszeitraums als konstant, und die Kapazitäten der Arbeitssysteme als unbegrenzt angenommen. Weiterhin werden keine Lagerkapazitäten und Fehlmengen sowie die damit verbundenen Kosten berücksichtigt. Weitere Prämissen sind in der unendlich großen Produktionsgeschwindigkeit und der Annahme konstant bleibender variabler Herstellkosten zu sehen (Corsten 2007; Dyckhoff 2006). Zudem existieren zahlreiche Erweiterungen des Modells, z. B. die Berücksichtigung einer offenen Produktion (Weitergabe von Produkten aus in Produktion befindlichen Losen). Zur Berechnung der wirtschaftlichen Losgröße existieren in Literatur und Industrie zahlreiche weiterentwickelte Formeln und Heuristiken, die auf dem dargestellten klassischen Losgrößenmodell nach Amler aufbauen und dieses um zusätzliche Faktoren, wie z. B. Kapitalbindungskosten, die während der tatsächlichen Produktionszeit oder während der Übergangszeiten zwischen verschiedenen Produktionsschritten anfallen, ergänzen.

Für dynamische Losgrößenprobleme werden in der Literatur verschiedene Modelle diskutiert, die eine Losgrößenberechnung eines oder mehrerer Produkte auf einem oder mehreren Arbeitssystemen entsprechend mit ein- oder mehrstufigen Produkt- und Prozessstrukturen ermöglichen. Die einzelnen Ausprägungen stellen unterschiedliche Problemklassen dynamischer Losgrößenprobleme dar und erfordern auf Grund der jeweiligen Komplexität unterschiedliche Lösungsverfahren (auf diese wird in Unterkapitel 6.1 näher eingegangen). Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihres Planungsumfanges, welcher vorrangig durch die Berücksichtigung zur Verfügung stehender Kapazitäten der Fertigungseinrichtungen beeinflusst wird. Dynamische Einprodukt-Losgrößenprobleme, wie z. B. das Single Level Uncapacitated Lot Sizing Problem SLULSP (Tempelmeier 2006, S. 138; Wagner, Whitin 1958), bestimmen die optimale Losgröße bei Herstellung eines Produktes auf einem Arbeitssystem. Die Mehrstufigkeit der Produkt- und Prozessstruktur und die Kapazität des Arbeitssystems werden in der Betrachtung vernachlässigt. Durch eine derartige Modellierung können folglich zwar schwankende Nachfragemengen berücksichtigt werden, die Generierung tatsächlich realisierbarer Produktionspläne ist mangels einer Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen jedoch nicht gegeben. Werden neben schwankenden Bedarfen mehrere, um knappe Ressourcen konkurrierende, Produkte in die Berechnung einbezogen, ergibt sich ein einstufiges Mehrprodukt-Losgrößenproblem, wie z. B. das Capacitated Lot Sizing Problem CLSP (Tempelmeier 2006, S. 166). Die Berechnung der Losgrößen erfolgt unter Annahme knapper Kapazitäten und für mehrere Produkte mit jeweils schwankenden Bedarfen, die jedoch eine einstufige Erzeugnisstruktur aufweisen. Bei Vorliegen einer mehrstufigen Erzeugnis- und Prozessstruktur ist für eine realitätsnahe Planung neben den bisher betrachteten Rahmenbedingungen zusätzlich die Mehrstufigkeit der Produktionsprozesse zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.1.1).

In Produktionsplanungssystemen wird zumeist das Material Requirements Planning (MRP) verwendet, u. a. zur Festlegung der Produktionsmengen. Dabei handelt es sich um ein Suk-

zessivplanungskonzept, das keine Kapazitätsbeschränkungen der Ressourcen berücksichtigt. Der aus der Planung resultierende Produktionsplan ist durch die sukzessive Planung häufig mit sehr hohen Kosten verbunden und auf Grund der Annahme von unbeschränkten Kapazitäten häufig nicht realisierbar (Rossi 2003, S. 16). Im Gegensatz zu diesem Konzept wird durch die gleichzeitige Berücksichtigung der Produkt- und Prozessstruktur sowie beschränkter Ressourcen in der Produktionsprogrammplanung eine simultane Planung von Losgrößen und Fertigungsterminen angestrebt (Rossi 2003, S. 21). Modelle dieser Art werden als kapazitiertes mehrstufiges Mehr-Produkt Losgrößenproblem, wie z. B. das Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem MLCLSP, bezeichnet und in der Literatur in zahlreichen Modellformulierungen diskutiert (Derstroff 1995; Prasad, Krishnaiah 2001; Tempelmeier 1997; Tempelmeier, Derstroff 1993; Rossi 2003).

Entscheidungsrelevante Kosten im Rahmen von Losgrößenentscheidungen

Grundvoraussetzung zur Erfassung entscheidungsrelevanter Kosten ist eine entscheidungsorientierte Kostenrechnung „die darauf ausgerichtet ist, unternehmerische Entscheidungen zu fundieren und zu kontrollieren“ (Gabler Wirtschaftslexikon 2010a). Allgemein weisen Kostenrechnungssysteme einen zweistufigen Aufbau auf, zum einen werden in der Kostenerfassung systematische Kostendaten gesammelt, zum anderen werden durch die Kostenverteilung die erfassten Kosten den Kostenobjekten (z. B. Produkten) zugeteilt (Horngren u. a. 2001, S. 26f.). Die Effektivität eines Kostenrechnungssystems wird dabei von dem Genauigkeitsgrad bestimmt, welcher aussagt, wie exakt die einzelnen Kosten erfasst und voneinander abgegrenzt werden können (Jossé 2008, S. 26). Zudem werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Zweckneutralität der Kostenerfassung gestellt. Um eine Entscheidungsfundierung leisten zu können, muss eine entscheidungsorientierte Kostenrechnung entscheidungsrelevante Kosten, kurz als relevante Kosten bezeichnet, bereitstellen. Um eine Definition entscheidungsrelevanter Kosten vorzunehmen, wird zunächst der Kostenbegriff allgemein dargestellt.

Im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung (Produktion) wird unter dem Begriff der Kosten allgemein ein bewerteter sachzielbezogener Güterverzehr einer Periode verstanden (Corsten 2007, S. 115; Jossé 2008, S. 25). Im Zusammenhang mit einer entscheidungsorientierten Kostenrechnung kommt der Art der Bewertung des Güterverzehrs eine zentrale Rolle zu. Auf Basis der Bewertung wird der allgemeine Kostenbegriff in den wertmäßigen und den pagatorischen Kostenbegriff unterteilt (Domschke, Scholl 2005, S. 301). Pagatorisch wird ein Güterverzehr mit historischen und somit realisierten Beschaffungspreisen bewertet (Domschke, Scholl 2005, S. 302). Wertbestimmend ist nach Corsten (s. hier und im Folgenden Corsten 2007, S. 115ff.) somit allein der Beschaffungsmarktpreis und die damit verbundenen innerbetrieblichen Ausgaben. Im Gegensatz hierzu zielt eine wertmäßige Kostenbetrachtung auf eine entscheidungsorientierte Bewertung des Güterverzehrs ab, die nicht ausschließlich mit den Zahlungsströmen der Ressourcenbeschaffung verbunden ist, sondern zudem den Grad der Knappheit eines Produktionsfaktors berücksichtigt. Die Knappheit einer Ressource wird dabei mittels Opportunitätskosten erfasst. Opportunitätskosten werden in diesem Zusammenhang

als „entgangene Deckungsbeiträge einer nicht gewählten Handlungsmöglichkeit“ (Gabler Wirtschaftslexikon 2010d) angesehen und sind als Vergleichsgröße für die Beurteilung des erzielten bzw. erzielbaren Deckungsbeitrags bei Vorliegen eines Engpasses bedeutsam. Folglich kann derselbe Produktionsfaktor in unterschiedlichen Entscheidungssituationen eine unterschiedliche Bewertung erfahren, weshalb der Wiederbeschaffungspreis zur Wertbestimmung herangezogen wird. Speziell unter relevanten Kosten ist in diesem Zusammenhang der Teil der Gesamtkosten zu verstehen, der vom Treffen einer bestimmten Entscheidung abhängig und in diesem Sinn für betriebliche Entscheidungsprobleme relevant ist. Für eine fundierte Entscheidungsfindung sollten folglich Gesamtkosten nicht Stückkosten erfasst werden (Horngren u. a. 2001, S. 36). Die Einteilung in relevante Kosten und nicht relevante Kosten kann zudem nur im Hinblick auf das jeweilige Entscheidungsproblem vorgenommen werden. Allgemein gilt jedoch (Gabler Wirtschaftslexikon 2010f):

1. werden keine Engpässe wirksam, setzen sich relevante Kosten aus den **Einzelkosten des betreffenden Entscheidungsobjekts/Kostenobjektes** zusammen,
2. werden Engpässe wirksam, sind Opportunitätskosten als relevante Kosten zu berücksichtigen.

Aus der dargestellten Definitionen wird deutlich, dass Kosten die zur Entscheidungsfindung herangezogen werden grundsätzlich wertmäßig, d. h. durch die Wiederbeschaffungspreise einzelner Produktionsfaktoren, erfasst werden sollten und dass grundsätzlich Einzelkosten zu berücksichtigen sind (s. Abbildung 5-3). Eine Einteilung in Einzel- und Gemeinkosten erfolgt in der Kostenverteilung und ergibt sich aus der direkten oder indirekten Zurechenbarkeit von Kosten zu Kostenobjekten, wie z. B. Kostenträgern (Produkte, Aufträge) oder Kostenstellen (Fräserei) (vgl. hier und im Folgenden Plinke, Rese 2006; Jossé 2008, S. 9f., Jossé 2008, S. 33) (Horngren u. a. 2001, S. 31)). Einzelkosten sind direkt mit einem Kostenobjekt verbunden und können diesem durch eine Wirkbeziehung zugeordnet werden. Gemeinkosten hängen mit dem betrachteten Kostenobjekt zusammen, können diesem aber nicht direkt zugeordnet werden. Es erfolgt eine Kostenzurechnung auf Basis eines Kostenschlüssels.

Abhängigkeit der Kosten von Änderung des Kostentreibers	Fixe Kosten	Variable Kosten
Möglichkeit zur Zurechnung der Kosten auf ein Kostenobjekt	Gemeinkosten	Einzelkosten

Abbildung 5-3 Abgrenzung unterschiedlicher Kostenbegriffe (in Anlehnung an Plinke, Rese 2006, S. 37)

Als relevante Kosten für die Losgrößenentscheidung gelten, wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, vor allem Lager- und Rüstkosten. Zudem sind variable Produktionskosten einzubeziehen, sofern diese von der Zeit oder von der Losgröße abhängig sind (Tempelmeier 2006, S. 132). Im Rahmen dieser Kostenfaktoren sind folglich entsprechende für den Kontext der Nachserienversorgung relevante Einzelkosten zu berücksichtigen, die dem Kostenobjekt, d. h. dem Ersatzteil für welches die Nachserienversorgung geplant wird, direkt zurechenbar sind. Im Fall

der Produktionskosten ist der variable Anteil dieser Einzelkosten einzubeziehen. Kosten können nur in Hinblick auf ein Kostenobjekt als variabel oder fix definiert werden. Hierzu ist ein spezifischer Kostentreiber zu definieren, der bei Änderung seiner Ausprägung die Höhe der resultierenden Gesamtkosten des betrachteten Kostenobjektes beeinflusst. Üblicherweise wird die Ausbringung als Kostentreiber aufgefasst. Sind die erfassten Kosten abhängig vom Kostentreiber des Kostenobjektes, sind diese als variabel anzusehen und umgekehrt (Horngren u. a. 2001, S. 27ff.). Nachstehend werden die für den Kontext der Losgrößenplanung relevanten Kostengrößen allgemein beschrieben. Hierzu werden die in den einzelnen Faktoren zu berücksichtigenden Kostengrößen aufgezeigt und erörtert, welche gemäß den soeben dargestellten Erkenntnissen bei einer Losgrößenentscheidung allgemein zu berücksichtigen sind.

Variable Produktionskosten

Variable, zeitlich veränderliche Einzelkosten gelten für die Losgrößenplanung als entscheidungsrelevante Kostengrößen. Zunächst werden die gesamten Produktionskosten betrachtet und entsprechende Einzelkostenpositionen aufgezeigt. Nach der Modellierung werden die für den konkreten Entscheidungsfall der Losgrößenplanung in der Nachserienversorgung relevanten variablen, zeitlich veränderlichen Produktionskosten in Bezug auf diese Einzelkosten konkretisiert. Produktionskosten werden im weiteren Sinn als „Summe der bei der betrieblichen Leistungserstellung durch den Einsatz von Produktionsfaktoren entstehenden Kosten“ verstanden (Gabler Wirtschaftslexikon 2010e). Spezifischer betrachtet werden sie definiert als die im Unternehmensbereich Produktion bzw. Fertigung anfallenden Kosten und spiegeln in ihrer Höhe die jeweils gegebenen Bedingungen in der Produktion wider. In der Kalkulation werden Produktionskosten synonym als Herstellkosten bezeichnet. Der bekannteste Ansatz zur Ermittlung und Erfassung der Herstellkosten bildet die mehrstufige differenzierte Zuschlagskalkulation, die in der Literatur vielfach erörtert wurde (vgl. hier und im Folgenden Jossé 2008, S. 104ff.; Götze 2010, S. 112ff.; Plinke, Rese 2006, S. 116ff.; Westkämper 2006, S. 93ff.; Domschke, Scholl 2005, S. 322ff.; Müller 2006, S. 172ff.; Wöltje 2007, S. 21ff.). Die Herstellkosten ergeben sich aus den Fertigungskosten FK und den Materialkosten MK. Diese Kostenblöcke lassen sich weiter unterteilen. Die Materialkosten MK umfassen die Materialeinzelkosten MEK und Materialgemeinkosten MGK. Die Fertigungskosten FK ergeben sich als Summe aus Fertigungslohnkosten FLK (in der Literatur oft auch als Fertigungseinzelkosten FEK bezeichnet), Fertigungsgemeinkosten FGK und den Sondereinzelkosten der Fertigung SEK, die nur für ein bestimmtes Produkt anfallen. Materialeinzelkosten werden für einzelne Kostenobjekte verursachungsgerecht über die Produktionsmenge und den zum jeweiligen Zeitpunkt gegebenen Einkaufspreis (Wiederbeschaffungspreis) berechnet. Fertigungslohnkosten ergeben sich analog über Produktionsmenge, die je Stück erforderliche Bearbeitungszeit t_e [h/Stck.] und den Stundensatz des prozessausführenden Mitarbeiters.

Die bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigenden Kosten sind Teile der in den Herstellkosten aufgezeigten Einzelkosten. Um eine fundierte Entscheidungsfindung zu gewährleisten, ist es im betrachteten Kontext erforderlich, die verbleibenden Gemeinkosten zu konkretisieren. Eine Differenzierung und verursachungsgerechte Berechnung der Materialge-

meinkosten ist zumeist schwierig (und mit hohem Aufwand verbunden). Unter diese Position fallen bspw. Kosten für die Einlagerung von Materialien, wie sie im nächsten Abschnitt weiter detailliert werden. Durch Berücksichtigung der Maschinenstundensatzrechnung werden die Fertigungsgemeinkosten FGK in Maschinenkosten K_M (Einzelkosten) und die übrigen Fertigungsgemeinkosten FGKR (Restfertigungsgemeinkosten) differenziert. Diese Aufschlüsselung ist in (5-1) dargestellt.

$$FK = FLK + K_M + FGKR + SEK \quad (5-1)$$

FK	Fertigungskosten
FLK	Fertigungslohnkosten
FGKR	Restfertigungsgemeinkosten
SEK	Sondereinzelkosten der Fertigung

Die Maschinenkosten K_M errechnen sich durch Multiplikation des Maschinenstundensatzes K_{MH} mit der für die Fertigung eines bestimmten Kostenobjektes erforderlichen Belegungszeit t_b (5-2). Der Maschinenstundensatz K_{MH} ergibt sich als Summe der für eine Periode direkt zurechenbaren Kosten K_n dividiert durch die periodenbezogene Nutzungszeit T_N einer Fertigungseinrichtung (Westkämper 2006, S. 95ff.; Wöltje 2007, S. 25).

$$K_M = K_{MH} \times t_b \quad (5-2)$$

K_{MH}	Maschinenstundensatz
t_b	Belegungszeit der Maschine

Die Nutzungszeit T_N bildet neben der Instandhaltungszeit sowie der Ruhezeit einen Anteil der gesamten Maschinenzeit und setzt sich aus der Lastlaufzeit (produziert), der Leerlaufzeit (läuft aber produziert nicht) und der Hilfszeit (produktionsbedingter Stillstand) zusammen. Die durch die Fertigungseinrichtung verursachten Kosten K_n ergeben sich aus kalkulatorischen Abschreibungen K_A , kalkulatorischen Zinsen K_Z , Raumkosten K_R , Instandhaltungskosten K_I und Energiekosten K_E . Abschreibungen werden allgemein als Wertverzehr des Sachvermögens verstanden (Westkämper 2006, S. 78 und 84) und beschreiben die Rückführung von Sach- in Geldvermögen. Der Verzehr des real bestehenden Wertes entsteht verbrauchsorientiert sowie wirtschaftlich und zeitlich bedingt (Westkämper 2006, S. 84). Zinsen stellen Kosten für die Nutzung von Kapital dar und werden vereinfacht unter Berücksichtigung des durchschnittlich eingesetzten Kapitals berechnet (Westkämper 2006, S. 83). Raumkosten werden auf Basis des insgesamt erforderlichen Raumbedarfs anteilig über einen Quadratmetersatz auf jene Kostenobjekte verrechnet, die den Raum in Anspruch nehmen. Der herangezogene Quadratmetersatz umfasst Kosten, wie bspw. die für den Raum anfallende Miete und die Betriebskosten. Zudem fallen Instandhaltungs- und Energiekosten an, die über einen längeren Zeitraum erfasst und über Verbrauchskennzahlen auf die entsprechenden Maschinen verrechnet werden (Westkämper 2006, S. 96). Die einzelnen kostenbestimmenden Faktoren können u. a. wie folgt berechnet werden (s. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1 *Kostenfaktoren des Maschinenstundensatzes (in Anlehnung an Westkämper 2006, S. 96)*

Kostenfaktoren		Berechnung
Abschreibungen (linear)	K_A	$\frac{(\text{Anschaffungs- bzw. WB - Wert}) - \text{Restwert}}{\text{Nutzungsdauer}}$
Zinsen	K_Z	$\frac{(\text{Anschaffungswert} + \text{Restwert})}{2} \times \text{Zinssatz}$
Raumkosten	K_R	Raumbedarf x qm Satz
Instandhaltungskosten	K_I	Gesamte Instandhaltungskosten pro Jahr ----- WB - Wert x Instandhaltungsfaktor
Energiekosten	K_E	kW - Anschlusswert x Leistungsg rad x Strompreis

Die in der Zuschlagskalkulation aufgeführten Einzelkostenpositionen bilden die Grundlage für die Wahl der im Rahmen der Losgrößenentscheidung zu berücksichtigenden variablen, zeitlich veränderlichen Produktionskosten. Für das spezielle Kostenobjekt, d. h. das Produkt, für welches die Ersatzteilversorgung geplant wird, sind entsprechend die zuordenbaren Einzelkosten über die aufgezeigten Berechnungsmöglichkeiten zu extrahieren. Zudem ist zu berücksichtigen, dass nur variable d. h. sich mit dem Kostentreiber der zu produzierenden Losgröße ändernde Anteile dieser Kosten zu berücksichtigen sind, die zudem zeitlich veränderliche Produktionskosten darstellen.

Lagerkosten

Lagerkosten werden allgemein als ein Teil der Logistikkosten aufgefasst, welche die „für die Überwindung von Raum-, Zeit- oder Mengendisparitäten anfallenden Kosten der Bereitstellung und Bereithaltung von Logistikkapazität und -betriebsbereitschaft sowie der Planung, Durchführung und Kontrolle einzelner logistischer Prozesse (Lagerung, Transport, Kommissionierung, Palettierung etc.)“ darstellen (Gabler Wirtschaftslexikon 2010c). Logistikkosten setzen sich gemäß dieser Definition neben den Lagerkosten aus Transport- und Handlingkosten sowie den im Rahmen der Logistiksteuerung anfallenden Kosten zusammen. Lagerkosten (LK) als zentrale Variable in Entscheidungsproblemen umfassen „die für die Zeitüberbrückung von Lagergütern (Einsatzstoffe, Halb- und Fertigprodukte, Reserveanlagen etc.) anfallenden Kosten der Bereitstellung und Bereithaltung von Lagerkapazität und -betriebsbereitschaft sowie der Vor- und Nachbereitung und Durchführung des Lagerprozesses“ (Gabler Wirtschaftslexikon 2010b). Ein wesentlicher Bestandteil der Lagerkosten ergibt sich folglich aus den Kosten zur Bereitstellung der Lagerkapazität, d. h. den Kosten für Lagergebäude, Lagereinrichtungen, Lagertransportmittel und des Lagerpersonals. Zudem zählen die Kosten zur Aufrechterhaltung der Lagerbereitschaft zu den Lagerkosten. Diese beinhalten Beleuchtungs-, Heizungs- bzw. Kühlungskosten sowie Instandhaltungskosten. Kosten der Lagervor- und -nachbereitung sind jene Kosten, die durch das Ein-, Um- und Auslagern der vorzuhaltenden Produkte entstehen, hier sind z. B. Treibstoffkosten für die Transportmittel, Verpackungskosten, Kosten für die Kommissionierung der Produkte zu nennen. Letzter im Rahmen der Lagerkosten zu berücksichtigen.

sichtiger Faktor bilden die Kosten der Lagerung selbst. Diese entfallen auf die Kosten der quantitativen und qualitativen Erhaltung der Lagergüter, z. B. durch Einstellung spezieller Lagerbedingungen (Konservierung), und Kosten durch kalkulatorische Zinsen, die das in den Lagergütern gebundene Kapital beschreiben. Die im Rahmen der Entscheidungsfindung bei Losgrößenplanung einzubeziehenden Lagerkosten setzen sich aus diversen soeben aufgezeigten Kostenanteilen zusammen, die in der Literatur zumeist in Kapitalbindungskosten und Lagerhaltungskosten differenziert werden (Bothe 2003, S. 141ff.).

Generell ergeben sich Lagerkosten für die Eingangslagerung, die Zwischenlagerungen und die Ausgangslagerung. Diese werden in der betrieblichen Leistungsverrechnung überwiegend pauschal auf das betrachtete Lagerprodukt (Kostenobjekt) verrechnet. Wird die bereits oben erörterte Zuschlagskalkulation zu Grunde gelegt, werden Kosten für die Eingangslagerung durch die Materialgemeinkosten erfasst. Die beiden letzteren Anteile der Lagerkosten werden den Fertigungsgemeinkosten bzw. bei Nutzung der Maschinenstundensatzrechnung den Restfertigungsgemeinkosten zugewiesen und nicht differenziert betrachtet (Gabler Wirtschaftslexikon 2010b). Insbesondere die beiden letzten Kostenfaktoren, d. h. die Lagerung zwischen zwei Wertschöpfungsabschnitten und die Einlagerung der Endprodukte, sind im Kontext näher zu betrachten.

Analog zu den Fertigungsgemeinkosten ist es erforderlich die Lagerkosten näher zu differenzieren und eine für die Kostenobjekte verursachungsgerechte Ermittlung in Form von Einzelkosten zu ermöglichen, um diese als Entscheidungsgrundlage heranziehen zu können. In der Literatur werden zur kostenobjektbezogenen Berechnung der Lagerkosten LK die oben dargestellten Kostenfaktoren der Kapitalbindung und der Lagerhaltung zu einem Lagerkostenfaktor l_k zusammengefasst, der sich auf eine frei zu definierende Periode bezieht (Corsten 2007, S. 445; Wiendahl 1997, S. 307). Die Berechnung der Lagerkosten auf Basis des Lagerkostenfaktors bzw. -satzes erfolgt klassischerweise nicht über der Zeit, sondern als Funktion der Stückzahl (Bothe 2003, S. 141ff.). Dementsprechend wird der Lagerkostensatz zur Ermittlung der Lagerkosten mit dem Wert des Lagerbestands L_w multipliziert. Dieser ergibt sich aus dem physischen Lagerbestand y multipliziert mit dem Wert einer Einheit w_y , der zur Lagerbewertung angenommen wird. Die Berechnung der Lagerkosten für eine Periode (auf die sich der Lagerkostenfaktor bezieht) ist in (5-3) dargestellt.

$$LK = L_w \times l_k = y \times w_y \times l_k \quad (5-3)$$

L_w Lagerwert

l_k Lagerkostensatz (Bezug zur Planperiode)

w_y Wert einer Lagerbestandseinheit y , i. d. R. Standard- oder Einstandspreis

Die dargestellte Berechnung beruht auf der Annahme eines über die Periode konstanten Lagerbestandes. Sollen veränderliche Bestände in der Lagerkostenberechnung berücksichtigt werden, können der Literatur (Bothe 2003, S. 142f.) komplexe Verfahren entnommen werden, deren Erörterung an dieser Stelle jedoch auf Grund der Komplexität nicht erfolgen soll. Bei konstanten Lagerabgängen kann vereinfachend ein durchschnittlicher Lagerbestand (y_m) zur

Berechnung herangezogen werden (Wiendahl 1997, S. 307). Bei der Zurechnung der anfallenden Kosten zu einem Kostenobjekt, d. h. dem Produkt, für welches die Ersatzteilversorgung geplant wird, ist der Kostentreiber entsprechend in der Menge einzulagernder Produkte zu sehen.

Losfixe Kosten/Rüstkosten

Allgemein sind Rüstkosten in Bezug auf den Kostentreiber Menge als unabhängig, d. h. fix, und als eine je Produktwechsel anfallende Kostengröße definiert. Generell sind die anteiligen Rüstkosten gegenläufig zur Losgröße. Das heißt, dass bei steigender Losgröße weniger anteiliger Rüstaufwand entsteht und die Rüstkosten somit sinken (Kiener 2006, S. 198). Rüstkosten setzen sich aus den Material- und Lohnkosten für die Reinigung, Justierung und den Wechsel der Werkzeuge und Anlagen zusammen (Voigt 2008, S. 569). Diese Positionen sind entsprechend in Bezug auf das spezifische Kostenobjekt aus der Zuschlagskalkulation zu extrahieren. Für eine vereinfachte Berechnung werden Rüstkosten in Berechnungen häufig idealisiert, d. h. als unabhängig von der Auftragsabfolge betrachtet (Ihme 2006, S. 242). Bei Berücksichtigung der Reihenfolge wird die wertmäßige Höhe der Rüstkosten durch zahlreiche Folgekosten beeinflusst (Kiener 2006, S. 198), die in dieser Ausarbeitung nicht einbezogen werden. Zusätzlich zu den direkt entstehenden Kosten müssen die durch die Rüstvorgänge entstehenden Stillstandzeiten berücksichtigt werden. Diese erzeugen eine entsprechend unproduktive Zeit und erhöhen hierdurch indirekt die Rüstkosten (Voigt 2008, S. 569; Tempelmeier 2006, S. 132). Entscheidungstheoretisch betrachtet quantifizieren die Rüstkosten daher den durch einen Rüstvorgang gegebenen entgangenen Nutzen und stellen u. a. Opportunitätskosten dar. Ein Nutzenentgang wird vor allem dadurch verursacht, dass verfügbare Kapazität der Ressourcen nicht zur Wertschöpfung i. e. S. eingesetzt wird, sondern durch den im eigentlichen Sinn nicht wertschöpfenden Prozess des Rüstens gebunden wird. Ist die Kapazität einer Resource knapp, dann entsprechen die Rüstkosten dem entgangenen Deckungsbeitrag der mangels Kapazität nicht produzierten Produktionsmenge zuzüglich der entstehenden direkt zurechenbaren Kosten. Sind die Kapazitäten der Produktionsfaktoren nicht knapp, dann ist der Opportunitätskostenanteil der Rüstkosten Null (Tempelmeier 2006, S. 132). Bei der Zurechnung der anfallenden Kosten zu einem Kostenobjekt, d. h. dem Produkt, für welches die Nachserienversorgung geplant wird, ist der Kostentreiber entsprechend in der Anzahl der für den gesamte Planungszeitraum zu realisierenden Rüstvorgänge, jedoch nicht in der Produktionsmenge zu sehen.

Zur Ermittlung der Kosten ist eine entscheidungsorientierte Datenerfassung erforderlich. Jedoch ist in Zusammenhang mit dem Gewicht, d. h. der Höhe anteiliger Kosten, zu prüfen ob der Aufwand einer Erfassung als Einzelkosten den Nutzen übersteigt (z. B. bei einer Kostenposition sehr geringer Höhe) (Horngren u. a. 2001, S. 28f.). In diesem Sinn ist vor allem nicht allein die Höhe der Kosten ausschlaggebend für die Qualität des Ergebnisse einer derartigen Kostenbetrachtung, sondern insbesondere die Relation der Kostenfaktoren zueinander (Wollenweber 2006, S. 53).

5.3 Modellauswahl und Adaption für den Kontext der Nachserienversorgung

Aufbauend auf der grundsätzlichen Eignung von Losgrößenmodellen zur Beschreibung von Produktions- und Bevorratungsstrategien und den dargestellten Erkenntnissen wird nachstehend ein bestehendes Modell zur Losgrößenplanung gewählt und für den Kontext der Nachserienversorgung adaptiert. Dieses hat den in Unterkapitel 5.1 dargestellten Anforderungen und Eigenschaften zu genügen, die es zwangsläufig für den Kontext zu berücksichtigen gilt.

Ein produktspezifisches Merkmal, welches es zu berücksichtigen gilt, ist der Bedarfsverlauf von Ersatzteilen der sich abhängig von betrachteten Ersatzteilty verschieden, jedoch dynamisch verhält. Eine statische Vorgehensweise unter der Annahme, dass die Bedarfsdaten im Zeitablauf konstant bleiben, ist zur Planung der Losgrößen folglich nicht realisierbar. Im Rahmen dynamischer Losgrößenmodelle kann für jedes Planungsobjekt eine definierte Anzahl an Planungsperioden individuell festgelegt und der Bedarfsverlauf dynamisch abgebildet werden, wobei die in Unterkapitel 5.2 dargestellten Ansätze jeweils ermöglichen, variable Produktionskosten in die entscheidungsrelevanten Kosten einzubeziehen.

Im Rahmen dynamischer Modelle zur Losgrößenplanung ist auf Basis der in Unterkapitel 5.2 dargestellten Differenzierungskriterien zu spezifizieren, welcher allgemeinen Problemklasse das zu entwickelnde Modell entspricht. Hier ist zu analysieren, inwieweit eine Berücksichtigung einer mehrstufigen Produkt- und Prozessstruktur sowie von beschränkten Kapazitäten erforderlich ist. In diesem Zusammenhang soll gleichermaßen kurz auf die Problematiken der zu realisierenden **produktionsstufenübergreifenden** Losgrößenplanung eingegangen werden (vgl. Abbildung 5-4).

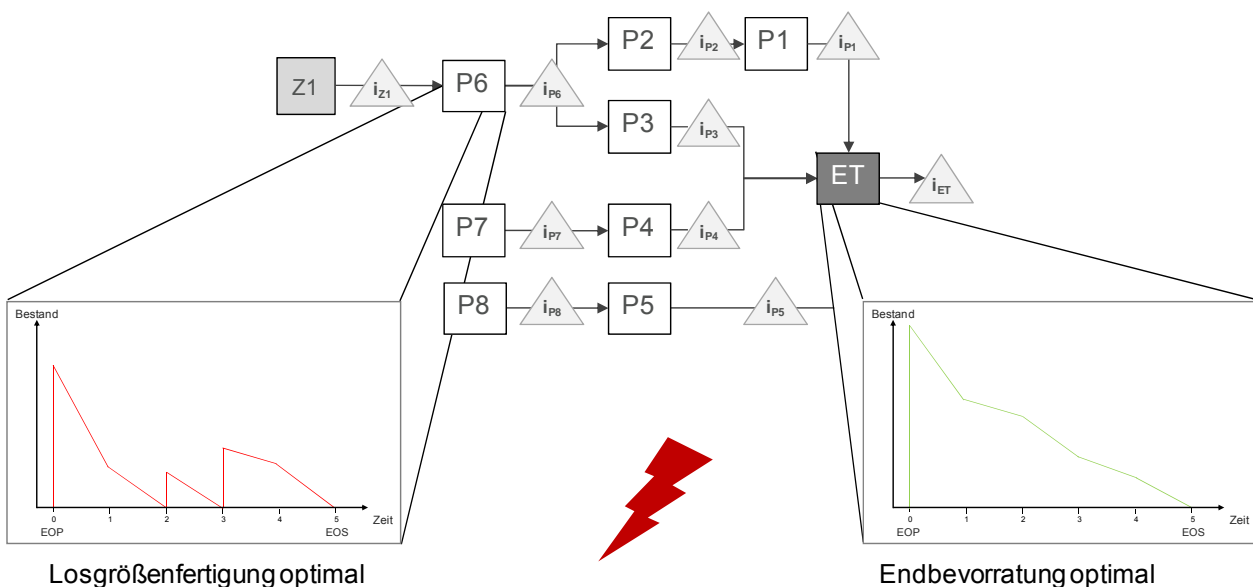


Abbildung 5-4 Problematiken produktionsstufenübergreifender Losgrößenplanung

Die Zusammenfassung mehrerer Periodenbedarfsmengen übergeordneter (Zwischen-) Produkte zu einem Los und die damit verbundene frühzeitige Fertigstellung und Einlagerung dieser Produktmengen bedingt, dass auch bestimmte Mengen an untergeordneten (Zwischen-) Produkten zu einem früheren Zeitpunkt zu produzieren und einzulagern sind (Tempelmeier

2006, S. 203ff.). Die Interdependenzen zwischen den aus den einzelnen Produktionsstufen resultierenden (Zwischen-) Produkte sind zu berücksichtigen, um entstehende Zwischenlagerbestände aufzuzeigen und diese kostenmäßig durch die Lagerkosten in die Planung einzubeziehen. Durch die Berücksichtigung der Interdependenzen können zudem auf einzelnen Produktionsstufen keine widersprüchlichen Strategien generiert werden, wie bei der sukzessiven Planung der Losgröße für jedes (Zwischen-) Produkt, da zum einen die mengenmäßigen Zusammenhänge und zum anderen die zeitliche Abfolge der Produktionsstufen berücksichtigt werden. Durch die Darstellung der in den Produktionsstufen auszuführenden Prozesse kann zudem theoretisch eine Zuteilung zu definierten Ressourcen vorgenommen werden, wie es die Option zur Integration in die laufende Produktion erfordert. Durch eine entsprechende Zuweisung (vgl. Abschnitt 4.1.2) ist es möglich, ressourcenbezogene Rüstkosten (bzw. Rüstzeiten) zu definieren und in die Losgrößenberechnung zu integrieren. Die Ressourcen bzw. deren Kapazitäten werden jedoch durch variable, losgrößenabhängige Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten in Anspruch genommen, weshalb neben der Berücksichtigung einer mehrstufigen Produkt- und Prozessstruktur knappe Ressourcen zu berücksichtigen sind, um eine Planung von Losgröße und Fertigungszeitpunkten auf Basis von Produktionsstufen zu realisieren. (Rossi 2003, S. 35).

Aus den dargestellten Gründen ist ein kapazitiertes mehrstufiges Mehrprodukt-Losgrößenproblem (Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem MLCLSP) zu wählen. Dieses beschreibt ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem zur Minimierung der Gesamtkosten unter Planung der Losgrößen und Fertigungszeitpunkte einer mehrstufigen Produkt- und Prozessstruktur bei mehreren beschränkten Ressourcen und ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet: generelle, nicht-zyklische Produkt- und Prozessstruktur mit mehreren Endprodukten, dynamische deterministische Endproduktbedarfe, mehrere Ressourcen mit beschränkten Kapazitäten, die von Produktionsstufen in Anspruch genommen werden können (stufenübergreifende Ressourcenkonkurrenz). Jede Produktionsstufe und die in ihr zusammengefassten Prozesse sind einer Ressource (z. B. Maschine oder Bereich Montage) zugeordnet (Tempelmeier, Derstroff 1993, S. 64).

5.3.1 Formulierung des Modells

Nachstehend wird das MLCLSP im Kontext der Langzeitversorgung mit Ersatzteilen (Nachserienphase) ausformuliert. Grundlage für die Modellierung und Anpassung des MLCLSP bilden die in den vorangehenden Kapiteln dargestellten Inhalte. Lineare Optimierung oder lineare Programmierung basiert auf Modellen, lineare Programme (LP) genannt, die aus einer oder mehreren linearen Zielfunktion(en) und zumeist einer Vielzahl von linearen Nebenbedingungen bestehen (Domschke, Drexl 2005, S. 7). Die Variablen dürfen bei der linearen Programmierung (zumeist nichtnegative) reelle Werte annehmen. Bei ganzzahligen (linearen) Programmen hingegen sind die Variablen als ganze Zahlen oder Binärzahlen definiert (Domschke, Drexl 2005, S. 8). Modelle deren Variablen teilweise ganzzahlige bzw. binäre Werte annehmen dürfen, heißen gemischt ganzzahlige Programme (MIP - Mixed Integer Programm).

Für ein lineares Programm gelten jedoch allgemein folgende Bezeichnungen (Hülsmann 2005, S. 224ff.; Homburg 2000, S. 562ff.; Marti, Gröger 2000, S. 2):

1. die zu optimierende Funktion $z = c_T x$ heißt die Zielfunktion,
2. die Ungleichungen $Ax < b$ heißen Restriktionen,
3. die Ungleichungen $x > 0$ heißen Nichtnegativitätsbedingungen,
4. jeder Vektor x , der sowohl den Restriktionen als auch den Nichtnegativitätsbedingungen genügt, heißt eine zulässige Lösung des linearen Programmes,
5. die Menge aller zulässigen Lösungen heißt zulässiger Bereich,
6. eine zulässige Lösung, welche die Zielfunktion optimiert, heißt Optimallösung (OL).

Für das MLCLSP existieren zahlreiche verschiedene Modellformulierungen und Varianten der Zielfunktion und Nebenbedingungen. Zur Abbildung der Nachserienversorgung wird die intuitivste der möglichen Modellformulierungen herangezogen, welche der Standardformulierung des Losgrößenproblems entspricht. Diese zieht zur Formulierung der Zielfunktion die Losgrößenvariablen q_{kt} , die Rüstvariablen β_{kt} und die Lagerbestandsvariablen y_{pt} heran (Rossi 2003, S. 48). Gemäß den in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Zusammenhängen mehrstufiger Produkt- und Prozessstrukturen (Produktionsstufen) lässt sich das dynamische mehrstufige kapazitierte Losgrößenproblem für den Kontext der Nachserienversorgung folgendermaßen beschreiben: Eine dynamisch auftretende Nachfrage d_{kt} nach k Produkten ist in den nächsten T Perioden so zu decken, dass die zur Nachfragedeckung erforderlichen Kosten minimiert werden. Zur Produktion dieser Produkte werden Vor-/Zwischenprodukte benötigt, die wiederum andere Vor-/Zwischenprodukte benötigen. Für das betrachtete Problem sind in Summe K (Zwischen-) Produkte herzustellen. Bei der Produktion fallen für eine Produktionsstufe (Produkt/ Zwischenprodukt) k in Periode t die Produktionskosten p_{kt} an. Die (Zwischen-) Produkte k können über einen spezifischen Zeitraum von t_{kmax} gelagert werden, wobei die Lagerkosten in jeder Periode l_k betragen. Die zur Produktion der (Zwischen-) Produkte durchzuführenden Prozesse erfordern die Ressourcen J , welche in jeder Periode t nur eine beschränkte Kapazität von b_{jt} aufweisen. Neben dem Ressourcenverbrauch durch die Stückbearbeitungszeiten te_k je produzierter Mengeneinheit von (Zwischen-)Produkt k werden die Rüstzeiten tr_k erforderlich, um Produkt k mit der Ressource j herstellen zu können. Bei der Auflegung eines Loses von (Zwischen-) Produkt k entstehen die Rüstkosten r_k . Die Anfangslagerbestände y_{k0} und die Endlagerbestände y_{kT} am Ende des Planungshorizontes T sind für alle Produkte k vorgegeben und entsprechen für den Anwendungsfall Null (in Anlehnung an Rossi 2003, S. 44).

Durch die Zielfunktion (5-4) werden die über alle Produkte und Perioden aufsummierten Lager-, Produktions- und Rüstkosten minimiert, wobei die Produktionskosten nur relevant sind, wenn sie sich im Zeitablauf ändern. Die Zielfunktion beschreibt folglich die aus Produktion und Lagerung resultierenden Gesamtkosten K_{ges} , die es durch die Gestaltung der Losgrößen q_{kt} und Lagerbestände y_{kt} zu minimieren gilt. Die Planung der Losgrößen bezieht sich auf T Planungsperioden, deren Anzahl und Länge frei definierbar sind. Eine Planung der Ersatzteilversorgung ist entsprechend für lang- und kurzfristige Versorgungszeiträume möglich und orien-

tiert sich an der im Unternehmen gegebenen Datenbasis und der unter den Randbedingungen möglichen Prognosegüte. Die Modellformulierung basiert auf einer Prognose der Nachfragemengen je Periode (Tempelmeier 2006, S. 4f.), d. h. einem zeitlich verteilten Allzeitbedarf, der lediglich belastbar ermittelt werden kann, sofern die entsprechenden produktbezogenen Merkmale gegeben sind (Abschnitt 4.1.1) und die in Abschnitt 2.2.1 dargestellten Zusammenhänge bei der Prognose berücksichtigt werden. Analog verhält es sich mit der Anzahl zu planender (Zwischen-) Produkte. Die Planungsobjekte umfassen gemäß Abschnitt 4.1.1 die nach Durchlauf einer Produktionsstufe vorliegenden Zwischen- und Endprodukte, deren Anzahl und Interdependenzen frei definierbar sind.

$$\min K_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (r_k \times \beta_{kt} + l_k \times y_{kt} + p_{kt} \times q_{kt}) \quad (5-4)$$

K	Anzahl der Produktionsstufen ($k = 1, 2, \dots, K$)
T	Länge des Versorgungszeitraums in Perioden ($t = 1, 2, \dots, T$)
r_k	Rüstkostensatz des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-) Produktes
l_k	Lagerkostensatz des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-) Produktes
p_{kt}	variable Produktionskosten des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-) Produktes in Periode t
β_{kt}	binäre Rüstvariable
y_{kt}	physischer Lagerbestand des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-) Produktes am Ende der Periode t
q_{kt}	Losgröße des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-) Produktes in Periode t

K vom Unternehmen zu definierende Produktionsstufen werden folglich an das Modell übergeben und hinsichtlich der durch Lagerbestand und Produktionsmenge entstehenden Produktions- und Lagerkosten für den definierten Planungszeitraum optimiert. Die Lagerkosten einer Periode t berechnen sich aus dem Lagerkostensatz l_k und dem am Ende der Periode bestehenden physischen Bestand y_{kt} des jeweiligen (Zwischen-) Produktes (Tempelmeier, Derstoff 1993, S. 64). Die Lagerkosten werden entsprechend nur für die über den Periodenbedarf hinaus produzierte Menge und deren Lagerdauer in den nachfolgenden Perioden berechnet. Die Produktionskosten umfassen Rüstkosten und variable Produktionskosten, wobei sich letztere aus den für ein (Zwischen-)Produkt gegebenen variablen Kosten p_{kt} multipliziert mit der in dieser Periode realisierten Losgröße q_{kt} ergeben. Rüstkosten werden über den ressourcenbezogenen Rüstkostensatz r_k und die binäre Rüstvariable β_{kt} einer Periode in das Modell einbezogen. Rüstvariablen β_{kt} nehmen die Werte null oder eins an, um die jeweilige Periode mit den für die Fertigung von Produkt k erforderlichen Rüstkosten zu belasten. Diese Belastung erfolgt über die Rüstbedingungen (5-5), die gewährleisten, dass gerüstet werden muss, wenn in der betrachteten Periode produziert wird.

$$q_{kt} - M \times \beta_{kt} \leq 0 \quad (5-5)$$

M hinreichend große natürliche Zahl

Als weitere Restriktionen/Nebenbedingungen des Modells sind die Lagerbilanzgleichungen (5-6) zu berücksichtigen. Diese verhindern das Auftreten von Fehlmengen und orientieren sich bei der gewählten Formulierung des Modells am physischen Lagerbestand. Eine weitere Möglichkeit ist bspw. in der Betrachtung des systemweiten Lagerbestandes zu sehen.

$$y_{k,t-1} + q_{kt} - \sum_{i \in N_k} a_{ki} \times q_{it} - y_{kt} = d_{kt} \quad (5-6)$$

N_k Indexmenge der Nachfolger von (Zwischen-)Produkt k (direkt übergeordnete (Zwischen-) Produkte bzw. nachfolgende Produktionsstufen)

a_{ki} Produktionskoeffizient bezüglich des aus Produktionsstufe k und des aus Produktionsstufe i resultierenden (Zwischen-) Produktes

d_{kt} Primärbedarf des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-) Produktes in Periode t

Um Fehlmengen zu vermeiden, sind die Interdependenzen der Produkt- und Prozessstruktur und folglich der Abgang von (Zwischen-) Produkte in nachfolgende Produktionsstufen zu betrachten. Durch die Lagerbilanzgleichungen wird gewährleistet, dass in jeder Periode t die erforderliche Menge zur Deckung des für diese Periode erforderlichen Bedarfes an (Zwischen-) Produkt k und erforderlicher untergeordneter Produkte/Komponenten vorhanden ist und entweder produziert oder dem ggf. vorhandenen Lagerbestand entnommen wird. Die Interdependenzen zwischen den Produktionsstufen werden durch eine Produktionskoeffizientenmatrix abgebildet. Diese ergibt sich aus allen Produktionskoeffizienten a_{ki} , wobei der Zeilenindex k durch die untergeordneten Produkte und der Spaltenindex i durch die übergeordneten Produkte gebildet wird. Geht ein aus der Produktionsstufe k resultierendes (Zwischen-)Produkt nicht in das aus Produktionsstufe i resultierende (Zwischen-)Produkt ein, ist der Produktionskoeffizient a_{ki} null (Rossi 2003, S. 46).

Für die Betrachtung der Integration in die Fertigung sind unabhängig von der Art, wie diese Integration erfolgt (s. Abschnitt 4.1.2), Kapazitätsrestriktionen (5-7) zu berücksichtigen. Diese unterbinden, dass mehr Ressourcen für die Produktion verwendet werden, als Kapazität verfügbar ist. Die kapazitive Beschränkung kann in diesem Zusammenhang sowohl durch eine begrenzte Produktionskapazität als auch eine begrenzte Mitarbeiterkapazität gegeben sein.

$$\sum_{k \in K_j} (te_k \times q_{kt} + tr_k \times \beta_{kt}) \leq b_{jt} \quad (5-7)$$

J Anzahl der Ressourcen ($j = 1, 2, \dots, J$)

K_j Indexmenge der Produktionsstufen k, die durch Ressource j vollzogen werden

b_{jt} Verfügbare Kapazität der Ressource j in Periode t

te_k Stückbearbeitungszeit der in Produktionsstufe k ausgeführten Prozesse

tr_k Rüstzeit für die auf Produktionsstufe k auszuführenden Prozesse

Für die zur Verfügung stehenden Fertigungseinrichtungen J ist die mögliche Produktionsmenge in jeder Periode t durch eine zeitvariante Kapazität b_{jt} (begrenzte Mitarbeiter- oder Produktionszeit) beschränkt (Rossi 2003, S. 35). Die gegebene Kapazität wird durch Stückbearbei-

tungszeiten te_k und Rüstzeiten tr_k der auf der Ressource zu produzierenden (Zwischen-) Produkte belastet.

Grundlage einer derartigen Belastung einzelner Fertigungseinrichtungen bildet die Zuteilung der in den Produktionsstufen inbegriffenen Prozesse zu den Ressourcen J (vgl. Abbildung 5-5). Die verschiedenen Ressourcen werden unterschiedlich belastet, K_j beschreibt die Indexmenge der Produktionsstufen und in diesen auszuführenden Prozesse, die Ressource j belasten. Diese Zuweisung der in den Produktionsstufen auszuführenden Prozesse kann lediglich unternehmensspezifisch unter Berücksichtigung der möglichen Alternativen zur Integration in die laufende Fertigung erfolgen. Ist eine kapazitive Beschränkung nicht gegeben (z. B. Nutzung nicht ausgelasteter Serienfertigungseinrichtungen), kann die Kapazität der Ressourcen als unendlich angenommen werden. Sind hingegen Ressourcen nicht verfügbar (Obsoleszenz) kann die Kapazität ab entsprechendem Zeitpunkt mit Null versehen werden.

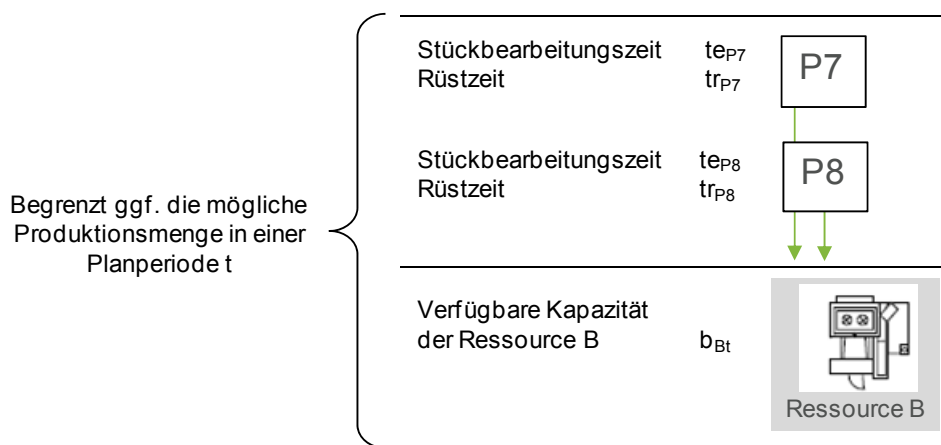


Abbildung 5-5 Nutzung beschränkter Ressourcenkapazität in der Nachserienfertigung

Weitere Restriktionen ergeben sich in Form der Nichtnegativität der physischen Lagerbestände (5-8) und Produktionsmengen (5-9) (Rossi 2003, S. 49; Tempelmeier 2006).

$$y_{kt} \geq 0 \tag{5-8}$$

$$q_{kt} \geq 0 \tag{5-9}$$

Neben der Nichtnegativität der Lagerbestände und Produktionsmengen sind diese Variablen ganzzahlig zu definieren, da keine beliebige Teilbarkeit der Losgrößen sowie der physischen Lagerbestände gegeben ist (nur Produktion/Einlagerung ganzer Einheiten möglich). Durch die Gleichungen sind die Produktionsvariablen q_{kt} nach unten beschränkt, so dass diese keinen negativen Wert annehmen können.

Die Formulierung basiert auf der Annahme, dass weder Anfangs- noch Sicherheitsbestände gegeben sind. In Zusammenhang mit langen Planungshorizonten im Rahmen der Nachserienversorgung umfasst die Länge einer Planungsperiode ggf. einen oder auch mehrere Monate. Vorlaufzeiten, die sich durch Transportzeiten oder durch Annahme einer geschlossenen Produktion (nur ganze Lose werden an die nächste Produktionsstufe weitergegeben) ergeben, werden auf Grund der Länge der betrachteten Perioden vernachlässigt (Rossi 2003, S. 44). Dies erleichtert die Interpretation und eine qualitative Änderung der Ergebnisse ist nicht zu

erwarten (Inderfurth, Kleber 2008, S. 6f.). Die betrachteten Kostengrößen können bei entsprechend detaillierter Ermittlung und Ausweisung auch als reale Kostenwerte interpretiert werden.

Durch das für den spezifischen Anwendungskontext theoretisch formulierte Modell können für jede Planungsperiode t und jede Produktionsstufe k eine zu produzierende Losgröße, eine Anzahl einzulagernder (Zwischen-) Produkte, die auf jeder Produktionsstufe resultierenden Kosten und die Gesamtkosten des geplanten Produktionsprogrammes bestimmt werden. Eine hinsichtlich der Gesamtkosten, d. h. der im Zielsystem formulierten zentralen Performancevariablen, optimierte Lösung des Modells (Minimierung der Zielfunktion), erfüllt folglich generell die Zielsetzung einer kostenoptimalen Gestaltung der Ersatzteilversorgung mittels Produktions- und Bevorratungsstrategien unter Berücksichtigung von Produktionsstufen und der Option zur Integration in die laufende Serienfertigung. Die jeweiligen Kostensätze sind Ausdruck für die spezifischen Bedingungen auf den einzelnen Produktionsstufen. Korrelationen zwischen einzelnen Produktionsstufen bzw. (Zwischen-) Produkte werden durch die zugrunde gelegte mehrstufige Produkt- und Prozessstruktur berücksichtigt. Für die Integration in die laufende Produktion können durch die im Modell abgebildeten Kapazitätsrestriktionen verfügbare Kapazitäten angenommen werden.

Unter Berücksichtigung der in Unterkapitel 4.1 aufgezeigten Merkmale, die maßgeblichen Einfluss auf die Ausgestaltung der Versorgungsstrategien haben, und den in Unterkapitel 5.1 aufgezeigten Anforderungen bleiben wesentliche Randbedingungen der Ersatzteilversorgung in der Nachserie unberücksichtigt.

1. Produktspezifische Anforderungen

2. Prozessspezifische Anforderungen und entscheidungsrelevante Kosten im Kontext der Nachserienversorgung

Zentrale Merkmale, die eine Ausgestaltung der Produktions- und Bevorratungsstrategien beeinflussen, sind zum einen in der eingeschränkten Lagerfähigkeit von (Zwischen-) Produkte und zum anderen in der Gefahr von Bauteilabkündigungen zu sehen (vgl. Abschnitt 4.1.1). In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, diese Aspekte in zusätzlichen Restriktionen abzubilden und in das Modell zu integrieren.

Prozessspezifisch ist zu berücksichtigen, wie die Integration in die laufende Produktion vollzogen wird (vgl. Abschnitt 4.1.2). Durch die alternativen Realisierungsmöglichkeiten einer Integration ergeben sich durch Einsatz anderer Ressourcen (Maschinenstundensätze) und divergierende Prozesse (Rüst- und Bearbeitungsvorgänge) unterschiedliche Ausprägungen der einzelnen entscheidungsrelevanten Kostenfaktoren. Erst die Zuweisung der Produktionsstufen zu den Ressourcen unter Einbezug der Form der Integration ermöglicht eine Ermittlung ressourcenspezifischer Rüstkostensätze, Rüstzeiten, Bearbeitungszeiten und unterschiedlicher variabler Produktionskosten, die in die Berechnung der Kosten und somit die Optimierung einfließen. Des Weiteren entstehen je nach Alternative der Integration verschiedene einmalige Kosten z. B. durch die Zertifizierung von Prozessen, die als entscheidungsrelevante, einer Alternative zurechenbare Fixkosten in die Optimierung einzubeziehen sind. Eine Beachtung dieser entscheidungsrelevanten Fixkosten soll unter Zuhilfenahme einer Szenariobetrachtung

realisiert werden. In diesem Zusammenhang werden die in Unterkapitel 5.2 bereits allgemein vorgestellten entscheidungsrelevanten Produktions- und Logistikkosten (variable Produktionskosten, Rüstkosten und Lagerkosten) in den Kontext der Nachserienversorgung gesetzt und konkretisiert. Die soeben geschilderten Aspekte werden nachstehend dargestellt.

5.3.2 Produktspezifische Anforderungen

Eine zentrale Herausforderung, die im Rahmen der Ausgestaltung der Nachserienfertigung zu berücksichtigen ist, stellt die eingeschränkte Lagerfähigkeit eines (Zwischen-) Produktes dar.

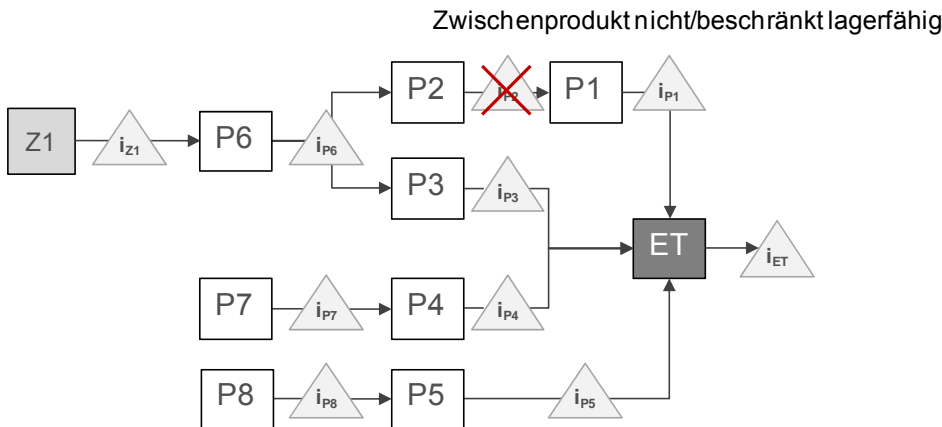


Abbildung 5-6 Berücksichtigung kritischer Lagerfähigkeit bei der Losgrößenplanung

Erfolgt die Losgrößenbestimmung, wie im zuvor beschriebenen Modell, auf Basis einer mehrstufigen Produkt- und Prozessstruktur, d. h. Produktionsstufen, ist für die Planung der Ersatzteilversorgung zu berücksichtigen, dass einzelne (Zwischen-) Produkte ggf. beschränkt oder nicht lagerfähig sind. Zudem können sich für die k (Zwischen-) Produkte divergierende Zeiträume einer möglichen Lagerfähigkeit ergeben. Wird diese Option nicht in das Modell einbezogen, kann die durch Minimierung der Zielfunktion ermittelte Lösung ggf. nicht realisierbar sein. Die maximale Lagerdauer der (Zwischen-) Produkte wird daher durch einen spezifisch zu definierenden Zeitraum der maximalen Lagerfähigkeit t_{kmax} begrenzt. Dies geschieht in Form der Lagerfähigkeitsbedingungen (5-10).

$$q_{kt} = \sum_t^{t+(t_{kmax}-1)} \sum_{i \in N_k} a_{ki} \times q_{it} \tag{5-10}$$

t_{kmax} maximale Lagerfähigkeit des aus Produktionsstufe k resultierenden (Zwischen-)Produktes

Durch diese Restriktionen wird die zu produzierende Losgröße eines (Zwischen-) Produktes in einer Periode t auf die Menge begrenzt, die für die Dauer der Lagerfähigkeit dieses (Zwischen-) Produktes von den übergeordneten Produktionsstufen nachgefragt und entsprechend weiterverarbeitet wird.

Ein weiterer Gesichtspunkt der produktspezifischen Merkmale ist das Obsoleszenzrisiko verschiedener Bauteile und Komponenten, so dass eine Nachfertigung bei Bauteilabkündigung nur durch die Endbevorratung des jeweiligen (Zwischen-) Produktes realisiert werden kann. Eine Bauteilabkündigung erfordert folglich die Fertigung bzw. den Zukauf und die anschlie-

ßende Einlagerung des für den restlichen Versorgungszeitraum benötigten Gesamtbedarfs der entsprechenden (Zwischen-) Produkte. Für die Berücksichtigung von Bauteilabkündigungen wird für jedes (Zwischen-)Produkt k ein Zeitpunkt der Abkündigung t_{Abk} vorgesehen, der bei Bedarf in das Modell einbezogen werden kann. Durch die in (5-11) definierten Restriktionen wird gewährleistet, dass die bis zum Zeitpunkt der Abkündigung produzierte bzw. zugekaufte Menge des betrachteten (Zwischen-) Produktes den für den gesamten Versorgungszeitraum erforderlichen Mengen entspricht. Derart kann abgebildet werden, dass ab einer gewissen Produktionsstufe für Bauteile oder Rohmaterialien nur noch endbevorratet werden kann.

$$\sum_{t=1}^{t_{Abk}} q_{kt} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in N_k} a_{ki} \times q_{it} \quad (5-11)$$

t_{Abk} Zeitpunkt der Abkündigung von (Zwischen-)Produkt k

Als zusätzliche Erweiterung könnte eine Begrenzung der Lagerkapazität formuliert werden. Analog zu den oben aufgezeigten Kapazitätsrestriktionen hinsichtlich einer begrenzten Fertigungskapazität könnte die Anzahl einzulagernder (Zwischen-) Produkte durch eine vorgegebene Flächenkapazität limitiert werden. Ausschlaggebendes restriktives Kriterium im speziellen Kontext erscheint jedoch in der zeitlichen Komponente der Lagerung, d. h. der Lagerfähigkeit, anstatt in der räumlichen Komponente, d. h. der Lagerfläche, begründet.

5.3.3 Entscheidungsrelevante Kosten im Kontext der Nachserienversorgung

Im Kontext der Nachserienversorgung ist zu betrachten, welche der in Unterkapitel 5.2 allgemein aufgezeigten Einzelkosten entscheidungsrelevant sind und welche dieser Faktoren auf Grund der spezifischen produkt- und prozessbezogenen Anforderungen der Nachserie eine spezifische Ausprägung haben und bei der Planung der Nachserienversorgung explizit zu berücksichtigen sind. Zudem ist bei der Konkretisierung der im Kontext der Nachserienversorgung relevanten Kosten zu berücksichtigen, wie die Integration in die laufende Produktion vollzogen wird (vgl. Abschnitt 4.1.2). Durch die alternativen Realisierungsmöglichkeiten einer Integration ergeben sich unterschiedliche Ausprägungen der einzelnen entscheidungsrelevanten Kostenfaktoren. Durch den Einsatz anderer Ressourcen folgen z. B. voneinander abweichende Maschinenstundensätze und Bearbeitungszeiten, die die Höhe der Maschinenkosten und folglich der variablen Produktionskosten beeinflussen. Erst die Zuweisung der Produktionsstufen zu den Ressourcen unter Einbezug der Form der Integration ermöglicht folglich eine Ermittlung ressourcenspezifischer Rüstkostensätze, Rüstzeiten, Bearbeitungszeiten und unterschiedlicher variabler Produktionskosten, die in die Berechnung der Kosten und somit die Optimierung einfließen. Des Weiteren entstehen je nach Alternative der Integration verschiedene einmalige Kosten z. B. durch die Zertifizierung von Prozessen, die als entscheidungsrelevante, einer Alternative zurechenbare Fixkosten in die Optimierung einzubeziehen sind. Im Rahmen einer adäquaten Planung der Ersatzteilversorgung sind diese spezifischen Einflüsse auf die entscheidungsrelevanten Kosten zu berücksichtigen und zu beschreiben, in welcher Form die einzelnen Kostenfaktoren in ihrer Ausprägung Änderungen erfahren.

Variable Produktionskosten p_{kt}

Die in Unterkapitel 5.2 beschriebene Zuschlagskalkulation und die zur Ermittlung der Herstellkosten aufgeführten Einzelkostenpositionen bilden die Basis für die Bestimmung der im Rahmen der Losgrößenentscheidung zu berücksichtigenden variablen, zeitlich veränderlichen Produktionskosten. Für das spezielle Kostenobjekt, d. h. das Produkt, für welches die Ersatzteilversorgung geplant wird, sind die dem Produkt direkt zurechenbaren Einzelkosten zu extrahieren, die zudem variabel und zeitlich veränderlich sind. Die variablen Produktionskosten werden im Modell mit der zu produzierenden Losgröße des Produktes in Verbindung gestellt, die in diesem Zusammenhang den Kostentreiber darstellt.

Nachstehend sind folglich die sich mit dem Kostentreiber der zu produzierenden Losgröße q_{kt} und über die Zeit ändernden Anteile der Materialkosten, Lohnkosten, Maschinenkosten und Sondereinzelkosten zu bestimmen und in der Höhe anzuwenden, die sich für den speziellen Fall der Nachfertigung in der Nachserie und unter Berücksichtigung der Integrationsform ergeben. Nachstehend werden die einzelnen Kostenfaktoren daher zum einen gemäß ihrer Variabilität hinsichtlich des Kostentreibers der „Losgröße“ und der Zeit analysiert. Zum anderen werden die aus den jeweiligen Alternativen zur Integration in die laufende Produktion resultierenden Ausprägungen dieser Kostenfaktoren betrachtet.

Materialkosten

Materialeinzelkosten werden für einzelne Kostenobjekte verursachungsgerecht über die Produktionsmenge und zu dem zum jeweiligen Zeitpunkt gegebenen Einkaufspreis (Wiederbeschaffungspreis) berechnet. Materialkosten sind gemäß diesem Verständnis variabel gegenüber der Losgröße (Produktionsmenge), da eine Änderung dieser, die für das Produkt resultierenden Gesamtkosten beeinflusst. Zeitlich veränderlich sind Materialkosten z. B. auf Grund von Materialpreiserhöhungen, die sich über den Versorgungszeitraum ergeben. Materialpreiserhöhungen sind jedoch für alle Integrationsformen äquivalent, da jeweils die gleichen Materialien eingesetzt werden. Dieser Kostenfaktor ist folglich in seiner Ausprägung unabhängig von der Form der Integration.

Lohnkosten

Fertigungslohnkosten ergeben sich über die Produktionsmenge, die je Stück erforderliche Bearbeitungszeit t_e und den Stundensatz des prozessausführenden Mitarbeiters. Lohnkosten sind analog zu den Materialkosten entsprechend variabel gegenüber der Losgröße. Durch die Lohnkosten können neben den für die eigentliche Produktionszeit entstehenden Kosten zudem Aufwendungen durch Prüf- und Beurteilungskosten bei Fertigungszwischenprüfungen, Kundenabnahmeprüfungen und Laboruntersuchungen abgebildet werden. Hierfür wird der erforderliche Personalaufwand entsprechend der dargestellten Berechnung über Lohnkosten erfasst, sofern diese Prozesse den Produktionsstufen zugewiesen werden. Lohnkosten sind zeitlich variabel, sofern sich bspw. durch Verbesserungen der Prozesse oder Technologiesprünge die zur Berechnung herangezogenen Bearbeitungszeiten verkürzen. Prozessverbesserungen sind vornehmlich in der Serie zu erwarten, so dass eine zeitliche Variabilität aus die-

sen Gründen nicht zu erwarten ist. Grundsätzlich sind im Kontext der Nachserienversorgung zunehmende Bearbeitungszeiten zu erwarten, da das Know-How und die Übung in der Ausführung sinkt. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich abhängig von der Ausführung auf unterschiedlichen Ressourcen verschiedene Prozesse und folglich divergierende Bearbeitungszeiten ergeben, so dass sich der Lohnkostenanteil bei Betrachtung verschiedener Alternativen zur Integration in die laufende Fertigung ändert.

Maschinenkosten

Die Maschinenkosten K_M errechnen sich durch Multiplikation des Maschinenstundensatzes K_{MH} mit der für die Fertigung eines bestimmten Kostenobjektes erforderlichen Belegungszeit t_b , wobei die Belegungszeit sich aus der Stückbearbeitungszeit multipliziert mit der zu fertigenden Losgröße errechnet. Die Maschinenkosten hängen folglich ebenso wie die Lohn- und Materialkosten von der zu produzierenden Losgröße ab. Der Maschinenstundensatz K_{MH} ergibt sich als Summe der für eine Periode direkt zurechenbaren Kosten K_n dividiert durch die periodenbezogene Nutzungszeit T_N einer Fertigungseinrichtung. Die durch die Fertigungseinrichtung verursachten Kosten K_n ergeben sich aus kalkulatorischen Abschreibungen K_A , kalkulatorischen Zinsen K_Z , Raumkosten K_R , Instandhaltungskosten K_I und Energiekosten K_E . Die Berechnung der Kostengrößen gilt analog zur Darstellung in Unterkapitel 5.2 auch für die Nachserie. Gründe zur zeitlichen Variabilität dieser Kosten sind äquivalent zu denen der Lohnkosten.

Die dargestellten Definitionen machen deutlich, dass sowohl die Belegungszeit als auch die im Maschinenstundensatz berücksichtigten Kosten stark davon abhängen, auf welchen Fertigungseinrichtungen die Prozesse ausgeführt werden, d. h. in welcher Form die Nachserienfertigung realisiert wird. Unterschiedliche Prozesse führen zu divergierenden Bearbeitungszeiten und für die speziellen Fertigungseinrichtungen sind voneinander abweichende kalkulatorische Abschreibungen und Zinsen, Raumkosten, Instandhaltungskosten und Energiekosten zu berücksichtigen.

Zudem sind im Fall der Neukonfiguration Kosten für den Umbau und ggf. Neuinvestitionen für die Einrichtung oder das Redesign eines Fertigungsprozesses (Remanufacturing) und die hierfür erforderlichen Anlagen erforderlich. Im Fall der Einlastung in die Serienfertigung ähnlicher Produkte ist ggf. die Anpassung der Vorrichtungen und Werkzeuge erforderlich. Eine alleinige Anrechnung dieser Kosten in Form von entscheidungsrelevanten Fixkosten hat zur Voraussetzung, dass eine ausschließliche Nutzung der Investition für ein Produkt erfolgt. Werden die durch Neukonfiguration gestalteten Fertigungseinrichtungen und die für die Nutzung der Serienfertigungseinrichtungen gestalteten Werkzeuge und Adapter durch mehrere Produkte genutzt, werden die aufgezeigten Kosten durch die kalkulatorische Abschreibung sowie die kalkulatorischen Zinsen im Maschinenstundensatz abgebildet und über die Belegungszeit zugerechnet (Bothe 2003, S. 139ff.; Hagen 2003, S. 111). Ist eine direkte Anrechnung einer Investition ohne Umweg über die Maschinenkosten möglich, werden diese durch die Ausprägung der entscheidungsrelevanten Fixkosten einbezogen.

In Summe ergeben sich aus diesen drei Einzelkostenpositionen variable Produktionskosten je Stück, die über die Multiplikation mit der Losgröße im Modell die variablen Produktionskosten ergeben. Diese variablen Produktionskosten sind zu berücksichtigen, sofern eine der inbegriffenen Einzelkostenpositionen zeitlich veränderlich ist. Zudem besteht die Möglichkeit, in der ersten Planperiode die variablen Produktionskosten anzugeben, die denen unter Serienfertigungsbedingungen entsprechen, um die Produktionsbedingungen bei der Fertigung eines Serienabschlusses zu berücksichtigen.

Lagerkostensatz l_k

Gemäß Modell ergeben sich die Lagerkosten durch Multiplikation des Lagerkostensatzes l_k mit der einzulagernden Menge y , die in diesem Zusammenhang den Kostentreiber darstellt, da die Lagerhaltungsdauer durch das Modell abgebildet wird.

Laut der in Unterkapitel 5.2 dargestellten Definition ergeben sich die Lagerkosten einer Periode durch den Lagerkostensatz, der mit dem Wert des Lagerbestands L_w multipliziert wird. Dieser ergibt sich, wie in (5-12) dargestellt, aus dem physischen Lagerbestand y multipliziert mit dem Wert einer Einheit w_y , der zur Lagerbewertung angenommen wird.

$$LK = y \times w_y \times l_k \quad (5-12)$$

l_k Lagerkostensatz (Bezug zur Planperiode)

w_y Wert einer Lagerbestandseinheit y , i. d. R. Standard- oder Einstandspreis

Um Kompatibilität mit den Anforderungen des Modells herzustellen, ist folglich der Lagerwert in den Lagerkostensatz zu integrieren. Häufig werden die Lagerungskosten in die Kapitalbindungskosten und die Lagerhaltungskosten unterteilt, wobei speziell die Kapitalbindungskosten vom Wert der Lagereinheit abhängen, nicht aber die Lagerhaltungskosten (Gabler Wirtschaftslexikon 2010b). Zur Bestimmung des Lagerkostensatzes werden folglich die Kapitalbindungskosten auf Basis eines kalkulatorischen Zinssatzes i und des Wertes der Produkte p_Σ und zudem die Lagerhaltungskosten je Stück k_l berücksichtigt (vgl. (5-13)).

$$LK = l_k \times y_{kt} = \left(\frac{p_\Sigma}{2} \times \frac{i}{100} + k_l \right) \times y_{kt} \quad (5-13)$$

i Zinssatz

p_Σ Summe der variablen Produktionskosten aller aus untergeordneten Produktionsstufen k resultierenden (Zwischen-) Produkte oder Wiederbeschaffungspreis

Bei konstanten Lagerabgängen ist zudem ein durchschnittlicher Lagerbestand (y_m) zur Berechnung heranzuziehen (Wiendahl 1997, S. 307). Da dieser modellbedingt nicht auf den physischen Lagerbestand y_{kt} bezogen werden kann, wird ein durchschnittlicher Wert der Produkte im Lagerkostensatz berücksichtigt.

Die Lagerkostensätze sind auf Basis der zuvor dargestellten Formel spezifisch für die einzelnen (Zwischen-) Produkte zu bestimmen. Beschreibt das betrachtete (Zwischen-) Produkt eine Baugruppe oder ähnliche Komponenten, werden diejenigen variablen Produktionskosten als

Wertmaßstab zur Beschreibung der Kapitalbindung herangezogen, die sich aus der Summe der variablen Produktionskosten aller aus untergeordneten Produktionsstufen k resultierenden (Zwischen-) Produkte ergeben. Ist das betrachtete (Zwischen-) Produkt ein zugekauftes Bauteil oder Fremdteil bilden die Wiederbeschaffungspreise den Wertmaßstab (Bothe 2003, S. 141ff.; Hagen 2003, S. 111). Der Kostenanteil der Kapitalbindung ist über die Abhängigkeit von den variablen Produktionskosten indirekt ebenfalls abhängig von der Form der Integration in die laufende Produktion. Da die variablen Produktionskosten und folglich auch der Wertmaßstab zur Berechnung des Lagerkostensatzes zeitlich variabel sein kann, besteht die Möglichkeit als Erweiterung des Modells zudem die Lagerkostensätze als zeitlich veränderliche Größen l_{kt} in das Modell einzubeziehen.

Die Lagerhaltungskosten je Stück k_l beschreiben, wie in Unterkapitel 5.2 dargelegt, Kosten für die physische Lagerung der Produkte, wie z. B. Fläche, Betrieb des Lagers, Lohn etc. Im Fall der Nachserienversorgung und abhängig von den spezifischen Eigenschaften der (Zwischen-) Produkte umfassen diese insbesondere Sonderkosten, die für die Gewährleistung spezifischer Lagerbedingungen und die anschließende Qualitätsprüfung entstehen. In diesem Zusammenhang sind bspw. Sonder- und Prüfmaßnahmen zur Lagerfähigkeitserhaltung zu berücksichtigen. Der Lagerkostensatz ergibt sich vorrangig auf Basis produktspezifischer Eigenschaften. Sind jedoch durch die Integration in die laufende Fertigung unterschiedliche variable Produktionskosten gegeben, bilden diese den Wertmaßstab für die Kapitalbindung und führen zu divergierenden Lagerkostensätzen.

Rüstkostensatz r_k

Der Rüstkostensatz wird im Modell nicht mit der zu produzierenden Losgröße des Produktes in Verbindung gestellt, die in Bezug auf das Rüsten nicht den Kostentreiber anzusehen ist, da Rüstkosten allgemein mengen**unabhängig** und somit losfix sind (Kiener 2006, S. 198). Den Kostentreiber bildet die Anzahl erforderlicher Rüstvorgänge, die sich durch Produktwechsel ergeben und im Modell durch die Variable β_{kt} abgebildet werden. Rüstkosten setzen sich aus Material- und Lohnkosten für Reinigung der Produktionsanlagen, Lohnkosten für Justieren der Anlagen und Anbringen spezieller Ausrüstungsteile, Werkzeugwechselkosten, Anlaufkosten zu Beginn der Produktion (z. B. erhöhter Ausschuss) und entgangener produktiver Zeit während des Anlagenstillstands zusammen (Voigt 2008, S. 569). Letztere werden durch ressourcenspezifische Rüstzeiten und hierdurch ggf. resultierende Kapazitätsengpässe abgebildet. Die restlichen Positionen werden in den Werkzeugwechsel und in die Inbetriebnahme der Fertigungseinrichtungen differenziert, wobei die Inbetriebnahme die Reinigung, das Justieren der Anlagen und die Anlaufkosten zu Beginn der Produktion beinhaltet. Diese Positionen setzen sich aus Material- und Lohnkosten (Fertigungs- und Fertigungshilfslöhne) zusammen (Götze 2007) und sind entsprechend in Bezug auf das spezifische Kostenobjekt aus der Zuschlagskalkulation zu extrahieren. Eine Berechnung der Rüstkosten ist folglich analog zur Darstellung der Lohn- und Materialkosten im Rahmen der variablen Produktionskosten möglich.

Jedoch ist zu berücksichtigen inwieweit der entstehende Aufwand von der Art der Integration in die laufende Produktion abhängt (s. Abschnitt 4.1.2). Eine Neuproduktion bedingt keine

bzw. ggf. sehr geringer Rüstaufwände, jedoch hohe Aufwände zur Inbetriebnahme nach langen Stillständen. Eine Neukonfiguration und die Einlastung von Ersatzteilen in die Produktion ähnlicher Produkte bedingen ggf. einen höheren Rüstaufwand, jedoch lediglich einen anteiligen Inbetriebnahmeaufwand. Bei einer Unterscheidung der verschiedenen Integrationsformen kommt es daher neben der Berücksichtigung der zuvor dargestellten Kostensätze (p_{kt} , l_k und r_k) vor allem auf die Berücksichtigung von entscheidungsrelevanten Fixkosten an, um die Entscheidung adäquat zu fundieren.

Entscheidungsrelevante Fixkosten

Fixkosten können in die Bestimmung von Produktions- und Bevorratungsstrategien einbezogen werden, sofern sie Einzelkosten sind, d. h. dem betrachteten Kostenobjekt (Produkt) direkt und entsprechend allein angerechnet werden können. Diese werden entsprechend als einmalig anfallender fixer Kostenblock bei der abschließenden Betrachtung unterschiedlicher Strategien aufgeschlagen. Im Rahmen der Betrachtung der unterschiedlichen Möglichkeiten zur Integration in die laufende Fertigung ergeben sich die folgenden möglichen Fixkosten (vgl. zudem Abschnitt 4.1.2):

- Technische Anpassung der Fertigungseinrichtungen
- Kosten für die Neukonfiguration (Umbau-/Zertifizierungsaufwand)
- ggf. Neuinvestitionen
- ggf. Anpassung der Vorrichtungen/Werkzeuge
- ggf. Kosten für die Einlagerung der Betriebsmittel

Eine alleinige Anrechnung dieser Kosten in Form von entscheidungsrelevanten Fixkosten hat zur Voraussetzung, dass eine ausschließliche Nutzung der Investition für ein Produkt erfolgt. Werden die durch Neukonfiguration gestalteten Fertigungseinrichtungen und die für die Nutzung der Serienfertigungseinrichtungen gestalteten Werkzeuge und Adapter durch mehrere Produkte genutzt, sind die aufgezeigten Kosten durch die kalkulatorischen Abschreibung sowie die kalkulatorischen Zinsen im Maschinenstundensatz abzubilden und über die Belegungszeit den unterschiedlichen Szenarien zuzurechnen. Zudem können Kosten für Mitarbeiterqualifikation zur Nutzung der Fertigungseinrichtungen, Flächenkosten sowie Betriebskosten für die Fertigungshalle (Heizung, Licht) etc. einbezogen werden, sofern diese für den konkreten Anwendungsfall als entscheidungsrelevant angesehen werden.

Eine abschließende Zusammenfassung der Ausprägung der Kostenfaktoren in Abhängigkeit der Alternativen zur Integration in die laufende Produktion zeigt Tabelle 5-2. Zur Ausprägung der in das Modell einzubeziehenden entscheidungsrelevanten Kostenfaktoren der Rüstkosten, variablen Produktionskosten und Lagerkosten ist grundlegend festzulegen, in welcher Form eine Integration in die laufende Fertigung erfolgt. Die je Alternative entstehenden einmaligen Fixkosten werden den entscheidungsrelevanten Gesamtkosten zugerechnet. Zum Vergleich der alternativen Integrations- bzw. Produktionsformen können anhand des Modells verschiedenen Szenarien berechnet und abschließend bezüglich der resultierenden Gesamtkosten verglichen werden.

Tabelle 5-2 *Ausprägung der entscheidungsrelevanten Kostenfaktoren bei alternativer Integration in die laufende Fertigung*

	Neuproduktion	Neukonfiguration	Integration in die laufende Fertigung
Lagerkostensatz	<ul style="list-style-type: none"> vorrangig produktabhängig; sind unterschiedliche variable Produktionskosten gegeben, bilden diese Wertmaßstab und führen zu divergierenden Lagerkostensätzen 		
variable Produktionskosten	<ul style="list-style-type: none"> divergieren, da unterschiedliche von Fertigungseinrichtungen abhängige Maschinen- und Lohnkosten 		
Rüstkostensatz	<ul style="list-style-type: none"> ggf. geringer Rüstaufwand Instandhaltungsaufwand/Inbetriebnahme 	<ul style="list-style-type: none"> ggf. Rüstaufwand anteiliger Inbetriebnahmeaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> Rüstaufwand anteiliger Inbetriebnahmeaufwand
Fixkosten/ Einmalkosten	<ul style="list-style-type: none"> ggf. Kosten für die Einlagerung der Betriebsmittel volle Betriebskosten 	<ul style="list-style-type: none"> Kosten für die Neukonfiguration (Umbau-/Zertifizierungsaufwand) ggf. Neuinvestitionen anteilige Betriebskosten 	<ul style="list-style-type: none"> ggf. Anpassung der Vorrichtungen/ Werkzeuge anteilige Betriebskosten

5.4 Zusammenfassung

Die Generierung kostenoptimaler Produktions- und Bevorratungsstrategien auf Basis des mathematisch ermittelten Modells erfordert die Eingabe unternehmensspezifischer Eingabegrößen (vgl. Abbildung 5-7). Basis stellt die Festlegung des Versorgungszeitraums dar, für den die Planung der Ersatzteilversorgung erfolgen soll. Dieser ist in die ebenfalls von Unternehmen zu definierende Anzahl an Planungsperioden zu teilen, für die jeweils ein prognostizierter Bedarf anzugeben ist. Bei Betrachtung des gesamten Versorgungszeitraumes stellt die im Modell verwendete Bedarfsprognose einen zeitlich über die Planungsperioden verteilten Allzeitbedarf dar. Diesen adäquat zu ermitteln erfordert komplexe Bedarfsprognoseverfahren (Bothe 2003, S. 90). Das vorgestellte Modell stellt daher gesteigerte Ansprüche an die Qualität der Prognose und die hierzu im Unternehmen vorhandenen Daten.

Zudem sind die zu betrachtenden Produktionsstufen aus der in den Unternehmen gegebenen Produkt- und Prozessstruktur abzuleiten. Für die Festlegung der Rüstkostensätze und variablen Produktionskosten der aus den Produktionsstufen resultierenden (Zwischen-) Produkte ist festzulegen, in welcher Form die Integration in die laufende Fertigung stattfinden soll. Zudem sind für diese (Zwischen-) Produkte auf Basis der spezifischen Anforderungen (Lagerbedingungen) und der variablen Produktionskosten die jeweiligen Lagerkostensätze zu ermitteln und anzugeben. In diesem Zusammenhang sind ggf. entstehende einmalige Fixkosten auszuweisen. Dies erfordert die Zuteilung der in den Produktionsstufen zusammengefassten Prozesse zu den entsprechenden Ressourcen, die ggf. durch eine zur Ersatzteilerfertigung verfügbare Kapazität begrenzt werden können. Diese Kapazität wird von den entsprechend auf den Produktionsstufen anfallenden Bearbeitungs- und Rüstzeiten in Anspruch genommen. Des Weiteren ist die Lagerfähigkeit der verschiedenen (Zwischen-) Produkte zu definieren und der Zeitpunkt evtl. gegebener Bauteilabkündigungen zu spezifizieren.

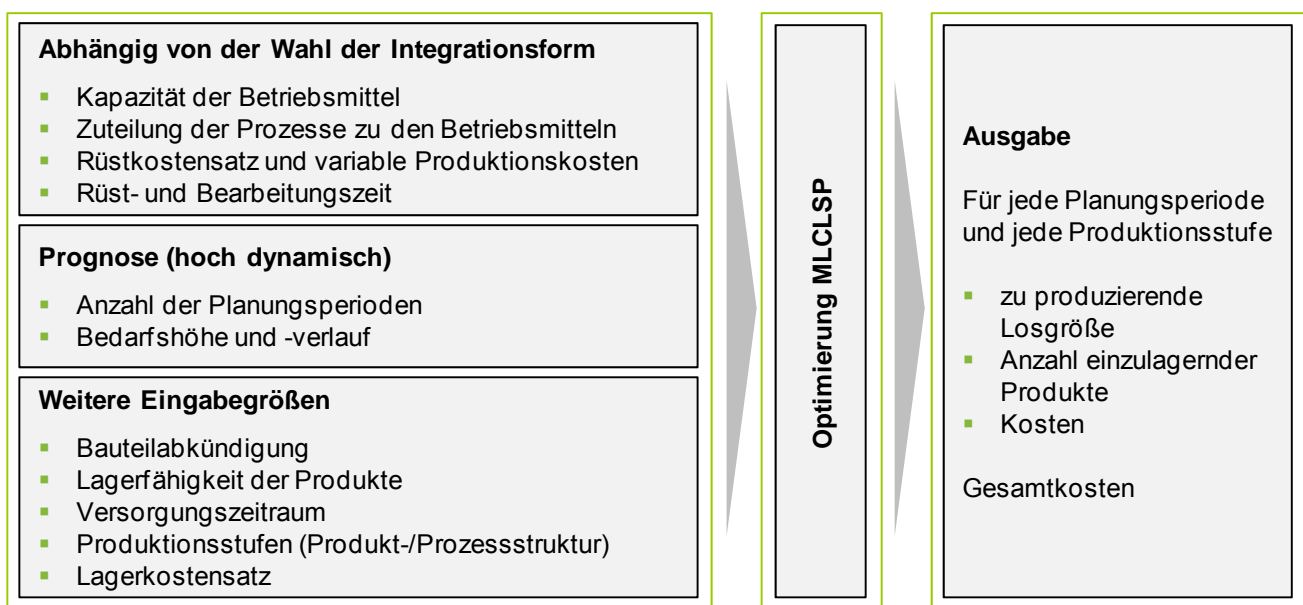


Abbildung 5-7 Modell zur kostenoptimalen Planung und Steuerung der Nachserienversorgung

Auf Basis dieser Eingabegrößen erfolgt die Optimierung der je Produktionsstufe aufgelegten Losgrößen und einzulagernden (Zwischen-) Produkte durch Minimierung der resultierenden Gesamtkosten. Die für jede Planungsperiode und jede Produktionsstufe zu produzierenden Losgrößen und Anzahl einzulagernder (Zwischen-) Produkte beschreiben entsprechend die Produktions- und Bevorratungsstrategien, die mit den resultierenden Kosten auf jeder Produktionsstufe und den Gesamtkosten ausgegeben werden. Unternehmen haben entsprechend der dargestellten Eingabegrößen und grundsätzlichen Entscheidungen die Option, verschiedene Szenarien bezüglich des Gesamtbedarfs, des Bedarfsverlaufs und den alternativen Integrationsmöglichkeiten festzulegen und für die entsprechenden Szenarien resultierende Produktions- und Bevorratungsstrategien zu generieren.

Der Vergleich der entsprechenden Szenarien anhand der resultierenden Gesamtkosten ermöglicht speziell kleinen und mittelständigen Unternehmen eine fundierte Entscheidungsfindung und Festlegung von kostenoptimalen Produktions- und Bevorratungsstrategien. Die hoch dynamischen Eingabegrößen des Modells bedingen bei Abweichung von den zu Anfang getroffenen Planungsgrößen eine Anpassung der festgelegten Strategien. Durch eine Anpassung der entsprechenden dynamischen Parameter und eine analoge Betrachtung von Szenarien kann die Strategie rollierend an sich ändernde Kontextvariablen angepasst werden.

Die Qualität der durch das Modell gewonnenen Erkenntnisse und Strategien/Kosten ist stark abhängig von der Qualität der Eingangsgrößen, insbesondere der Prognosen und der Kostenfaktoren. Insbesondere die Relation der Kostensätze zueinander ist für eine fundierte Entscheidungsfindung ausschlaggebend. Je exakter die Eingabegrößen, Restriktionen und Rahmenbedingungen definiert sind, desto belastbarer sind die entsprechenden Ausgaben, die für den Grad an Unsicherheit und Fehlentscheidungen verantwortlich sind.

6 Modellimplementierung

6.1 Möglichkeiten zur Lösung des Modells

Das in der Ausprägung für die Nachserienversorgung dargestellte mehrstufige kapazitierte Mehrprodukt-Losgrößenproblem ist ein lineares ganzzahliges Problem. Grundsätzlich sind Modelle dieser Art wesentlich schwieriger lösbar als lineare Optimierungsmodelle mit kontinuierlichen Variablen (Domschke, Drexl 2005, S. 8). Die Lösbarkeit ganzzahliger Programme hängt sehr stark von den spezifischen Eigenheiten des jeweiligen Planungsproblems und von der gewählten Modellierung ab. Eines der schwierigsten Probleme ist das dynamische mehrstufige Mehrprodukt-Losgrößenproblem bei genereller Erzeugnisstruktur unter Berücksichtigung von mehreren knappen Ressourcen, deren Kapazitäten durch variable, von den Losgrößen abhängige Bearbeitungszeiten sowie Rüstzeiten in Anspruch genommen werden (Tempelmeier, Derstroff 1993). So ist bekannt, dass bei Vorliegen von Rüstzeiten bereits das Problem der Bestimmung einer zulässigen Lösung NP-vollständig ist (Tempelmeier, Derstroff 1993). Probleme, zu denen keine polynomiellen Algorithmen bekannt sind und/oder die einen „schwierigen“ kombinatorischen Charakter aufweisen, werden in der gemischt-ganzzahligen Optimierung als NP-vollständig bezeichnet. In diesem Sinn würde auf Grund der sehr hohen, oft exponentiellen Zahl an möglichen Lösungen, die sogenannte kombinatorische Explosion, die reine Enumeration aller möglichen Lösungen bei steigender Größe der Problem Instanz auch mit einem schnellen Rechner oft Tage, Monate, Jahre, Jahrzehnte in Anspruch nehmen. In der Informatik definiert man hierfür die Problemklasse NP (nichtdeterministisch polynomiell), für die entsprechend kein polynomieller (deterministischer) Lösungsalgorithmus bekannt ist, d. h. der in polynomieller Zeit berechenbar ist (Suhl, Mellouli 2009, S. 136). Das mehrstufige Losgrößenproblem mit Kapazitätsbeschränkungen ist ein derartiges kombinatorisches Optimierungsproblem, bei dem die Anzahl der Rüstpläne, d. h. die Kombination von allen binären Rüstvariablen, exponentiell mit der Anzahl der Rüstvariablen steigt (Rossi 2003, S. 81). Algorithmen zur Lösung (gemischt) ganzzahliger Optimierungsprobleme werden in analytische oder heuristische Lösungsverfahren differenziert.

Im Rahmen der Heuristiken sind iterative Verfahren (Derstroff 1995), generische Algorithmen nutzende Verfahren (Prasad, Krishnaiah 2001) und Dekompositionsverfahren (Rossi 2003) entwickelt worden. Durch heuristische Verfahren können allgemein zulässige Lösungen in relativ kurzer Zeit ermittelt werden. Jedoch ist nicht spezifiziert, wie gut diese Lösungen im Vergleich zu einer Optimallösung sind. Wird durch eine Heuristik keine Lösung gefunden, ist nicht bekannt, ob dies im Algorithmus begründet liegt oder ob das betrachtete Optimierungsproblem prinzipiell unlösbar ist. Für das dynamische Losgrößenproblem wurden unterschiedliche Lösungsverfahren entwickelt, die die Losgrößenberechnung eines oder mehrerer Produkte auf einem oder mehreren Arbeitssystemen entsprechend mit ein- oder mehrstufigen Prozess- und Erzeugnisstrukturen ermöglichen. Die in der Literatur diskutierten Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihres Planungsumfangs und des damit verbundenen Rechenaufwands: Der wesentliche Nachteil heuristischer Verfahren ist die Spezialisierung auf die jeweils vorliegenden

Ausprägungen des Problems, z. B. die gewählten Erzeugnis- und Prozessstrukturen (Meers, Richter, Nickel 2009, S. 51). Heuristische Verfahren sind in diesem Sinn zumeist spezifisch an das zu lösende Problem angepasst. Übersichten über mögliche heuristische Verfahren zur Lösung der MLCLSP liefern u. a. Rossi (Rossi 2003, S. 66ff.) und Tempelmeier (Tempelmeier, Derstroff 1993).

Analytische Verfahren sind exakte Verfahren, die unter Annahme beliebig langer Rechenzeit beweisbar eine optimale Lösung feststellen oder deklarieren, dass das Problem unlösbar oder unbeschränkt ist. Für die exakte Lösung NP-vollständiger Probleme werden mehrere allgemeine Lösungstechniken benutzt (vgl. hier und im Folgenden Suhl, Mellouli 2009, S. 137ff.; Rossi 2003, S. 81). Beispiele derartiger Verfahren sind beschränkte Enumerationsmethoden wie Backtracking, dynamische Programmierung, Branch&Bound-Verfahren, Schnittebenenverfahren und Branch&Cut-Verfahren, wobei Branch&Bound-Verfahren die wichtigsten Verfahren zur exakten Lösung von gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodellen darstellen. Exakte Lösungen linearer und gemischt ganzzahliger Programme können u. a. durch hoch entwickelte Standard-Software-Pakete generiert werden, die auf die oben dargestellten Verfahren zur gemischt-ganzzahligen Optimierung zurückgreifen (Suhl, Mellouli 2009, S. 78f.). Dies ist jedoch stark abhängig von der Problemkomplexität (z. B. zu Grunde liegende Produktstruktur) (Tempelmeier 2006, S. 233f.). Im Allgemeinen lässt sich das MLCLSP durch beschränkte Enumerationsmethoden wie dem Branch&Bound und dem Branch&Cut nicht optimal lösen. Kleinere Probleminstanzen mit einer geringen Anzahl von Binärvariablen können aber bereits mit der derzeit verfügbaren Optimierungssoftware und vertretbarer Zeitdauer gelöst werden (Rossi 2003, S. 81; Tempelmeier, Derstroff 1993).

Der Entwicklung einer Heuristik steht neben dem großen Aufwand entgegen, dass diese spezifisch an ein Problem angepasst und folglich bei variierenden Probleminstanzen nicht flexibel eingesetzt werden kann. Da das Werkzeug eine aufwandsarme Planung der Ersatzteilversorgung vorrangig in kleinen und mittelständigen Unternehmen ermöglichen soll, ist die Wahl einer entsprechenden Software-Lösung trotz der Lösung für kleinere Probleminstanzen sinnvoll, wobei bei der Auswahl und Testläufen verschiedener Softwarealternativen berücksichtigt wurde, dass typische Probleminstanzen lösbar sind. Derartige Überlegungen werden nachstehend konkretisiert. Zunächst werden die spezifischen Anforderungen an die Software-Lösung beschrieben (s. Unterkapitel 6.2) und verschiedene auf Basis dieser Anforderungen vorausgewählte Softwarealternativen verglichen (vgl. Abschnitt 6.2.1), bevor abschließend eine Optimierungssoftware ausgewählt wird (vgl. Abschnitt 6.2.2).

6.2 Spezifische Anforderungen an Software-Lösungen

Zentrale Anforderung bildet, wie soeben dargestellt, eine hinreichende Leistungsfähigkeit der Software-Lösung, so dass Modelle typischen Umfangs implementiert und mit den integrierten Lösungsverfahren und Algorithmen gelöst werden können. Im Kontext der Planung der Nachserienversorgung ergeben sich typische Problemstellungen durch langfristige Versorgungszeiträume (<15 Jahre) und komplexe Produkt- und Prozessstrukturen. Eine zyklische jährliche Planung über den Versorgungszeitraum bedingt bereits einen Mindestumfang von 15 Planpe-

rioden. Werden zudem Ersatzteile betrachtet, die in zehn Produktionsstufen hergestellt werden, sind 450 Variablen (Losgrößen, Lagerbestände und binäre Rüstvariablen) erforderlich. Analog verhält es sich mit den Nebenbedingungen. Auf Basis dieser Überlegungen ist es erforderlich, die Software-Lösungen hinsichtlich des Umfangs an abbildbaren Variablen, insbesondere ganzzahligen und binären Variablen und an Nebenbedingungen zu vergleichen. Eine Vorauswahl möglicher Software-Alternativen wird hinsichtlich der generellen Eignung der Software zur Lösung gemischt ganzzahliger Optimierungsprobleme getroffen, die zwangsläufig gegeben sein muss.

Eine weite Anwendbarkeit des zu entwickelnden Werkzeugs, insbesondere für kleine und mittelständige Unternehmen, erfordert die Verfügbarkeit einer entsprechenden Softwareumgebung und eine hohe Bedienerfreundlichkeit der Software-Lösung. Aus diesem Grund ist vorgesehen, das Modell MS-Excel-basiert zu gestalten, da MS-Office-Produkte in Unternehmen weit verbreitet und im Umgang den meisten Anwendern vertraut sind. Ein MS-Excel-basiertes Werkzeug kann zum einen durch eine interaktive Ein- und Ausgabe realisiert werden, bei der die Optimierungssoftware in das Anwendungsprogramm, d. h. in MS-Excel integriert wird (z. B. in Form eines Add-Ins) (Suhl, Mellouli 2009, S. 82ff.). Zum anderen besteht die Möglichkeit einer automatischen Ein- und Ausgabe, die eine Schnittstelle oder ein Standardformat zwischen dem Anwendungsprogramm und der Optimierungs-Software erforderlich macht. Die dritte Alternative besteht in der Nutzung von Modellierungssprachen. Auf Grund der geforderten Bedienerfreundlichkeit werden Software-Alternativen ausgegrenzt, die Programmierkenntnisse erfordern (z. B. der IBM CPLEX Solver der auf der Programmiersprache Ampl basiert). Software, die Modellierungssprachen erforderlich macht, wird daher nicht weiter betrachtet. Eine weite Anwendbarkeit im Bereich kleiner und mittelständiger Unternehmen bedingt zudem, dass die Kosten einer Software-Lösung möglichst gering sind.

Für den Anwendungsfall ist dementsprechend eine ausreichend leistungsstarke Optimierungssoftware, mit MS-Excel (automatisch) interagierende, bedienerfreundliche und nach Möglichkeit kostenfreie Software-Lösung zu wählen.

6.2.1 Software-Alternativen

In Abhängigkeit der Leistungsparameter, Kosten und Möglichkeiten zur Integration in MS-Excel werden nachstehend Software-Alternativen analysiert, die in ihrer Spezifikation den Anforderungen im Mindesten genügen. Diese werden vielfach als Solver beschrieben, wobei der Begriff Solver zum einen den verwendeten Lösungsalgorithmus und zum anderen die verwendete Optimierungssoftware bezeichnen kann.

Grundsätzlich sind kostenfreie Open-Source-Lösungen und kostenpflichtige Software-Lösungen zu unterscheiden. Kostenpflichtige Software-Lösungen bieten zumeist mehrere integrierte Lösungsalgorithmen für die verschiedenen Problemtypen. Die implementierten Lösungsalgorithmen umfassen u. a. die bereits oben dargestellten Verfahren, die entsprechend vordefiniert und im Gegensatz zu Open-Source-Lösungen nicht beeinflusst oder abgeändert werden können. Zahlreiche der angebotenen Open-Source-Lösungen zur Lösung linearer Optimierungsprobleme entstammen universitären und forschungsnahen Bereichen, z. B. die Sol-

ver NEOS (Argonne National Laboratory 2010), BPMPD (Mészáros), LPabo (Operating System Laboratory) und GLPK (GNU Linear Programming Kit). Sie verwenden zumeist innovative Algorithmen, bieten eine wissenschaftlich fundierte Basis und lassen sich in ihrem Verhalten flexibel an das gegebene Problem anpassen. Diese lassen sich jedoch nicht direkt oder mit Hilfe eines Standardformats oder einer bereits spezifizierten Schnittstelle in MS-Excel einbinden. Die Programmierung einer spezifischen Schnittstelle bedingt zumeist hohe Kosten, zeitlichen Aufwand und Fachwissen für die Implementierung, Optimierung und Pflege der Schnittstelle. Die entstehenden Kosten übersteigen erfahrungsgemäß die zur Beschaffung kostenpflichtiger Alternativen. Die Verwendung von Open-Source Lösungen, welche die Programmierung einer derartigen Schnittstelle erfordern, erscheint für kleine und mittelständige Unternehmen nicht sinnvoll/angemessen.

Tabelle 6-1 zeigt eine Vorauswahl verschiedener hoch entwickelter Solver bzw. Software-Alternativen, die auf Grund der enthaltenen Lösungsverfahren generell die Möglichkeit zur Lösung gemischt ganzzahliger Optimierungsprobleme bieten (Suhl, Mellouli 2009, S. 79f.) und eine interaktive Ein- und Ausgabe in MS-Excel erlauben.

Tabelle 6-1 **Tabellarischer Vergleich alternativer Software-Lösungen**

		Lindo Systems What'sBEST	Frontline Systems z. B. Premium Solver	Frontline Systems MS-Excel-Solver
Umfang	max. Variablen	8000	8000	200
	max. Randbedingungen	4000	4000	100
	max. Integers/Binaries	800	nicht bekannt	nicht bekannt
Verknüpfung mit MS-Excel		MS-Excel Add-In	MS-Excel Add-In	MS-Excel Add-In
Kosten in €		750 €	1.120 €	kostenlos

MS-Excel verfügt über einen integrierten Standard-Solver der für lineare Optimierungsprobleme den Simplexalgorithmus und für gemischt ganzzahlige Programme die Branch&Bound-Verfahren anwendet. Der Solver wird von dem Unternehmen Frontline Systems Inc. entwickelt, ist als Add-In in Excel integrierbar und im Installationsumfang von MS-Excel inbegriffen (Benker 2003, S. 7). Das an den Standard-Solver von MS-Excel übergebene Modell darf maximal 200 Variablen und 100 Nebenbedingungen umfassen, damit es mit diesem Solver lösbar ist. Die zuvor theoretisch dargestellte Probleminstanz, wurde exemplarisch in MS-Excel abgebildet und bestätigte, die eingeschränkte Leistungsfähigkeit des Standard-Solvers. Aus diesem Grund bietet der in MS-Excel integrierte Standard-Solver keine Alternative für das zu formulierende Optimierungsmodell.

Eine weitere Alternative besteht in der Verwendung der Premium-Solver des Unternehmens Frontline Systems Inc. (Benker 2003, S. 7; Frontline Systems Inc. 2010; Suhl, Mellouli 2009, S. 79f.). Durch die Anwendung verschiedener Optimierungsverfahren und Algorithmen bieten diese Solver die Möglichkeit verschiedene Problemklassen zu lösen. Das Unternehmen bietet drei Software-Pakete unterschiedlichen Umfangs, je nach Anspruch und Komplexitätsgrad der zu lösenden Probleme. Die Kosten für die einzelnen Software-Pakete variieren zwischen rund 1500 US \$ und 4000 US \$. Das Unternehmen Frontline Systems Inc. bietet weitere Solver-

Varianten an (z. B. innovativen MOSEK- und Gurobi-Applikationen), die durch Standard-Schnittstellen mit MS-Excel verbunden werden können, aber mit bis zu 9000 US \$ deutlich kostenintensiver sind.

Weitere Option bildet die Software des Unternehmens Lindo Systems Inc. und insbesondere der als MS-Excel Add-In integrierbare Solver What'sBEST. Dieser setzt zur Lösung linearer Optimierungsprobleme Simplex-, Dual-Simplex- und Barriere-Algorithmen (z. B. Branch&Bound und Branch&Cut) ein. Die genutzten Algorithmen entsprechen den allgemeinen Standards und gelten als robust, zuverlässig und ermöglichen eine zeitnahe Berechnung der Lösungen (Cantner, Hanusch, Krüger 2007, S. 278; Dempe, Schreier 2006, S. 23). What'sBEST wird in drei Software-Modulen unterschiedlichen Leistungsumfangs angeboten (Commercial, Professional, Industrial). Das What'sBEST-Professional Modul s bereits die Berechnung von linearen Optimierungsproblemen mit einem Umfang von 8000 Variablen, 4000 Randbedingungen und 800 Integers (siehe auch Übersicht Tabelle 6-1), wobei der Preis für Einzellizenzen bei ca. 1000 US \$ liegt.

6.2.2 Wahl einer Software-Alternative

Durch die Ausführung als Add-In ist die Nutzung der zwei verbleibenden Software-Alternativen relativ einfach gestaltet, da die Bedienoberfläche MS-Office basiert und folglich den meisten Anwendern hinlänglich vertraut ist. Für die Wahl zwischen den zwei leistungsäquivalenten Solvertypen fiel die Wahl des Solver hinsichtlich des Kriteriums der Kosten auf das Add-In What'sBEST des Unternehmens Lindo Systems Inc. Das What'sBEST-Professional Modul stellt einen guten Kompromiss aus Leistungsumfang, Variabilität und anfallenden Kosten dar und bietet zudem die Möglichkeit Probleminstanzen bis zu 8000 Variablen, 4000 Randbedingungen und 800 Integers zu betrachten und das Modell zu erweitern.

Zur Implementierung und Nutzung des Modells in MS-Excel unter Zuhilfenahme des Solvers What'sBEST ist dieser als Add-In zu installieren. Die Funktionen des Solvers stehen dem Anwender anschließend in MS-Excel als Symbolleiste zur Verfügung. Zur Implementierung und Interpretation der Ergebnisse sollte der Anwender ein grundlegendes Verständnis für die Modellierung des Optimierungsproblems mit What'sBEST haben. Der Nutzung der Funktionen von What'sBEST kommt im implementierten, d. h. funktionsbereiten, Zustand eine geringe Bedeutung zu. Im Rahmen der nachstehend beschriebenen Implementierung des Modells werden jedoch kurz alle wesentlichen Funktionen von What'sBEST erörtert.

6.3 Implementierung des Modells als MS-Excel-basiertes Werkzeug

Um das in Unterkapitel 5.3 theoretisch formulierte mathematische Modell in MS-Excel unter Zuhilfenahme des Solvers What'sBEST zu implementieren und zu lösen, ist die in Abbildung 6-1 dargestellte Vorgehensweise herangezogen worden.

Im ersten Schritt werden die logischen Zusammenhänge des Modells, d. h. die Zielfunktion und die gegebenen Restriktionen unter Nutzung der MS-Excel Standardfunktionen, in MS-Excel abgebildet und programmiert. Hier ist der Umfang zu bestimmen, der durch das Modell abgebildet und für den die Zusammenhänge durch mathematische Zellbezüge beschrieben werden sollen. Für die Anwendung und Handhabbarkeit im Umfeld mittelständiger und kleiner Unternehmen ist in MS-Excel exemplarisch ein Umfang von 15 Produktionsstufen und 15 Planungsperioden implementiert worden, der jedoch beliebig erweiterbar ist.

Nutzung der MS-Excel Standardfunktionen

1. Abbilden der Funktionen und Restriktionen in MS-Excel

Nutzung der durch den Solver What's Best bereitgestellten Funktionen

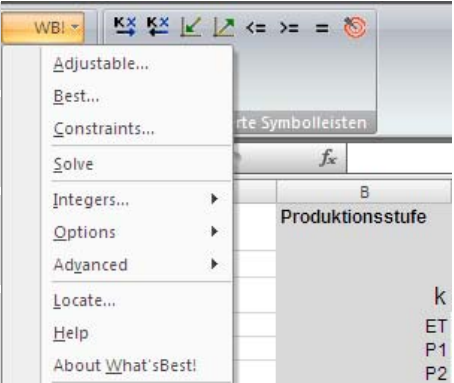
2. Deklaration der Variablen (Adjustables/Integers)	
3. Deklaration der Zielfunktion und Zielrichtung (Best)	
4. Deklaration der Nebenbedingungen (Constraints)	
5. Optimierung des Modells durch integrierte Solver (Solve)	

Abbildung 6-1 Vorgehensweise zur Implementierung des Modells

In MS-Excel werden folglich Zellen für die spezifischen Eingabegrößen vorgesehen, wie bspw. die Bedarfe der Planungsperioden, die Kostensätze und Zeiten (t_e , t_r , t_{kmax} , t_{Abk}) der Produktionsstufen, die Produktionskoeffizienten, die Ressourcen und deren Kapazitäten in den jeweiligen Planungsperioden (s. Unterkapitel 5.4). Zudem werden für jede Produktionsstufe und jede Planungsperiode Zellen für die gemäß der Zielfunktion zu optimierenden Variablen angelegt, d. h. die Losgröße, der einzulagernde Bestand und die binären Rüstvariablen. Die Eingabegrößen und Variablen werden über Zellbezüge zu den einzelnen Kostenfunktionen der Produktionsstufen und Planungsperioden verbunden. Die Summation dieser Kostenfunktionen über die Planungsperioden und Produktionsstufen ergibt die Zielfunktion der Gesamtkosten. Zudem werden die Zellen der Eingabegrößen und der Variablen genutzt, um die im mathematischen Modell gegebenen Restriktionen und deren Zusammenhänge in MS-Excel abzubilden. Abbildung 6-2 zeigt auszugsweise das Vorgehen bei der Formulierung der Lagerbilanzgleichungen in MS-Excel. Für jede Produktionsstufe und jede Planperiode wird der Lagerbestand der Vorperiode, die Losgröße der betrachteten Periode, die Abgänge in nachfolgenden Pro-

duktionsstufen und der Lagerbestand der betrachteten Periode mit dem für die betrachtete Periode gegebenen Bedarf in Bilanz gesetzt. Hierzu wird auf die entsprechend definierten Zellen (Variablen und Eingabegrößen) zugegriffen. Exemplarisch sind die Zellbezüge für den in der ersten Produktionsstufe gegebenen Abgang in nachfolgende Produktionsstufen in der ersten Planperiode gezeigt, wobei lediglich die Zellen der Variable „Losgröße“, nicht aber die Produktionskoeffizienten zu sehen sind. Durch eine derartige Vorgehensweise ist das in Abschnitt 5.3.1 und Abschnitt 5.3.2 dargestellte Modell vollständig durch Zellen und Zellbezüge abgebildet.

167	$q_{k,t}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
168	ET		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00
169	P1		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00
170	P2		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00
171	P3		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00
172	P4		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00
173	P5		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00
174	P6		150,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,00	0,00	0,00
175	P7		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00
176	P8		210,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
177	Z1		150,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,00	0,00	0,00
178			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
179			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
181			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
182			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
183											
184											
185											
186											
188	Nebenbedingungen										
189											
190											
191	Lagerbilanzgleichungen (physischer Lagerbestand)							Kapazitätsrestriktionen			
192	k,t	$y_{k,t-1}$	q_{kt}	$\sum a_{ki} \times q_{it}$	y_{kt}	\sum	d_{kt}			j,t	$\sum t$
193	1,1	0,00	75,00	=SUMME(\$C\$86*\$D\$168;\$D\$86*\$D\$169;\$E\$86*\$D\$170;\$F\$86*\$D\$171;\$G\$86*\$D\$172;\$H\$86*\$D\$173;\$I\$86*\$D\$174;\$J\$86*							
194	2,1	0,00	75,00	D\$175;\$K\$86*\$D\$176;\$L\$86*\$D\$177;\$M\$86*\$D\$178;\$N\$86*\$D\$179;\$O\$86*\$D\$180;\$P\$86*\$D\$181;\$Q\$86*\$D\$182)							
195	3,1	0,00	75,00								
196	4,1	0,00	75,00	SUMME(Zahl1; [Zahl2]; [Zahl3]; [Zahl4]; [Zahl5]; [Zahl6]; [Zahl7]; [Zahl8]; [Zahl9]; [Zahl10]; [Zahl11]; [Zahl12]; [Zahl13]; [Zahl14]; [Zahl15]; [Zahl16])							
197	5,1	0,00	75,00	75,00	0,00	0,00	=	0,00		a,2	
198	6,1	0,00	75,00	75,00	0,00	0,00	=	0,00		b,2	€
199	7,1	0,00	150,00	150,00	0,00	0,00	=	0,00		c,2	9, €
200	8,1	0,00	75,00	75,00	0,00	0,00	=	0,00		d,2	€
201	9,1	0,00	210,00	75,00	135,00	0,00	=	0,00		a,3	
202	10,1	0,00	150,00	150,00	0,00	0,00	=	0,00		b,3	
203	11,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	=	0,00		c,3	
204	12,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	=	0,00		d,3	
205	13,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	=	0,00		a,4	
206	14,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	=	0,00		b,4	

Abbildung 6-2 Abbildung der Lagerbilanzgleichungen in MS-Excel (Auszug)

In einem zweiten Schritt werden diese Zellen genutzt und durch Deklaration der verschiedenen Modellgrößen an den Solver What'sBEST übergeben. Hier sind zunächst die Variablen zu deklarieren und als ganzzahlige und im Fall der binären Rüstvariablen als binäre Werte zu definieren (Über die Funktionen „Adjustables“ und „Integers“). Anschließend ist durch die Funktion „Best“ die Zielfunktion zu deklarieren, d. h. die in MS-Excel durch eine Zelle repräsentierte Funktion der Gesamtkosten, und die Richtung der Optimierung zu bestimmen („min“ für minimieren oder „max“ für maximieren). Abschließend werden die Restriktionen deklariert. Durch mathematische Operatoren, die in der Funktion „Constraints“ hinterlegt sind, werden die deklarierten Zellen der linken Hand mit denen der rechten Hand über die Operatoren verbunden. Die Zellen der rechten und linken Hand enthalten die zuvor definierten Zusammenhänge zwischen Eingabegrößen und Variablen und werden durch die Deklaration als Nebenbedingungen in die Optimierung der Zielfunktion/-zelle einbezogen. Durch die Funktion „Solve“ besteht abschließend die Möglichkeit, das durch die Deklaration an den Solver übergebene Mo-

dell durch Variation der definierten Variablen unter Berücksichtigung der Restriktionen hinsichtlich der Zielrichtung zu optimieren. Durch die zuvor geschilderte Implementierung ist das Modell in seiner Struktur und den logischen Zusammenhängen vollständig in MS-Excel hinterlegt. Das Modell umfasst unter Berücksichtigung des oben beschriebenen Umfangs 675 Variablen, davon 225 binäre und knapp 800 Restriktionen. Außer zur Lösung des Modells durch die Funktion „Solve“ ist eine Nutzung der dargestellten Funktionen von What'sBEST nur bei einer Erweiterung des Modellumfangs erforderlich. Für die Nutzung des Werkzeugs in einem konkreten Anwendungsfall ist hierauf aufbauend jedoch eine unternehmensspezifische Auslegung des Modells erforderlich.

Durch das Unternehmen ist als Grundlage festzulegen, für welche Ersatzteile die Planung der Nachserienversorgung vorgenommen werden soll. Auf Basis dieser Entscheidung sind der Planungszeitraum und die Anzahl der Planungsperioden festzulegen. Zudem sind die Produktionsstufen aus der für die Ersatzteile gegebenen Produkt- und Prozessstrukturen abzuleiten. Produktionsstufen stellen lagerbare (Zwischen-) Produkte dar, die nach Durchlauf eines oder mehrerer Prozesse (Wertschöpfungsabschnitte) entstehen, welche eindeutig einer Ressource zugeordnet werden können. Für die Festlegung der Produktionsstufen ist folglich ein sinnvolles Abstraktionsniveau zu wählen, welches das Modell nicht zu komplex werden lässt. Weiterhin ist die Form der Integration in die laufende Produktion zu wählen, um eine Zuweisung der Produktionsstufen zu Ressourcen im oben dargestellten Sinn zu ermöglichen. Hier ist die Kompatibilität des Abstraktionsniveaus der Produktionsstufen und der Ressourcen erforderlich. Besteht eine Produktionsstufe bspw. in der Montage einer Gehäuseeinheit kann als entsprechende Ressource der Bereich der Montage angesehen werden. Umfasst die Produktionsstufe hingegen das Fräsen von zwei Fasen sind die Ressourcen analog zu den Prozessen detaillierter einzuteilen, z. B. eine Fräsmaschine. Aus der Produkt- und Prozessstruktur ist anschließend die Produktionskoeffizientenmatrix abzuleiten und die Indexmenge der den einzelnen Ressourcen zugewiesenen Produktionsstufen zu bestimmen. Für die Ersatzteile ist eine Prognose des über die Planungsperioden verteilten Gesamtbedarfs und dementsprechend des Verlaufs zu ermitteln. Für die zur Produktion gewählten Ressourcen ist entsprechend eine Prognose der Kapazitätsauslastung zu berücksichtigen. Auf Basis dieser Überlegungen sind wie in Abschnitt 5.3.3 dargestellt, die ressourcenspezifischen Kosten(-sätze) und Rüst- und Bearbeitungszeiten zu ermitteln. Des Weiteren sind Daten zur maximalen Lagerfähigkeit der (Zwischen-) Produkte und etwaiger Bauteilabkündigungen zu analysieren und bei Bedarf in das Modell einzubeziehen. Die in Kürze dargestellten Aspekte zur unternehmensspezifischen Auslegung und Anwendung des MS-Excel-basierten Werkzeugs werden im Rahmen der nachstehenden Validierung konkretisiert.

7 Validierung

Das nachstehende Kapitel erörtert die Validierung des entwickelten Modells und verdeutlicht die Anwendungsmöglichkeiten des MS-Excel-basierten Werkzeugs, welches zur Planung und Steuerung der Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase dient. Anhand einer prototypischen Erstanwendung wird die Validierung geschildert (s. Unterkapitel 7.1), bevor abschließend Handlungsempfehlungen zur Planung der Ersatzteilversorgung auf Basis von Produktions- und Bevorratungsstrategien abgeleitet werden (s. Unterkapitel 7.2).

7.1 Prototypische Erstanwendung

Die Validierung des entwickelten Modells und des Werkzeugs erfolgte im Rahmen der Planung der Nachserienversorgung eines First Tier Zulieferers der Automobilbranche (OEM). Die zur Planung herangezogene Datenbasis wurde anonymisiert, wobei die Verhältnismäßigkeit der Daten gewährleistet wurde. Zum Zeitpunkt der Erstanwendung bestanden im betrachteten Unternehmen keinerlei Überlegungen zu einer effektiven Planung der Nachserienversorgung. Zudem war keine spezifische Methodik zur Unterstützung einer derartigen Planung gegeben. Nachstehend werden Rahmenbedingungen aufgezeigt, die in die Planung und folglich in das MS-Excel-basierte Modell einzubeziehen waren.

Die Planung der Ersatzteilversorgung ist exemplarisch für einen ABS-Sensor vorgenommen worden, welcher zum Planungszeitpunkt kurz vor Auslauf der Serienproduktion stand. Im Seriengeschäft wird der Sensor auf zwei hoch-automatisierten Linien gefertigt. Auf den Fertigungseinrichtungen erfolgt jeweils ein zentraler Wertschöpfungsschritt. Auf der Wickellinie werden die in den ABS-Sensor eingesetzten Spulen gewickelt, auf der zweiten Linie werden die Spulen in das Gehäuse des Sensors eingesetzt und vergossen (s. Abbildung 7-1).

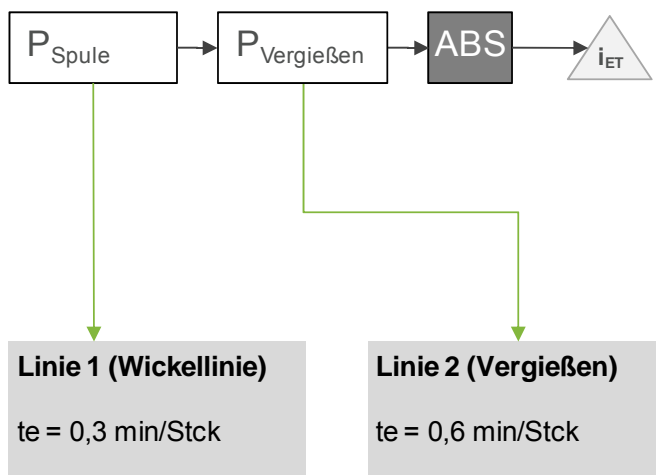


Abbildung 7-1 Kontext der Planung der Ersatzteilversorgung im Rahmen der prototypischen Erstanwendung

Das Unternehmen beabsichtigt, in der Nachserienversorgung die Fertigung der Sensoren durch eine Neuproduktion zu realisieren und entsprechend die hochautomatisierten Linien einzusetzen, ohne eine Neukonfiguration des Systems bzw. der Prozesse vorzunehmen. Die Fertigungseinrichtungen werden entsprechend nicht durch andere Produkte belastet. Eine

sinnvolle Lagerung der für den Prozess erforderlichen Komponenten ist auf Grund des Vergießprozesses und der Verkettung der beiden Linien nur auf Fertigteilebene möglich, so dass die genannten Wertschöpfungsschritte gemäß der in Unterkapitel 4.1 gegebenen Definition zu einer Produktionsstufe zusammengefasst werden. Entsprechend erfolgt die Zuweisung der Produktionsstufe zur Ressource „Fertigungslinie“, da eine differenzierte Betrachtung der zwei Linien nicht erforderlich ist. Die Ressource wird folglich durch die Summe der Bearbeitungszeiten von 0,3 Minuten je Stück für den ersten und von 0,6 Minuten je Stück für den zweiten Wertschöpfungsschritt belastet. Unter der Prämisse, dass die Fertigungseinrichtungen der Serienphase zur Produktion der ABS-Sensoren herangezogen werden und kapazitiv nicht zur Produktion anderer Erzeugnisse genutzt werden, ist ein Werkzeugwechsel, welcher sich durch einen Produktwechsel ergibt, nicht erforderlich. Der Rüstaufwand, durch den die Ressource neben den Bearbeitungszeiten belastet wird, entspricht daher dem Inbetriebnahmeaufwand, der nach Stillstand der Linie 35 Stunden erfordert. Kapazitätsrestriktionen sind jedoch auf Grund der alleinigen Produktion der ABS-Sensoren nicht entscheidungsrelevant. Zur Planung der Nachserienversorgung unter der Zielsetzung der Kostenminimierung und unter Zuhilfenahme des MS-Excel-basierten Werkzeuges, ist eine gezielte Aufbereitung dieser und weiterer Daten erforderlich, um diese im Modell zu berücksichtigen.

7.1.1 Aufbereitung der erforderlichen Unternehmensdaten

Von Seiten des Vertriebs besteht eine Prognose des Bedarfs an ABS-Sensoren für die Jahre 2010, 2011 und 2012 in Höhe von 11000, 8500 und 7500 ABS-Sensoren. Von Seiten des Unternehmens wird auf Basis dieser Daten eine Optimierung der Losgrößen bei quartalsweiser Planung unter Annahme einer über das jeweilige Jahr kontinuierlich verteilten Nachfrage angestrebt. Der Ermittlung der einzubeziehenden Kostensätze kommt neben der Bedarfsprognose eine zentrale Bedeutung zu. Tabelle 7-1 zeigt die Ermittlung der variablen Produktionskosten auf Basis entscheidungsrelevanter Einzelkosten, wobei ausschließlich Materialeinzelkosten und Fertigungslohnkosten erfasst werden (Maschinenkosten nicht vorhanden).

Tabelle 7-1 Ermittlung der variablen Produktionskosten

MEK	Produkt	Menge	ME	Einkaufspreis [€/ME]	MK [€/Stck]
	Spule	6	Stck	1,48	8,85
	Vierkantdraht (Lötfläche)	0,0002	Kg	30,62	0,01
	Gehäuse	1	Stck	1,32	1,32
	Kabelsatz	1	Stck	1,02	1,02
	PU-Vergussmasse	0,006	Kg	9,98	0,06
	PU-Vergussmasse Härter	0,0014	Kg	8,73	0,01
	CU Lackdraht	0,0062	Kg	16,96	0,11
	Draht	0,001	Kg	14,20	0,01
	Flussmittel	0,0003	L	8,13	0,00
FLK	Fertigungseinrichtung	Zeit [min/Stck]	Anzahl MA	Stundensatz [€/h]	FLK[€/Stck]
	Linie 1 (Wickellinie)	0,3	1,0	40,0	0,2
	Linie 2 (Vergießen)	0,6	1,0	20,0	0,2

Summe variabler Produktionskosten [€/Stück] 11,80

Da keine Angaben zu etwaigen Materialpreissteigerungen u. ä. gegeben waren, sind die dargestellten variablen Produktionskosten nicht zeitlich variabel und in diesem Sinn nicht entscheidungsrelevant. Sie dienen jedoch als Wertmaßstab für die Ermittlung der Lagerkosten. Auf Basis der variablen Produktionskosten von 11,80 Euro pro Stück und unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.3.3 aufgezeigten Berechnungsformel wird der Lagerkostensatz berechnet. Zur Beschreibung des Anteils der Kapitalbindung wird neben den variablen Produktionskosten von einem kalkulatorischen Zinssatz i von 10% ausgegangen. Für die physische Lagerhaltung k_l der Ersatzteile fallen 5 Euro je 1000 Stück und somit 0,005 Euro je Stück an. Der Lagerkostensatz ergibt sich nach (7-1) zu 0,6 Euro je Stück.

$$l_k = \frac{p_{\Sigma}}{2} \times \frac{i}{100} + k_l = \frac{11,8}{2} \times 0,1 + 0,005 = 0,59 + 0,005 \approx 0,6 \quad (7-1)$$

Unter der oben bereits dargestellten Annahme, dass die Fertigungseinrichtungen der Serienphase ausschließlich zur Produktion der ABS-Sensoren herangezogen werden, basieren die Rüstkosten bzw. der Rüstkostensatz lediglich auf der zur Inbetriebnahme erforderlichen Zeit und den folglich entstehenden Lohnkosten in Höhe von 1416 Euro (vgl. Tabelle 7-2). Weitere den Rüstkosten zuordenbaren Kostenaspekte wurden vom Unternehmen nicht spezifiziert.

Tabelle 7-2 Ermittlung des Rüstkostensatzes

	Zeit pro Einrichtungsvorgang [min]	Anzahl MA	Stundensatz [€/h]	FLK [€/Stck]
Inbetriebnahme	2124	1	40	1416
Werkzeugwechsel	-	-	-	-

Die zuvor dargestellten Daten und Zusammenhänge sind an das Modell zu übergeben. Dies macht die in Unterkapitel 6.3 bereits beschriebene unternehmensspezifische Auslegung des Modells erforderlich, die nachstehend beschrieben wird.

7.1.2 Unternehmensspezifische Auslegung des Modells und Optimierung mit Hilfe des MS-Excel-basierten Werkzeugs

Grundlage bildet das vom Unternehmen zur Planung der Nachserienversorgung gewählte Ersatzteil, in diesem Fall der ABS-Sensor. Für das Ersatzteil sind anschließend Planungszeitraum und Anzahl der Planungsperioden festzulegen. Die Planung der Ersatzteilversorgung des ABS-Sensors wird für drei Kalenderjahre vorgenommen, die auf Grund der quartalsweisen Betrachtung in 12 Planperioden eingeteilt werden.

Unter Beachtung der spezifischen Restriktionen zur Bildung von Produktionsstufen (aus Wertschöpfungsschritten resultierendes lagerbares (Zwischen-) Produkt, welches einer Ressource zuordenbar ist) ist die Anzahl zu berücksichtigender Produktionsstufen für den ABS-Sensor auf Basis der aufgezeigten Produkt- und Prozessanforderung auf eine Produktionsstufe begrenzt. Eine Produktionskoeffizientenmatrix ist folglich nicht abzuleiten, da keine Interdependenzen der Produkt- und Prozessstruktur gegeben sind. Für das Ersatzteil ist eine Prognose des über die Planungsperioden verteilten Gesamtbedarfs und dem entsprechenden Verlauf zu

ermitteln. Der angenommene Verlauf der Bedarfe und die Eingabemöglichkeit sind in Abbildung 7-2 dargestellt.

Bedarf	2010	2011	2012
	11000	8500	7500

Primärplanbedarf (Anzahl)	2010				2011				2012			
$d_{k,t}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ABS Sensor	2750	2750	2750	2750	2125	2125	2125	2125	1875	1875	1875	1875
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 7-2 Prognostizierter Bedarfsverlauf für ABS-Sensor

Zudem ist die Form der Integration in die laufende Produktion zu wählen, um eine Zuweisung der Produktionsstufen zu Ressourcen im oben dargestellten Sinn zu ermöglichen und die spezifischen ressourcenbezogenen Kostensätze zu ermitteln. Die Produktion erfolgt als Neuproduktion auf den Serienfertigungseinrichtungen, die zu einer Ressource zusammengefasst wurden. Eine Bestimmung der Indexmenge der den einzelnen Ressourcen zugewiesenen Produktionsstufen ist daher nicht erforderlich. Da die Auslastung der Fertigungseinrichtungen sehr gering ist, sind keine limitierenden Kapazitätsrestriktionen gegeben. Eine Prognose der Kapazitätsauslastung der zur Fertigung herangezogenen Ressourcen und Eingabe dieser Kapazitäten in das Modell ist folglich nicht erforderlich. Die Zuweisung diene somit lediglich der Ermittlung der ressourcenspezifischen Kosten(-sätze) und Rüst- und Bearbeitungszeiten. Diese werden, wie in Abbildung 7-3 dargestellt, in das Modell eingepflegt. Obwohl die variablen Produktionskosten für jede Planperiode 11,80 Euro pro Stück betragen, nicht zeitlich veränderlich und folglich nicht entscheidungsrelevant sind, werden sie in die Berechnung einbezogen, um die Höhe der entstehenden Gesamtkosten abzubilden. Zudem werden die produktspezifischen Daten zur maximalen Lagerfähigkeit der (Zwischen-) Produkte und etwaiger Bauteilabkündigungen in das Modell eingegeben, die jedoch in beiden Fällen unkritisch ist.

Produktionsstufe	Lagerkostensatz	Rüstkostensatz	Bearbeitungszeit	Rüstzeiten	Lagerfähigkeit	Bauteilabkündigung
k	l_k	r_k	te_k	tr_k	t_{max}	t_{Abk}
ABS Sensor	0,6	1416,0	0,9	2124,0	15,0	-
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-

Abbildung 7-3 Produkt- und Prozessspezifische Eingabegrößen

Die in das MS-Excel-basierte Werkzeug einbezogenen Daten beschreiben in ihrer Ausprägung ein sehr einfaches Modell. Dies verdeutlicht jedoch die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten durch Abbildung der verschiedenen Ausprägungen und flexible unternehmensspezifische Auslegung.

Nachstehend werden die durch die Optimierung gewonnenen Erkenntnisse dargestellt. Abbildung 7-4 zeigt den Statusbericht, der nach der Optimierung der übergebenen Daten mit Hilfe des Solvers What'sBEST in einem separaten Tabellenblatt der geöffneten Anwendung ausgegeben wird. Die Software-Lösung What'sBEST zieht zur Optimierung, wie in Unterkapitel 6.1 dargestellt, exakte Lösungsverfahren heran. Der Statusbericht zeigt, dass zur Lösung dieses

Modells das Branch&Bound-Verfahren herangezogen wurde. Durch eine exakte Lösung wird zudem automatisch der Modelltyp bestimmt (Mixed Integer Linear Program).

MODEL TYPE:	Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)
SOLUTION STATUS:	Globally Optimal
OBJECTIVE VALUE:	334766.70686533
DIRECTION:	Minimize
SOLVER TYPE:	Branch-and-Bound
TRIES:	255
INFEASIBILITY:	9.0949470177293e-013
BEST OBJECTIVE BOUND:	334766.70686533
STEPS:	0
ACTIVE:	0
SOLUTION TIME:	0 Hours 0 Minutes 0 Seconds

Abbildung 7-4 Dokumentation und Statusbericht der Optimierung

Neben dem Modelltyp und dem genutzten Lösungsverfahren, werden der Lösungsstatus, die Anzahl zur Lösung erforderlicher Versuche, die Lösungszeit und insbesondere das Ergebnis der Optimierung visualisiert. Durch den Solver ist in 255 Schritten (tries) und einer Rechenzeit (solution time) unter einer Sekunde die Optimallösung (globally optimal) bestimmt worden. Diese entspricht den minimierten Gesamtkosten K_{ges} , welche für die Planung der Nachserienversorgung des ABS-Sensors unter Annahme der dargestellten Daten 335.000 Euro (objective value) betragen.

Neben den je Planperiode entstehenden Kosten und den resultierenden Gesamtkosten sind vorrangig die je Planperiode einzulagernden Bestände y_{kt} und die je Planperiode zu realisierenden Losgrößen q_{kt} von Interesse, da diese die Produktions- und Bevorratungsstrategien umschreiben. Abbildung 7-5 zeigt diese Größen und deren Ausgabe im in MS-Excel.

Das Modell ermöglicht folglich nicht nur die quantitative Bestimmung und Visualisierung optimaler Produktions- und Bevorratungsstrategien, sondern unter Annahme konstanter Parameter die Abbildung der derzeitigen Situation. Durch eine Variation der dynamischen Parameter, z. B. unter Annahme weiterer Bedarfsverläufe, können folglich Sensitivitäten abgebildet werden. Zudem können alternative Optionen zur Integration in die laufende Produktion, die bis jetzt nicht in Betracht gezogen wurden, quantitativ bewertet und den anderen Optionen gegenübergestellt werden.

7.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Überlegung war, auf Basis des validierten Modells und ausgehend von typischen Anforderungen der Industrie bedeutende Szenarien zu definieren und für diese Handlungsempfehlungen zu generieren. Die empirische Erhebung zeigt, dass die Individualität und Komplexität der Prozesse und Produkte in der Ersatzteilversorgung nicht ermöglichen, bestimmte Problemgruppen zu klassifizieren. Demzufolge werden nachstehend beispielhaft Szenarien vorgestellt, die visualisieren, wie sich eine Änderung von Eingabeparametern auf das durch die Optimierung erhaltene Ergebnis auswirken (Sensitivität). Zudem wird überprüft ob die gewonnenen Erkenntnisse nicht logisch widersprüchlich sind und dem erwarteten Systemverhalten genügen. Hierzu wird das Modell gemäß der nachstehend aufgezeigten Daten ausgelegt. Um Sensitivität und logische Zusammenhänge des implementierten Modells zu prüfen, ist die Problem Instanz theoretisch nachvollziehbar zu gestalten. Zudem sind Einflussvariabel einzeln zu variieren.

Für ein fiktives Ersatzteil ET sind in Abbildung 7-6 die zur Herstellung erforderlichen Produktionsstufen dargestellt. Die dargestellten Interdependenzen zwischen den Produktionsstufen sind in die Produktionskoeffizienten a_{ki} zu übertragen, die in der Produktionskoeffizientenmatrix zusammengefasst werden. Die Spalten repräsentieren die übergeordneten (Zwischen-) Produkte (Spaltenindex i), für die in den Zeilen zu hinterlegen ist, ob das jeweilige Element (Zeilenindex k) ein für das betrachtete (Zwischen-) Produkt untergeordnetes (Zwischen-) Produkt darstellt. Geht ein aus der Produktionsstufe k resultierendes (Zwischen-)Produkt nicht in das aus Produktionsstufe i resultierende (Zwischen-) Produkt ein, ist der Produktionskoeffizient a_{ki} null, ansonsten eins.

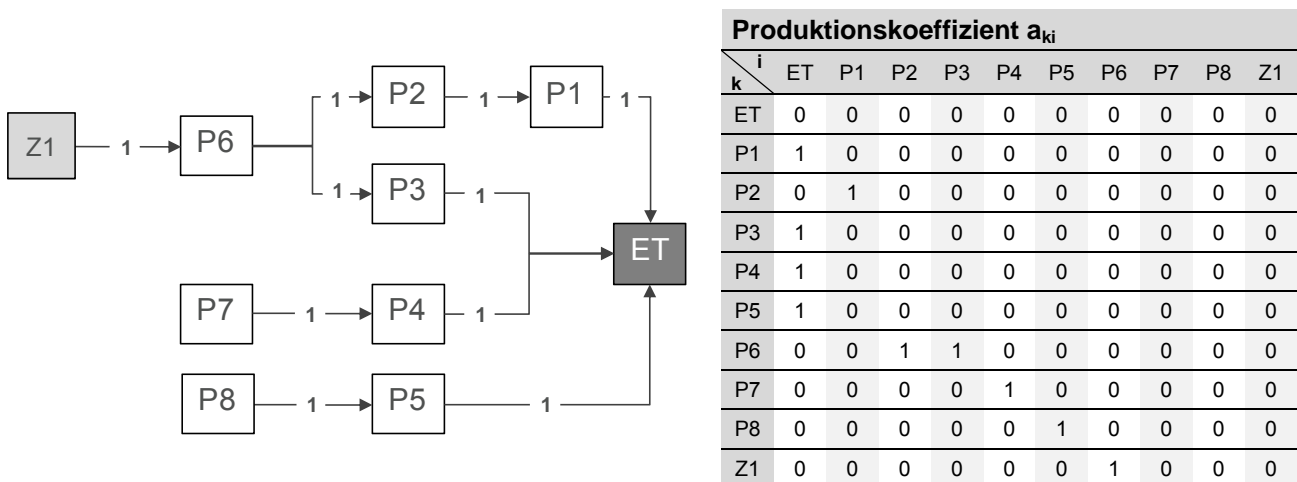


Abbildung 7-6 Aus Produkt- und Prozessstruktur abgeleitete Produktionskoeffizientenmatrix a_{ki}

Der gesamte Bedarf beläuft sich auf 210 Ersatzteile, die über 15 Planperioden nachgefragt werden und sich wie folgt aufteilen: 10, 10, 25, 5, 20, 5, 25, 20, 20, 5, 40, 0, 10, 0, 15. Entsprechend ergeben sich für die in den Produktionsstufen P1, P2, P3, P4, P5, P7 und P8 zur Produktion erforderlichen Komponenten und Bauteile gleiche Bedarfe. Die Komponenten in Produktionsstufe P6 werden doppelt erforderlich sowie der Zukauf des Produktes Z1.

Zur Berechnung werden zwei Szenarien herangezogen, die auf zwei Alternativen zur Integration in die laufende Produktion basieren. In Szenario 1 werden die (Zwischen-) Produkte in einer separaten Nachserienfertigung hergestellt, Szenario 2 basiert auf der Einlastung der (Zwischen-) Produkte in die Serienfertigung ähnlicher Produkte. Abbildung 7-7 zeigt schematisch die Bestimmung der Indexmenge an Produktionsstufen, deren Prozesse die Ressourcen A bis D belasten. Die Indexmenge, d. h. die Zuteilung zu den Ressourcen, ist für beide Szenarien äquivalent, wobei die Ressourcen A bis D folglich andere Fertigungseinrichtungen darstellen.

Indexmenge Ressourcen J					
$K_{k,j}$	A	B	C	D	
ET	0	0	0	1	
P1	0	0	0	1	
P2	0	0	1	0	
P3	0	0	1	0	
P4	0	0	1	0	
P5	0	0	1	0	
P6	0	1	0	0	
P7	1	0	0	0	
P8	1	0	0	0	
Z1	0	0	0	0	

Abbildung 7-7 Zuweisung der in den Produktionsstufen auszuführenden Prozesse zu den Ressourcen J

Eine eingeschränkte Ressourcenkapazität wird zur Vereinfachung der Probleminstanz nicht angenommen. Weiterhin werden die Bearbeitungs- und Rüstzeiten trotz einer Ausführung durch unterschiedliche Ressourcen konstant gehalten. Die variablen Produktionskosten nehmen analog für beide Szenarien die in Tabelle 7-3 dargestellten Werte für die einzelnen Produktionsstufen an, welche in jeder Planperiode um 10 % des Wertes der Vorperiode steigen.

Tabelle 7-3 Variable Produktionskosten von (Zwischen-) Produkt k in Periode 1 p_{k1}

Variable Produktionskosten p_{k1} [€]									
ET	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Z1
4,0	2,0	1,0	1,0	1,5	3,0	2,0	2,5	3,0	5,0

Die Lagerkosten in beiden Szenarien sind für jede Produktionsstufe entsprechend gleich, da auf Grundlage äquivalenter variabler Produktionskosten und Betrachtung der gleichen Produktionsstufen, keine Änderungen in der Kapitalbindung und den Lagerbedingungen der einzelnen Produktionsstufen gegeben sind. Die Lagerfähigkeit auf den einzelnen Produktionsstufen wird für die Anzahl an Planperioden als unkritisch angenommen. Die Möglichkeit von Bauteilabkündigungen wird nicht in die Betrachtung einbezogen.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich die in Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 dargestellten produkt- und prozessspezifische Eingabegrößen der Szenarien. Zur Prüfung der Sensitivität und logischen Zusammenhänge des implementierten Modells werden ausschließlich die aus der unterschiedlichen Form der Integration resultierenden ressourcenspezifischen Rüstkostensätze auf zwei Produktionsstufen (am Ende der Wertschöpfungskette des Ersatzteils) variiert. Für Szenario 1 beträgt der Rüstkostensatz der Produktionsstufe ET (z. B. Vergießen) und der Produktionsstufe P1 jeweils 100 Euro je Rüstvorgang. Dies ist bspw. durch hohe Inbetrieb-

nahmekosten nach langem Stillstand erforderlich. Für Szenario 2 entfällt eine derartige Inbetriebnahme und die Rüstkostensätze für ET und P1 werden zu 5 Euro festgelegt.

Produktionsstufe	Lagerkostensatz	Rüstkostensatz	Stückbearbeitungszeit	Rüstzeiten	Lagerfähigkeit	Bauteilabkündigung
	[€]	[€]	[min]	[min]	[t]	[t]
k	l_k	r_k	te_k	tr_k	t_{max}	t_{Abk}
ET	10,00	100,0	1,0	10,0	15	-
P1	4,00	100,0	1,0	10,0	15	-
P2	5,00	100,0	1,0	10,0	15	-
P3	3,00	100,0	1,0	10,0	15	-
P4	6,00	300,0	1,0	10,0	15	-
P5	8,00	20,0	1,0	10,0	15	-
P6	6,00	30,0	1,0	10,0	15	-
P7	7,00	15,0	1,0	10,0	15	-
P8	1,00	500,0	1,0	10,0	15	-
Z1	3,00	0,0	0,0	0,0	15	-

Abbildung 7-8 Produkt- und prozessspezifische Eingabegrößen für Szenario 1

Produktionsstufe	Lagerkostensatz	Rüstkostensatz	Stückbearbeitungszeit	Rüstzeiten	Lagerfähigkeit	Bauteilabkündigung
	[€]	[€]	[min]	[min]	[t]	[t]
k	l_k	r_k	te_k	tr_k	t_{max}	t_{Abk}
ET	10,00	5,0	1,0	10,0	15	-
P1	4,00	5,0	1,0	10,0	15	-
P2	5,00	100,0	1,0	10,0	15	-
P3	3,00	100,0	1,0	10,0	15	-
P4	6,00	300,0	1,0	10,0	15	-
P5	8,00	20,0	1,0	10,0	15	-
P6	6,00	30,0	1,0	10,0	15	-
P7	7,00	15,0	1,0	10,0	15	-
P8	1,00	500,0	1,0	10,0	15	-
Z1	3,00	0,0	0,0	0,0	15	-

Abbildung 7-9 Produkt- und prozessspezifische Eingabegrößen für Szenario 2

Das Ergebnis der Optimierung und die entsprechend zu realisierenden Produktions- und Bevorratungsstrategien zeigen Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11. Ausgegeben wird der je Produktionsstufe und Planperiode einzulagernde Lagerbestand y_{kt} , die zu produzierende Losgröße q_{kt} und die je Produktionsstufe und Planperiode resultierenden Kosten, welche zu den Gesamtkosten K_{ges} aufsummiert werden. Die Gesamtkosten betragen für Szenario 1 circa 17.000 Euro und für Szenario 2 circa 16.300 Euro. Beide Modelle wurden durch das Branch&Bound-Verfahren gelöst, wobei die Zeit zur Lösung der Szenarien mit einer Stunde und dreißig Minuten für Szenario 1 und knapp zwanzig Minuten im Fall von Szenario 2 stark divergierte.

Ersichtlich ist, dass in Szenario 1, auf Grund des hohen Rüstkostensatzes für die Produktionsstufen ET und P1, die Bedarfe mehrerer Perioden zusammengefasst werden und für die nachfolgenden Perioden zur Deckung des Bedarfs eingelagert werden. In 15 Planperioden werden lediglich drei Lose aufgelegt. Bedingt durch diese Zusammenfassung bei stark fortgeschrittenem Wertschöpfungsfortschritt, werden die (Zwischen-) Produkte untergeordneter Produktionsstufen analog zu diesen drei Zeitpunkten gefertigt und eingelagert.

Szenario 1

Lagerbestand y_{kt}

$y_{k,t}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ET	0,00	65,00	55,00	30,00	25,00	5,00	0,00	45,00	25,00	5,00	0,00	25,00	25,00	15,00	15,00	0,00
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P8	0,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	65,00	65,00	65,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Z1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Losgröße q_{kt}

$q_{k,t}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ET		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P5		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P6		150,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,00	0,00	0,00	0,00	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P7		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P8		210,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Z1		150,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,00	0,00	0,00	0,00	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Gesamtkosten K_{ges}

$K_{ges\ k,t}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
ET		1050,00	550,00	300,00	250,00	50,00	0,00	1046,04	250,00	50,00	0,00	1024,37	250,00	150,00	150,00	0,00	5120,41
P1		250,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	348,02	0,00	0,00	0,00	437,19	0,00	0,00	0,00	0,00	1035,21
P2		175,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	224,01	0,00	0,00	0,00	268,59	0,00	0,00	0,00	0,00	667,60
P3		175,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	224,01	0,00	0,00	0,00	268,59	0,00	0,00	0,00	0,00	667,60
P4		412,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	486,01	0,00	0,00	0,00	552,89	0,00	0,00	0,00	0,00	1451,40
P5		245,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	392,03	0,00	0,00	0,00	525,78	0,00	0,00	0,00	0,00	1162,81
P6		330,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	526,04	0,00	0,00	0,00	704,37	0,00	0,00	0,00	0,00	1560,41
P7		202,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	325,02	0,00	0,00	0,00	436,48	0,00	0,00	0,00	0,00	964,01
P8		1265,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	65,00	65,00	65,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2200,00
Z1		750,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	743,06	0,00	0,00	0,00	718,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2211,07

Minimize -> 17040,52

Abbildung 7-10

Lagerbestand y_{kt} , Losgröße q_{kt} und resultierende Gesamtkosten K_{ges} nach Optimierung (Szenario 1)

Szenario 2

Lagerbestand y_{kt}

$y_{k,t}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ET	0,00	10,00	0,00	30,00	25,00	5,00	0,00	45,00	25,00	5,00	0,00	25,00	25,00	15,00	15,00	0,00
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P8	0,00	190,00	190,00	135,00	135,00	135,00	135,00	65,00	65,00	65,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Z1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Losgröße q_{kt}

$q_{k,t}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ET		20,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1		20,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2		20,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3		20,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4		20,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P5		20,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P6		40,00	0,00	110,00	0,00	0,00	0,00	140,00	0,00	0,00	0,00	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P7		20,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P8		210,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Z1		40,00	0,00	110,00	0,00	0,00	0,00	140,00	0,00	0,00	0,00	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Gesamtkosten K_{ges}

$K_{ges\ k,t}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
ET		185,00	0,00	571,20	250,00	50,00	0,00	951,04	250,00	50,00	0,00	929,37	250,00	150,00	150,00	0,00	3786,61
P1		45,00	0,00	138,10	0,00	0,00	0,00	253,02	0,00	0,00	0,00	342,19	0,00	0,00	0,00	0,00	778,31
P2		120,00	0,00	166,55	0,00	0,00	0,00	224,01	0,00	0,00	0,00	268,59	0,00	0,00	0,00	0,00	779,15
P3		120,00	0,00	166,55	0,00	0,00	0,00	224,01	0,00	0,00	0,00	268,59	0,00	0,00	0,00	0,00	779,15
P4		330,00	0,00	399,83	0,00	0,00	0,00	486,01	0,00	0,00	0,00	552,89	0,00	0,00	0,00	0,00	1768,73
P5		80,00	0,00	219,65	0,00	0,00	0,00	392,03	0,00	0,00	0,00	525,78	0,00	0,00	0,00	0,00	1217,46
P6		110,00	0,00	296,20	0,00	0,00	0,00	526,04	0,00	0,00	0,00	704,37	0,00	0,00	0,00	0,00	1636,61
P7		65,00	0,00	181,38	0,00	0,00	0,00	325,02	0,00	0,00	0,00	436,48	0,00	0,00	0,00	0,00	1007,88
P8		1320,00	190,00	135,00	135,00	135,00	135,00	65,00	65,00	65,00	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2310,00
Z1		200,00	0,00	561,06	0,00	0,00	0,00	743,06	0,00	0,00	0,00	718,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2222,12

Minimize -> 16286,02

Abbildung 7-11

Lagerbestand y_{kt} , Losgröße q_{kt} und resultierende Gesamtkosten K_{ges} nach Optimierung (Szenario 2)

In Szenario 2 ist der Rüstkostensatz für die Produktionsstufen ET und P1 deutlich geringer. Aus diesem Grund wird nicht nur für ebendiese Produktionsstufen sondern für die untergeordneten Produktionsstufen eine kleinere Anzahl an Periodenbedarfen zu einem Los zusammengefasst. Die Lagerbestände gehen zurück, da entsprechend häufiger produziert wird. In beiden Szenarien ist weiterhin erkenntlich, dass das aus Produktionsstufe P8 resultierende (Zwischen-) Produkt auf Grund des hohen Rüstkostensatzes in einem Los zu Beginn von Periode 1 produziert wird und entsprechend über den verbleibenden Zeitraum endbevorratet wird.

Derart zu vermutende logische Zusammenhänge sind in zahlreichen Testszenarien überprüft worden, um das Verhalten des Modells umfassend zu analysieren und zu hinterfragen. Vorrangig sind Größen betrachtet und entsprechend losgelöst von allen anderen Parametern variiert worden, die sich durch die Wahl der Integrationsform oder durch dynamische Größen, wie den zu Grunde gelegten Bedarfsverläufen, ändern. Für die Abbildung verschiedener Möglichkeiten zur Integration in die laufende Fertigung ist eine Vielzahl verschiedener Kostensätze, mit und ohne Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen getestet worden. Wichtig war in diesem Zusammenhang insbesondere, dass die Relation der Kosten zueinander stimmt, um die Bestimmung der Strategien zu fundieren. Für die Nutzung als monetäre Entscheidungsgrundlage ist zudem die tatsächliche Höhe der Kosten entscheidend.

Weiterhin sind Szenarien hinsichtlich gegebener und nicht gegebener Lagerfähigkeit betrachtet worden. Hier ist bspw. auch die Lagerfähigkeit an sich variiert worden, da diese durch bestimmte technische Verfahren erhöht werden kann, was gegenläufig in einem entsprechend höheren Lagerkostensatz zu berücksichtigen war. Die Variationsmöglichkeiten sind auf Grund der Fülle an Eingangsgrößen, die unternehmensspezifisch zu bestimmen sind, sehr groß. Abhängig von den in den Unternehmen betrachteten Produkten, Prozessen, Ressourcen und Entscheidungen, die zur Planung der Nachserienversorgung gegeneinander abgewogen werden müssen, bietet das entwickelte MS-Excel-Werkzeug die Möglichkeit, durch Variation der Eingabeparameter die Ersatzteilversorgung aus verschiedenen Blickwinkeln zu beleuchten, quantitativ zu bewerten und zu vergleichen.

8 Zusammenfassung

Um insbesondere kleinen und mittelständigen Unternehmen zu ermöglichen, auf die Vielzahl an Herausforderungen in der Nachserie angemessen zu reagieren, ist im Rahmen dieser Ausarbeitung eine umfassende Planungssystematik zur Generierung **kostenoptimaler Produktions- und Bevorratungsstrategien** in der Nachserienphase entwickelt und als MS-Excel-basiertes Werkzeug implementiert worden. Schwerpunkte der Entwicklung und Implementierung lagen in der Berücksichtigung von Produktionsstufen, der Analyse und Abbildung verschiedener Alternativen zur Integration von Ersatzteilbedarfen in eine laufende mehrstufige Produktion und einer optimalen Anpassung und Flexibilität der Systematik hinsichtlich den spezifischen Randbedingungen der Produkte und Prozesse.

Auf Basis einer umfassenden Recherche, speziell zu bereits bestehenden Planungsansätzen der Nachserienversorgung, und einer empirischen Erhebung zur Nachserienversorgung in der Industrie, konnten Herausforderungen und Anforderungen zur Gestaltung kostenoptimaler Produktions- und Bevorratungsstrategien in der Nachserienphase systematisch aufgenommen und klassifiziert werden. Die tiefgreifende Analyse der Nachserienversorgung auf Basis der empirischen Erhebung verdeutlichte die Komplexität der im Ersatzteilmanagement untersuchten Aspekte und deren Abhängigkeit von unternehmensspezifischen Größen. Die Planung von Versorgungskonzepten in der Nachserie ist daher unter Berücksichtigung allgemeingültiger produkt- und prozessspezifischer Rahmenbedingungen und Restriktionen vorgenommen worden, die unternehmensspezifisch ausgeprägt werden können (Kontextvariablen). Zudem wurde eine konsequente Zielorientierung in Form der Kostenminimierung (Performancevariablen) zu Grunde gelegt.

Auf Basis des aus Kontext- und Performancevariablen gesteckten Zielsystems wurden Designvariablen identifiziert, die für alle Produktionsstufen eine Generierung und Ausgestaltung von Produktions- und Bevorratungsstrategien ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind die je Produktionsstufe zu realisierenden Losgrößen, die Fertigungszeitpunkte und die je Produktionsstufe einzulagernden Mengen als Designvariablen bestimmt worden. Zur Erfüllung des Zielsystems sind diese Größen kostenoptimal zu gestalten und simultan zu planen, um Interdependenzen zwischen den einzelnen Produktionsstufen zu berücksichtigen. Eine kostenoptimale Gestaltung beruht auf der Berücksichtigung entscheidungsrelevanter Rüst-, Lager- und variabler Produktionskosten, die für den Kontext der Nachserienversorgung detailliert aufgeschlüsselt und in Abhängigkeit der Restriktionen und den Alternativen zur Integration in die laufende Produktion in ihrer Ausprägung differenziert wurden.

Die aufgeführten Aspekte sind als umfassende Planungssystematik zusammengefasst (Kontext-, Performance- und Designvariablen) und als produktionsstufenübergreifende Losgrößenentscheidung in ein mathematisches Modell überführt worden. Das mathematische Modell ist abschließend als MS-Excel-basiertes Werkzeug zur Planung und quantitativen Bewertung von Produktions- und Bevorratungsstrategien implementiert und validiert worden.

Das MS-Excel-basierte Werkzeug ermöglicht folglich die quantitative Bestimmung und Visualisierung optimaler Produktions- und Bevorratungsstrategien auf Basis von je Produktionsstufe zu realisierenden Losgrößen, Fertigungszeitpunkte und den je Produktionsstufe einzulagernden Mengen.

Durch eine Variation dynamischer Parameter, die als Kontextvariablen und folglich als Eingangsgrößen in das Modell eingehen, wie z. B. verschiedene Bedarfsverläufe, können Sensitivitäten der ermittelten Produktions- und Bevorratungsstrategien abgebildet werden. Dieses Vorgehen bietet zudem die Möglichkeit zur rollierenden Planung der Strategien. Unternehmen werden befähigt, die Produktions- und Bevorratungsstrategien dynamisch an die gegebenen Produktionsbedingungen und weiterer sich ändernder Eingangsgrößen anzupassen.

Zum Vergleich der alternativen Integrations- bzw. Produktionsformen können anhand des Modells verschiedenen Szenarien berechnet und abschließend bezüglich der resultierenden Gesamtkosten verglichen und quantitativ bewertet werden.

9 Anhang A

9.1 Fragebogen zur empirischen Erhebung

A.1 Angaben zum Unternehmen und Ihrer Person (optional)

Bitte tragen Sie in das Textfeld Namen, Anschrift und ggf. URL Ihres Unternehmens ein bzw. Ihren Namen, Position und E-Mail Adresse (erforderlich für Zusendung der Ergebnisse).

Angaben zum Unternehmen und Standort	<input style="width: 100%;" type="text"/>
--------------------------------------	---

Angaben zu Ihrer Person	<input style="width: 100%;" type="text"/>
-------------------------	---

A.2 Brancheneinordnung Ihres Unternehmens/Standortes

<input type="checkbox"/>	Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung
<input type="checkbox"/>	Textil- und Bekleidungsgewerbe
<input type="checkbox"/>	Ledergewerbe
<input type="checkbox"/>	Holzgewerbe (ohne Herstellung von Möbeln)
<input type="checkbox"/>	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe
<input type="checkbox"/>	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
<input type="checkbox"/>	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
<input type="checkbox"/>	Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
<input type="checkbox"/>	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
<input type="checkbox"/>	Maschinenbau
<input type="checkbox"/>	Herstellung von Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräten, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik
<input type="checkbox"/>	Fahrzeugbau und Automobilindustrie
<input type="checkbox"/>	Herstellung von Möbeln, Schmuck, Musikinstrumenten, Sportgeräten, Spielwaren, Recycling, Sonstiges

A.3 Anzahl der Beschäftigten Ihres Unternehmens

Bitte geben Sie die Beschäftigtenzahl Ihres Unternehmens an.

<input type="checkbox"/>	bis 9	<input type="checkbox"/>	bis 1000
<input type="checkbox"/>	bis 100	<input type="checkbox"/>	bis 2000
<input type="checkbox"/>	bis 500	<input type="checkbox"/>	über 2000

A.4 Angabe des Jahresumsatzes Ihres Unternehmens

Bitte geben Sie den Gesamtumsatz Ihres Unternehmens an.

<input type="checkbox"/>	bis 1 Million Euro	<input type="checkbox"/>	10 bis 50 Millionen Euro
<input type="checkbox"/>	1 bis 10 Millionen Euro	<input type="checkbox"/>	über 50 Millionen Euro

A.5 Angaben zum Produktportfolio

Bitte tragen Sie den Umfang Ihres Produktportfolios (Anzahl der Produktarten) Ihres Unternehmens bzw. Ihres Standortes in das Textfeld ein.

Umfang des Produktportfolios (Anzahl Produktarten)	<input style="width: 100%;" type="text"/>
--	---

A.6 Nachfragende Branche(n) für die Produkte des Unternehmens

Bitte geben Sie an, welche Branche(n) die Produkte Ihres Unternehmens abnehmen. Unter „Sonstiges“ bitte Zutreffendes eintragen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

<input type="checkbox"/>	Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung
<input type="checkbox"/>	Textil- und Bekleidungsgewerbe
<input type="checkbox"/>	Ledergewerbe
<input type="checkbox"/>	Holzgewerbe (ohne Herstellung von Möbeln)
<input type="checkbox"/>	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe
<input type="checkbox"/>	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
<input type="checkbox"/>	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
<input type="checkbox"/>	Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
<input type="checkbox"/>	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
<input type="checkbox"/>	Maschinenbau
<input type="checkbox"/>	Herstellung von Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräten, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik
<input type="checkbox"/>	Fahrzeugbau und Automobilindustrie
<input type="checkbox"/>	Herstellung von Möbeln, Schmuck, Musikinstrumenten, Sportgeräten, Spielwaren, Recycling
<input type="checkbox"/>	Sonstiges
	<input style="width: 100%;" type="text"/>

B.1 Wie lassen sich Ihre Produkte strukturell charakterisieren? Wie viele Produktionsstufen (Fertigungs- bzw. Montagestufen) sind zur Herstellung erforderlich?

Geben Sie bitte für Ihre Produkte die Anzahl der Produktionsstufen an und nennen Sie Beispiele. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

Produktstruktur	Produktionsstufen	Beispiele für Produkte
<input type="checkbox"/> Einteilige Erzeugnisse (bestehend aus einer Stücklistenposition)	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%; height: 60px;" type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur (bestehend aus 2 bis 199 Stücklistenpositionen)	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%; height: 60px;" type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur (bestehend aus mehr als 200 Stücklistenpositionen)	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%; height: 60px;" type="text"/>

B.2 Beschreiben Sie Ihre Produktion hinsichtlich der Fertigungsart.

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Einzelfertigung (kleinste Mengen individueller Erzeugnisse)
- Kleinserienfertigung (kleine, begrenzte Mengen gleichartiger/individueller Erzeugnisse)
- Großserienfertigung (große, begrenzte Mengen gleichartiger Erzeugnisse)
- Massenfertigung (große Mengen identischer Erzeugnisse)

B.3 Welche Fertigungsablaufart findet sich in Ihrer Produktion wieder?

Sofern abweichend, unter „Sonstige“ zutreffende Ablaufart eintragen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Baustellenfertigung
- Werkstattfertigung
- Gruppenfertigung
- Fließfertigung

Sonstige

B.4 Ist Ihr Unternehmen im Ersatzteilgeschäft tätig?

Bitte geben Sie in den Textfeldern Beispiele an. Wenn Ihr Unternehmen nicht im Ersatzteilgeschäft tätig ist, endet der Fragebogen an dieser Stelle. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Ja, für einteilige Erzeugnisse zum Beispiel
- Ja, für mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur zum Beispiel
- Ja, für mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur zum Beispiel
- Nein

C.1 Über welchen Zeitraum und für welche Produktgruppen wird eine Versorgung mit Ersatzteilen sicher gestellt (C.1.1) bzw. aus welchen Gründen (C.1.2)?

C1.1 Versorgungszeitraum für Ersatzteile. Bitte geben Sie in den Textfeldern die zugehörigen Produktgruppen an. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

bis zu 5 Jahren für folgende Produktgruppen

bis zu 10 Jahren für folgende Produktgruppen

bis zu 15 Jahren für folgende Produktgruppen

bis zu 20 Jahren für folgende Produktgruppen

über 20 Jahre für folgende Produktgruppen

C.1.2 Gründe für eine Ersatzteilversorgung. Unter dem Punkt „Andere Gründe“ bitte Zutreffendes eintragen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Gesetzliche Verpflichtungen
- Vertragliche Nachlieferverpflichtungen
- Stärkung der Kundenbindung
- Nutzen von Umsatzchancen
- Andere Gründe

C.2 In der Literatur werden verschiedene Normstrategien zur Ersatzteilversorgung nach Auslauf der Serienproduktion diskutiert. Welche dieser Normstrategien finden in Ihrem Unternehmen gegebenenfalls Anwendung?

Unter dem Punkt „Andere Strategien“ bitte Zutreffendes eintragen. Falls Ihr Unternehmen nicht nachfertigt, ist Fragenteil D nicht zu beantworten. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- 1) Endbevorratung eines Abschlussloses für kompletten Versorgungszeitraum
- 2) Interne Nachfertigung
- 3) Externe Nachfertigung
- 4) Nutzung kompatibler Teile der Serienproduktion
- 5) Reparatur und Einsatz von Altteilen
- 6) Wiederverwendung von Altteilen
- 7) Andere Strategien

C.3 Werden die zuvor genannten Versorgungsstrategien für einzelne Ersatzteile kombiniert? Wenn ja, in welcher Form erfolgt diese Kombination?

Unter „Andere Form“ bitte zutreffende Kombinationsform eintragen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- a) Ja, über die Versorgungszeit (u. a. Lebenszyklusphasen)
- b) Ja, über Produktionsstufen (u. a. nach Fertigung und Montage differenziert)
- c) Ja, über die prognostizierte Menge (u. a. nach anteiliger Eigenkapazität oder Fremdvergabe)
- d) Ja, über äußere Einflüsse (u. a. Bauteilabkündigungen)
- e) Andere Form
- Nein

C.4 Wenn Sie Konzepte zur Ersatzteilversorgung kombinieren, geben Sie hierzu Beispiele an und über welche Form diese gebildet werden.

Für die Darstellung nutzen Sie bitte die entsprechende Nummerierung aus Frage C.2 bzw. C.3. Wird für einteilige Erzeugnisse bspw. die Kombination von interner Nachfertigung und Reparatur verfolgt, sind im ersten Textfeld die Abkürzungen 2) und 5) einzutragen. Sofern diese Kombination über die Versorgungszeit erfolgt, ist Abkürzung a) zu wählen. Bitte geben Sie ggf. mehrere Möglichkeiten in den Textfeldern an. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

Produktstruktur	Strategiekombination(en)	Kombination erfolgt über
<input type="checkbox"/> Einteilige Ersatzteile	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mehrteilige Ersatzteile mit einfacher Struktur	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mehrteilige Ersatzteile mit komplexer Struktur	<input type="text"/>	<input type="text"/>

D.1 Durch welche Fertigungsart erfolgt die interne Nachfertigung von Ersatzteilen? Werden dabei Produktionsaufträge für Ersatzteile in die laufende Serienproduktion integriert?

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

	Einteilige Erzeugnisse	Mehrteilige Erzeugnisse einfache Struktur	Mehrteilige Erzeugnisse komplexe Struktur	Integration in die Serienproduktion	
				Ja	Nein
Baustellenfertigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Werkstattfertigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Gruppenfertigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fließfertigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

D.2 Welche Produktionsstrategien zur Nachfertigung werden in Ihrem Unternehmen verfolgt?

Sofern abweichend, bitte unter dem Punkt „Andere Strategien“ Zutreffende eintragen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

<input type="checkbox"/>	1) Fertigung nur bei Bedarf
<input type="checkbox"/>	2) Produktion in konstanten Zeitintervallen mit flexibler Losgröße
<input type="checkbox"/>	3) Produktion in flexiblen Zeitintervallen mit fester Losgröße
<input type="checkbox"/>	4) Andere Strategie
	<input type="text"/>

D.3 Werden die zuvor genannten Produktionsstrategien für einzelne Ersatzteile kombiniert? Wenn ja, in welcher Form erfolgt diese Kombination?

Sofern abweichend, bitte unter dem Punkt „Andere Form“ zutreffende Kombinationsform eintragen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

a) Ja, über die Versorgungszeit (u. a. nach Lebenszyklusphasen)

b) Ja, über Produktionsstufen (u. a. nach Fertigung und Montage differenziert)

c) Ja, über die prognostizierte Menge (u. a. nach anteiliger Eigenkapazität oder Fremdvergabe)

d) Ja, über äußere Einflüsse (u. a. Bauteilabkündigungen)

e) Andere Form

Nein

D.4 Wenn Sie Strategien zur Produktion von Ersatzteilen kombinieren, geben Sie bitte hierzu Beispiele an und über welche Form diese gebildet werden.

Nutzen Sie bitte die entsprechende Nummerierung aus Frage D.2 bzw. D.3. Beispiel: Für einteilige Erzeugnisse ist die Strategiekombination 1) - 2) möglich, und diese erfolgt über a) (die Versorgungszeit). Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

Produktstruktur	Strategiekombination(en)	Kombination erfolgt über
<input type="checkbox"/> Einteilige Erzeugnisse	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
<input type="checkbox"/> Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
<input type="checkbox"/> Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>

D.5 Sofern Sie keine unterschiedlichen Produktionsstrategien über Produktionsstufen kombinieren, sehen Sie hierin ein Potenzial für eine kostenoptimale Nachserienversorgung?

Ja

Nein

E.1 Bestehen in Ihrem Unternehmen Bewertungskonzepte, die die Wahl von Strategien zur Nachserienversorgung unterstützen?

Ja, es bestehen Konzepte

Nein, es bestehen keine Konzepte

E.2 Besteht Ihrerseits Interesse an neuen Bewertungskonzepten, die die Wahl von Strategien zur Nachserienversorgung unterstützen?

- Neue Konzepte finde ich interessant
- Neue Konzepte finde ich nicht interessant

E.3 Welche Kriterien führen maßgeblich zur Entscheidung für eine Nachserienproduktion? Geben Sie nach Möglichkeit eigene Beispiele an.

Eine Mehrfachauswahl ist möglich. Unter „Andere Aspekte“ bitte zutreffende Kriterien eintragen. Geben Sie nach Möglichkeit eigene Beispiele in den dafür vorgesehenen Textfeldern an.

<input type="checkbox"/>	Monetäre Aspekte (u. a. Gewinn etc.)	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	Monetär nicht messbare Größen (wie u. a. Flexibilität etc.)	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	Planbare, äußere Einflüsse (u. a. Bauteilabkündigungen etc.)	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	Kundenorientierte Aspekte (u. a. Lieferservice, Durchlaufzeit etc.)	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	Andere Aspekte	<input type="text"/>

Herzlichen Dank für Ihre Teilnahme!

Ich danke Ihnen herzlich, dass Sie sich die Zeit zum Ausfüllen des Fragebogens genommen haben. Für Fragen und weitere Anmerkungen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

9.2 Auswertung der empirischen Erhebung

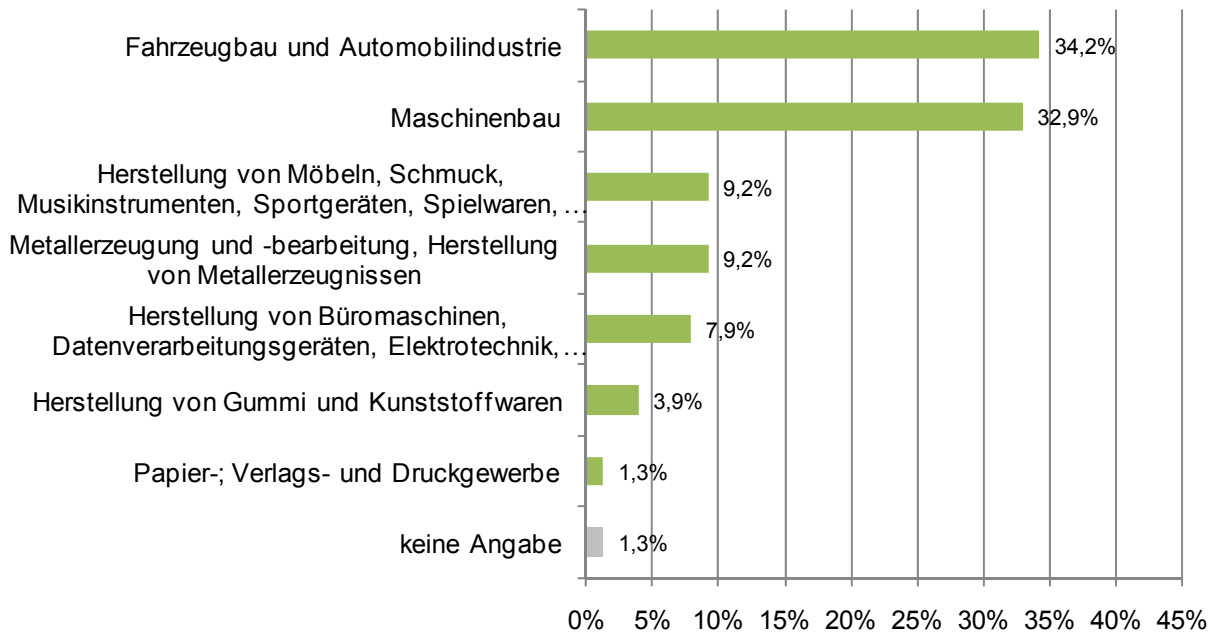


Abbildung 9-1 Nennung der Unternehmensbranche (n=76; a=76)

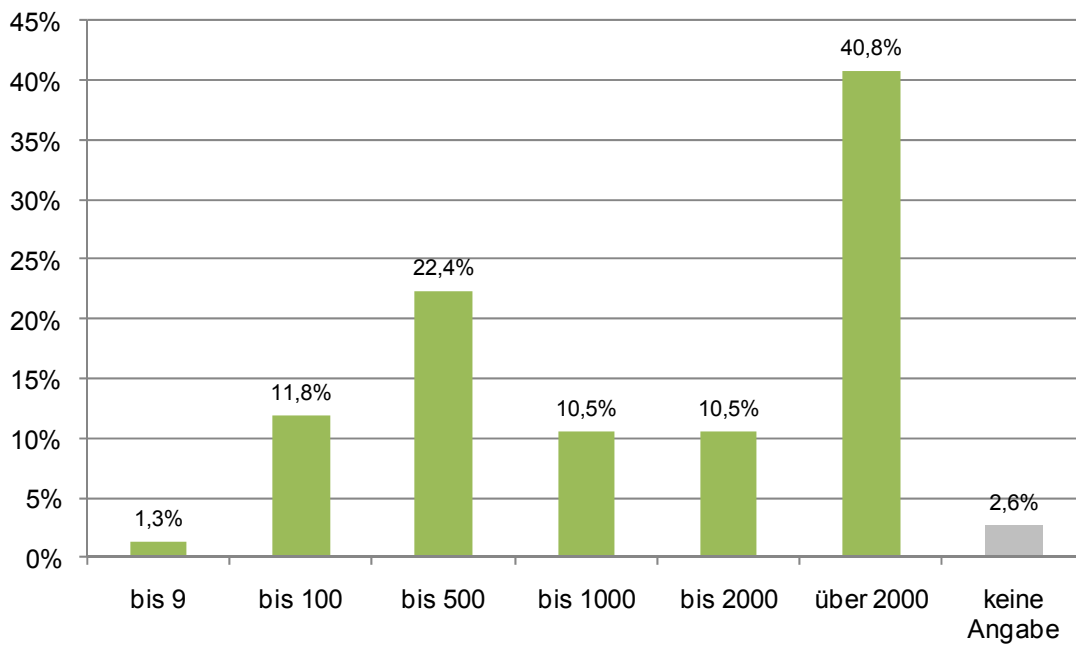


Abbildung 9-2 Mitarbeiterzahl der Unternehmen (n=76; a=76)

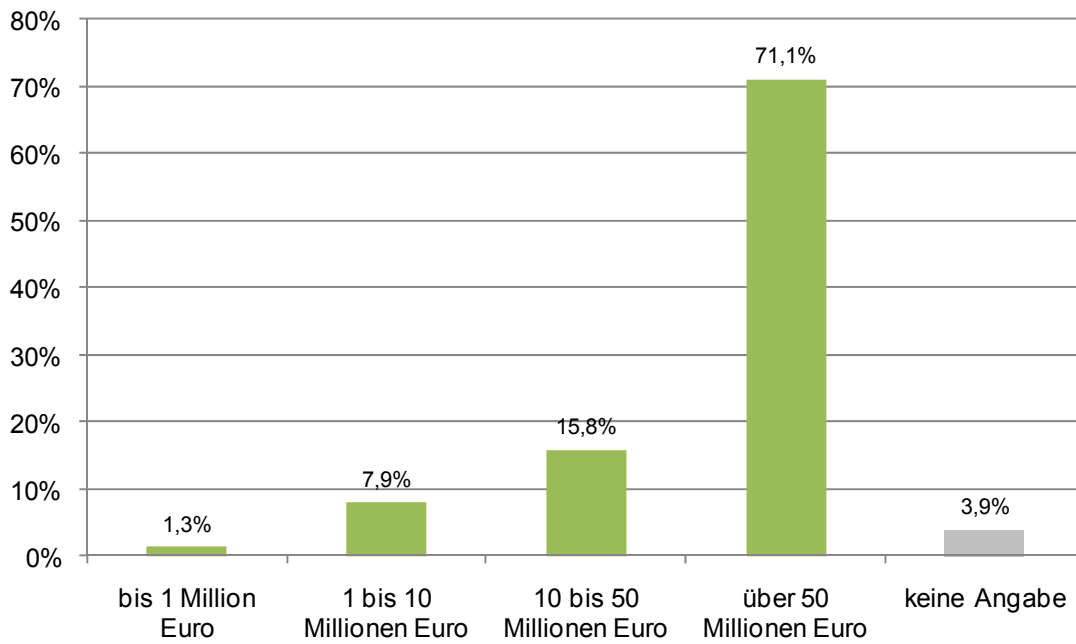


Abbildung 9-3 Jahresumsatz der Unternehmen (n=76; a=76)

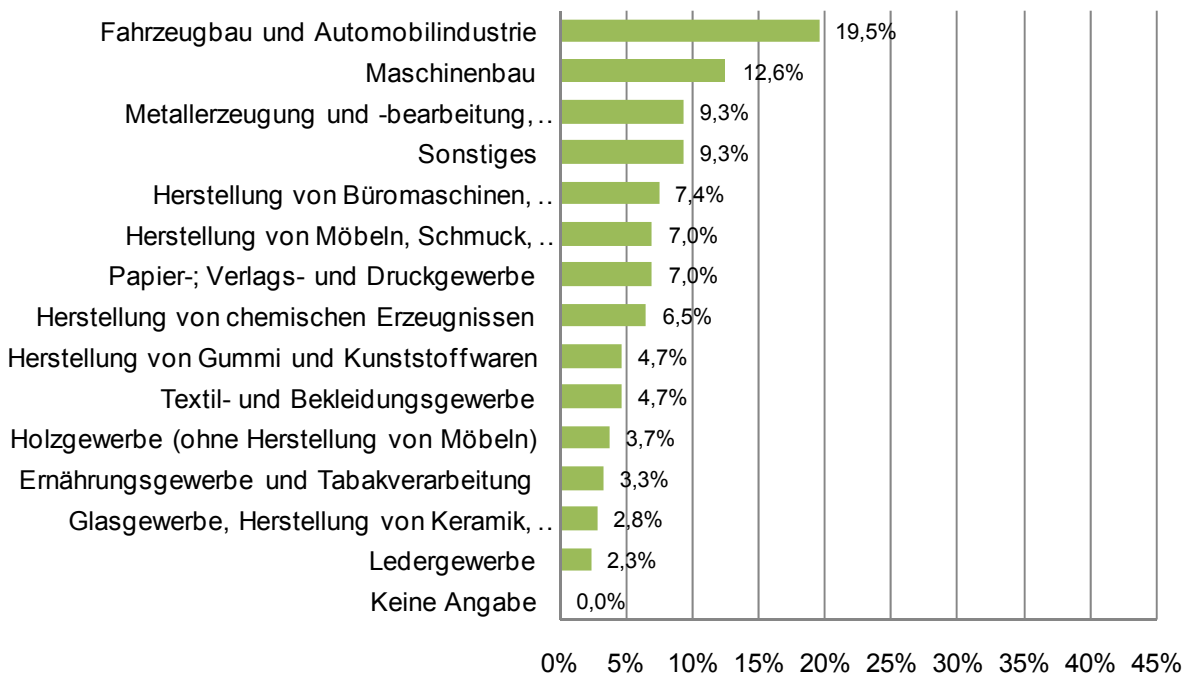


Abbildung 9-4 Zielbranchen der Unternehmen (n=76; a=215)

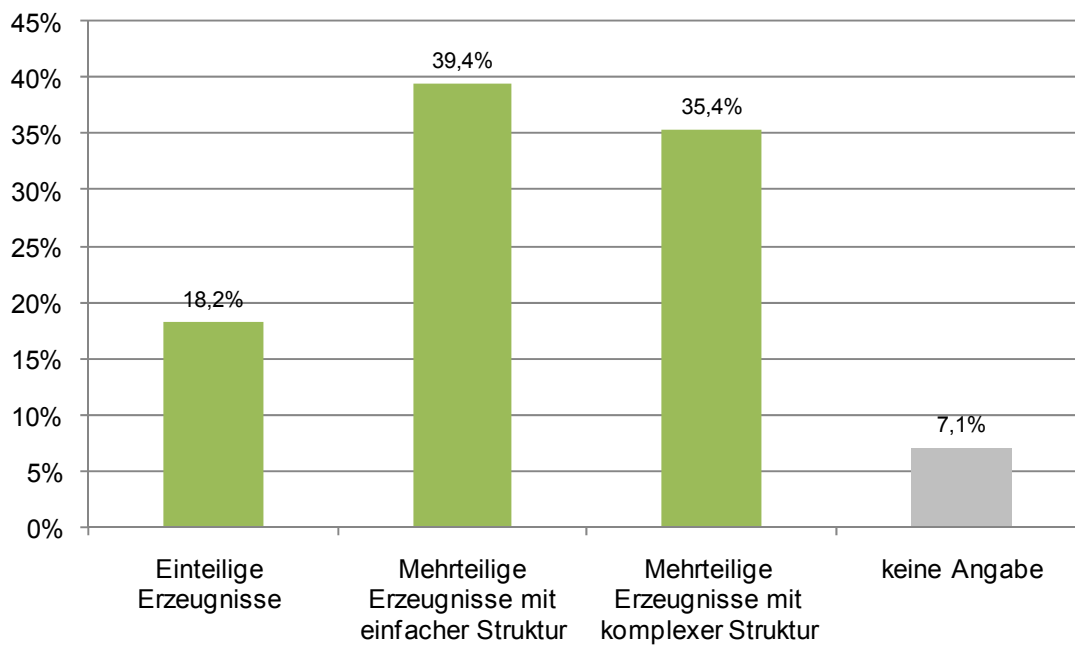


Abbildung 9-5 Produktstruktur der Unternehmen nach Komplexitätsgrad (n=76; a=99)

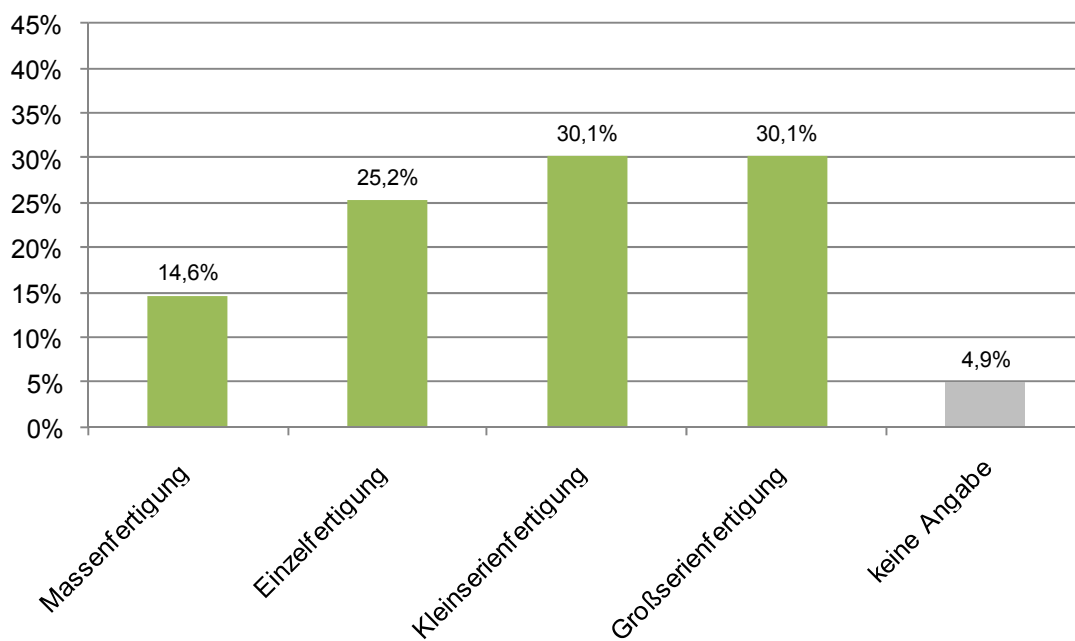


Abbildung 9-6 Fertigungsarten der Unternehmen in der Produktion (n=76; a=105)

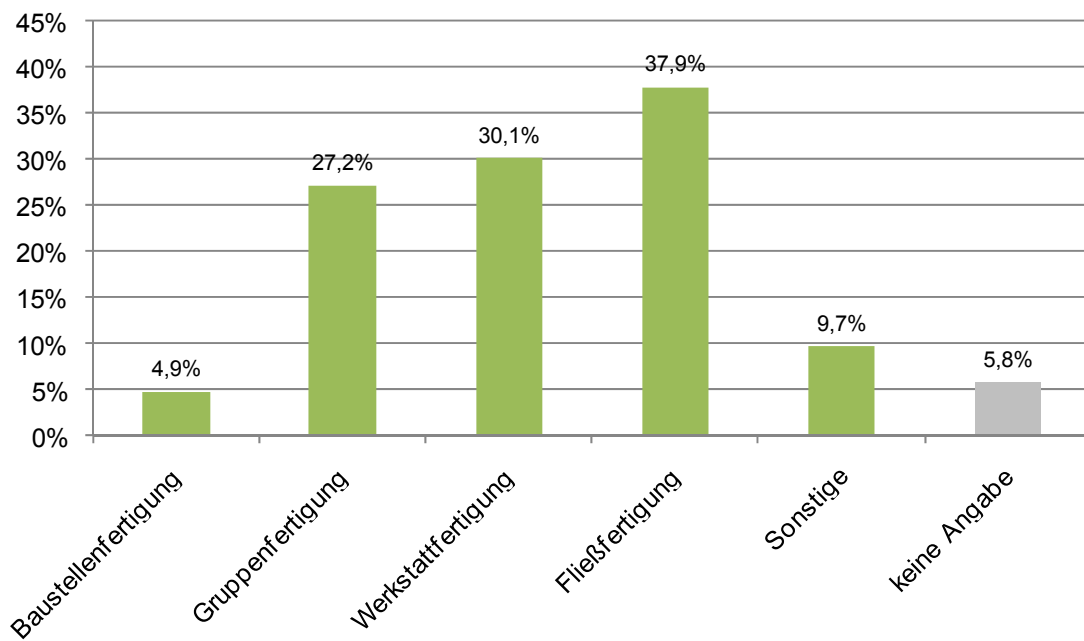


Abbildung 9-7 Fertigungsprinzipien der Unternehmen in der Produktion (n=76; a=113)

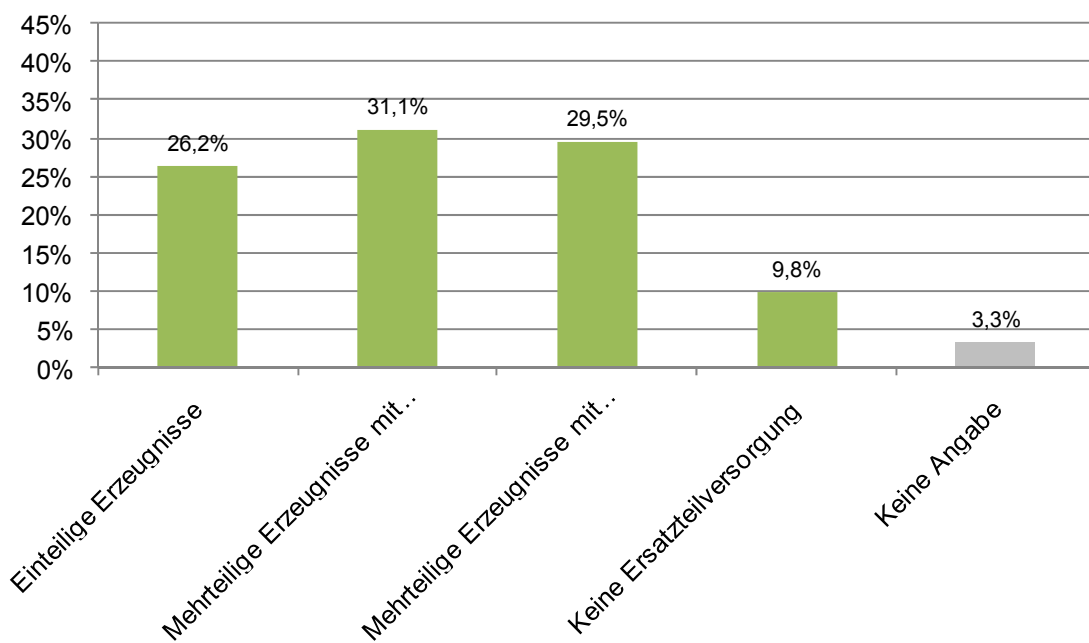


Abbildung 9-8 Ersatzteilversorgung der Unternehmen für Produktstrukturen (n=76; a=122)

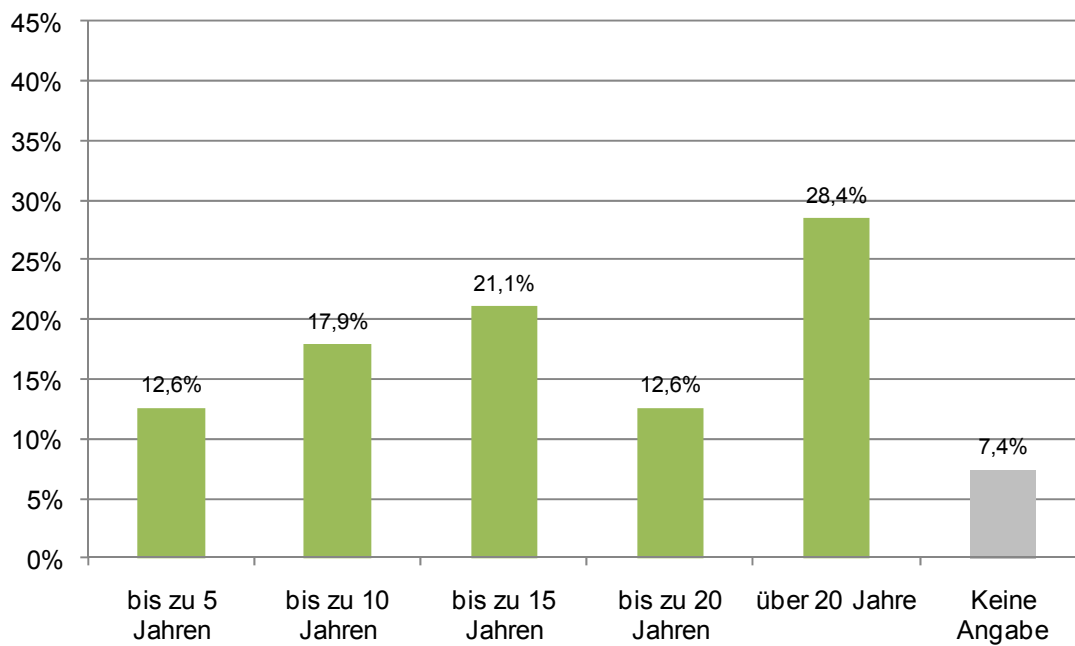


Abbildung 9-9 Zeitraum der Ersatzteilversorgung durch die Unternehmen (n=64; a=95)

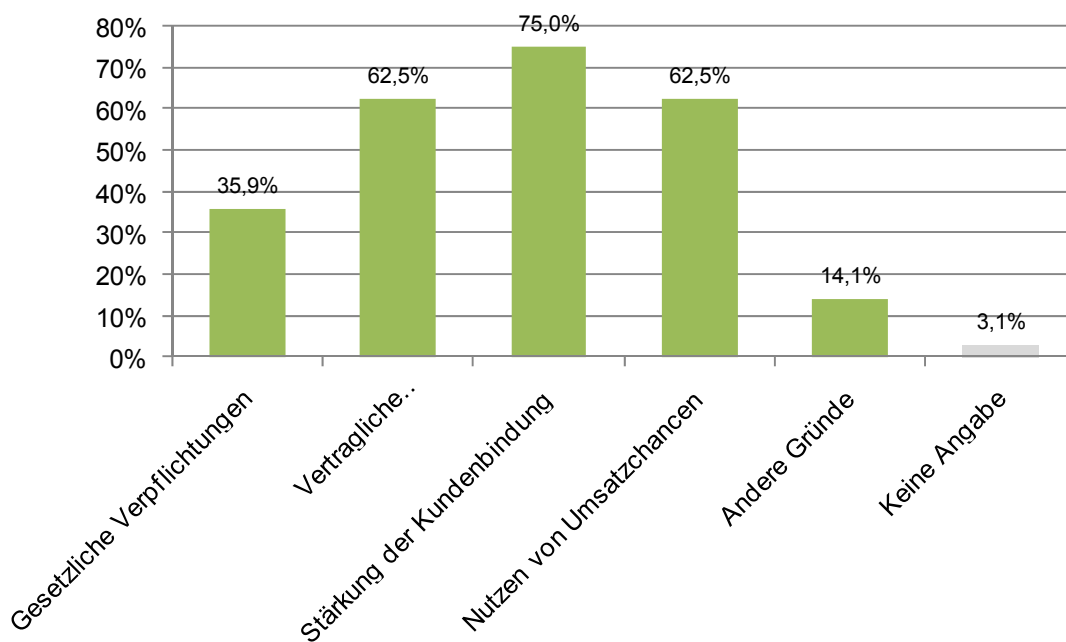


Abbildung 9-10 Gründe der Ersatzteilversorgung durch die Unternehmen (n=64; a=162)

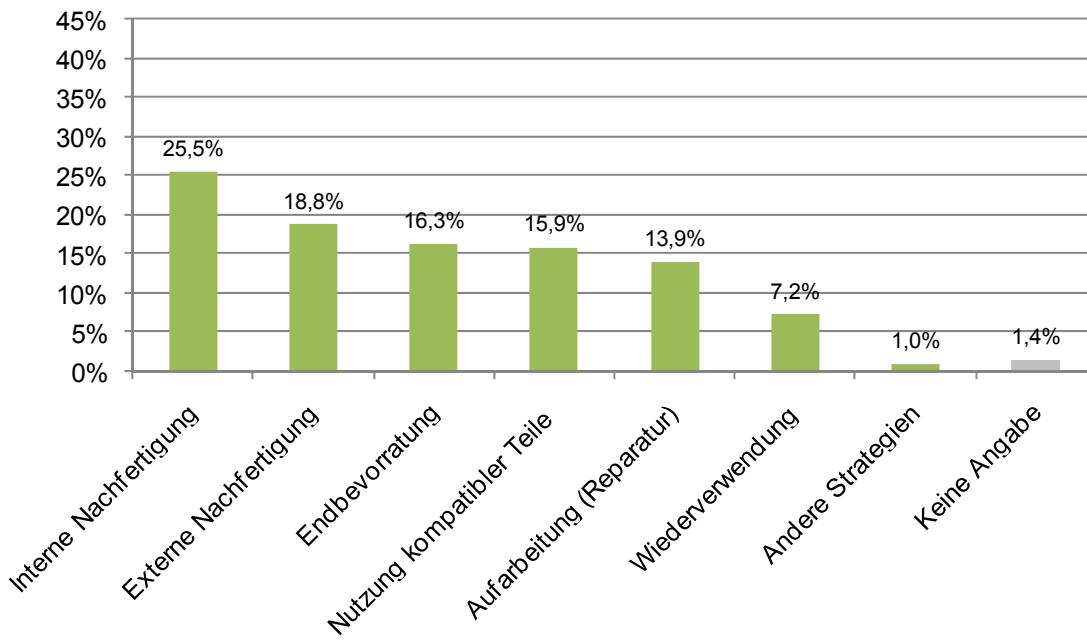


Abbildung 9-11 Verwendung der Normstrategie zur Ersatzteilversorgung durch die Unternehmen (n=64; a=208)

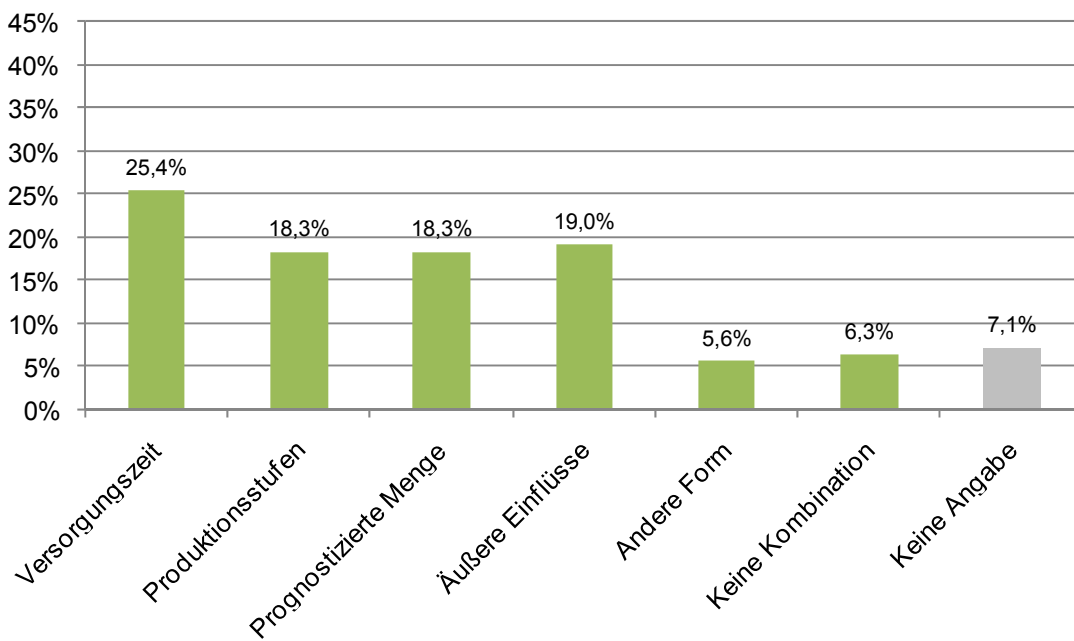


Abbildung 9-12 Von den Unternehmen genutzte Kombinationskriterien zur Versorgungs-Szenarienbildung (n=64; a=126)

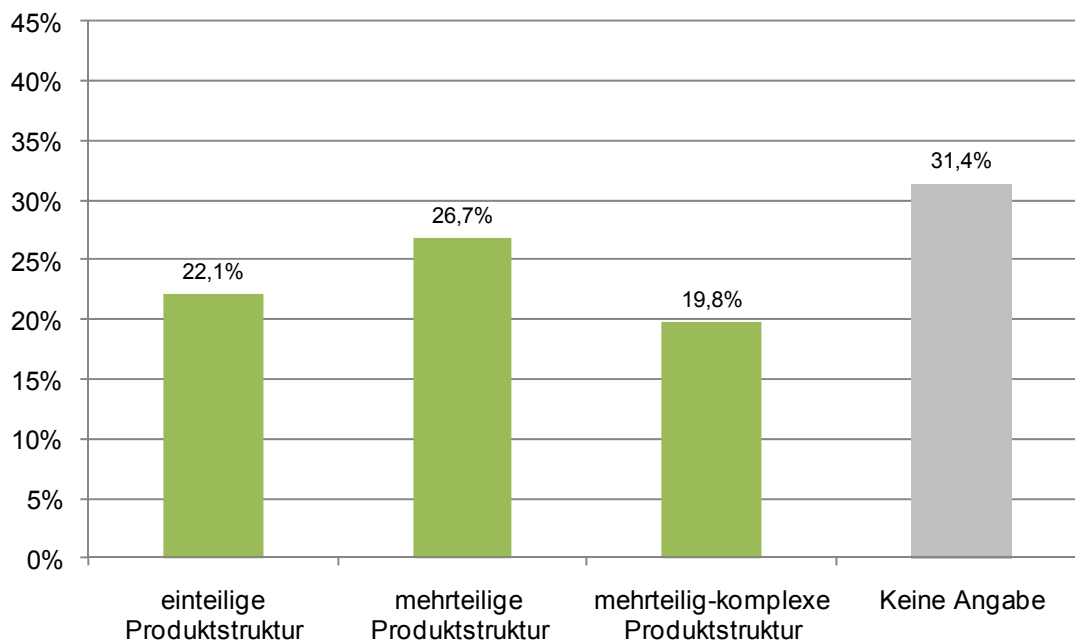


Abbildung 9-13 Produktstrukturen für die von den Unternehmen eine Strategiekombination vorgenommen wird (n=64; a=86)

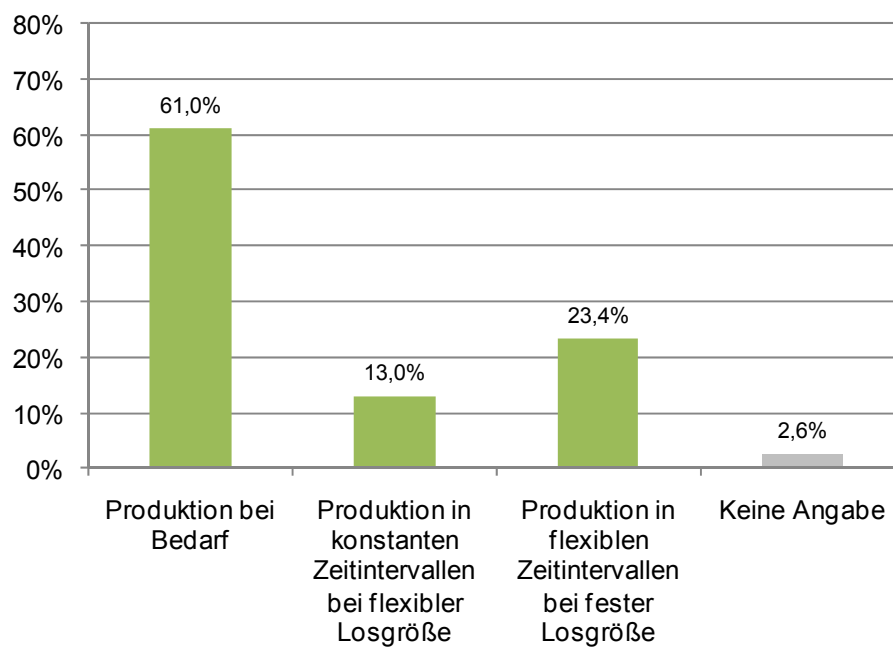


Abbildung 9-14 Umsetzung der internen Nachfertigung durch die Unternehmen (n=53; a=77)

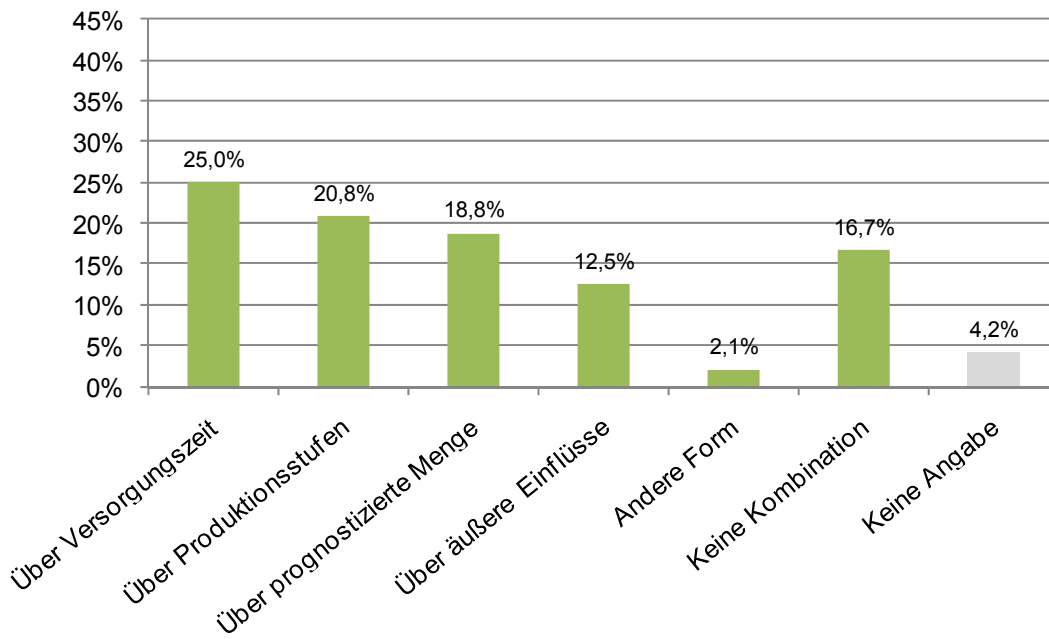


Abbildung 9-15 *Kombinationsansätze der Unternehmen für Produktionsstrategien (n=53; a=96)*

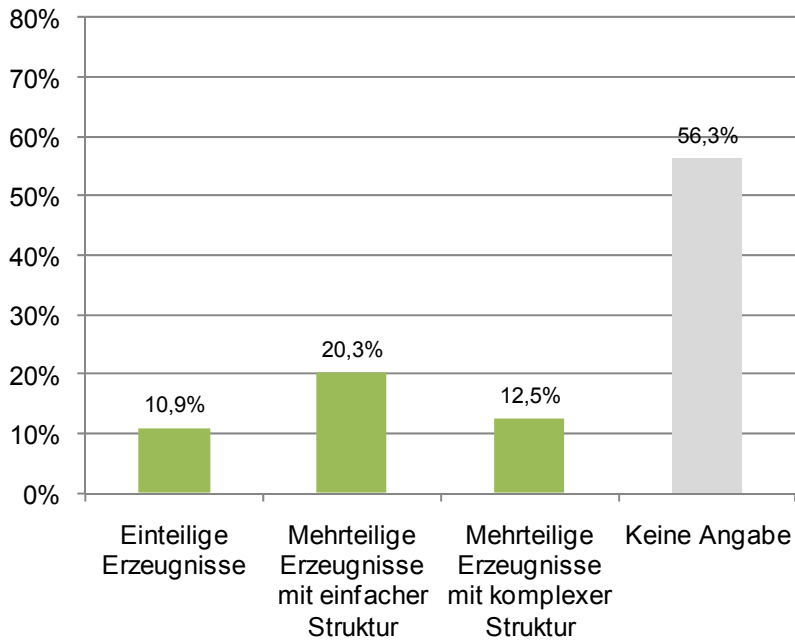


Abbildung 9-16 *Erzeugnisstrukturen für die die Unternehmen Produktionsstrategien kombinieren (n=53; a=64)*

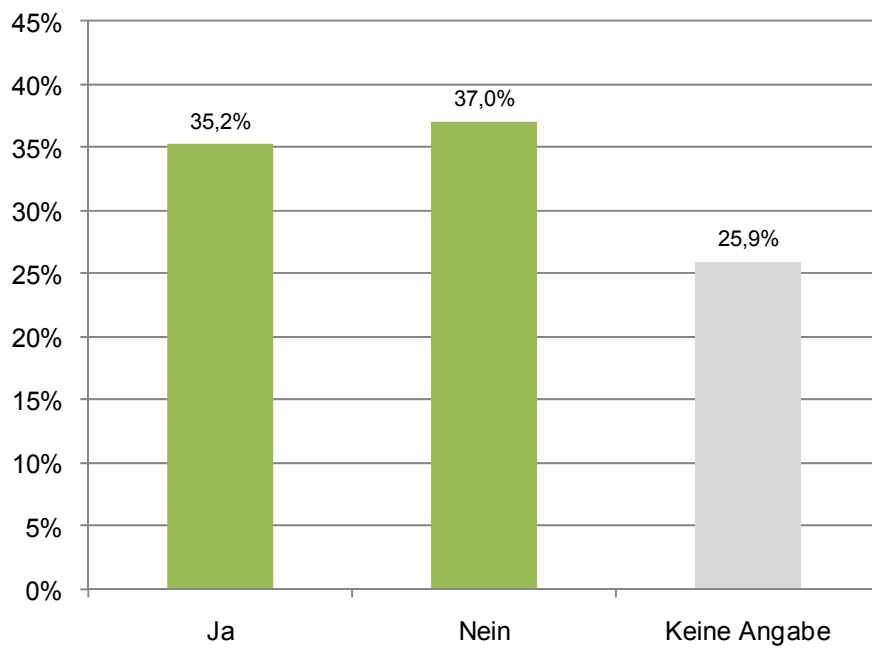


Abbildung 9-17 Aussage der Unternehmen zum Potenzial des Stufenkonzeptes (n=53)

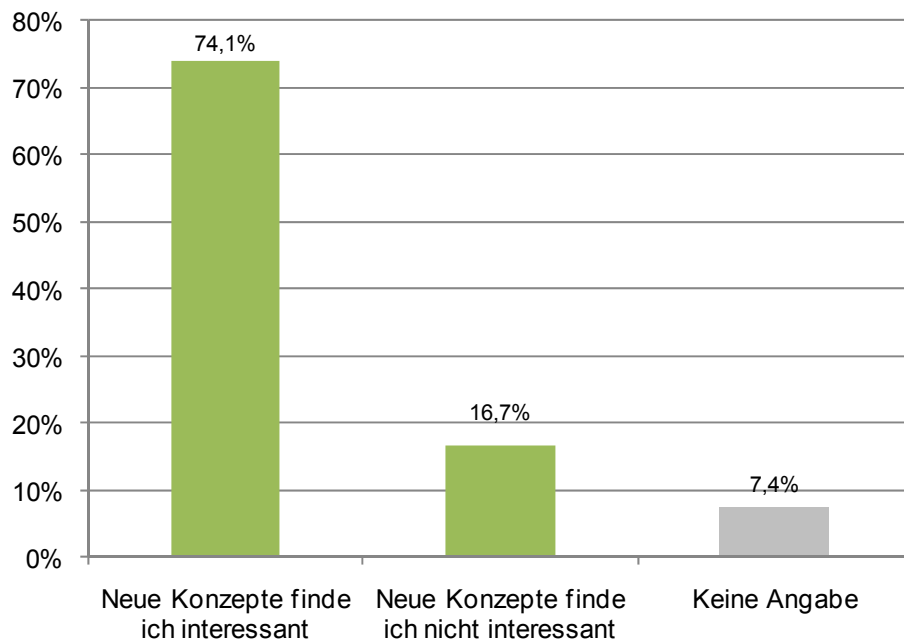


Abbildung 9-18 Aussage über das Bestehen von Bewertungskonzepten von Nachserienversorgung in den Unternehmen (n=53)

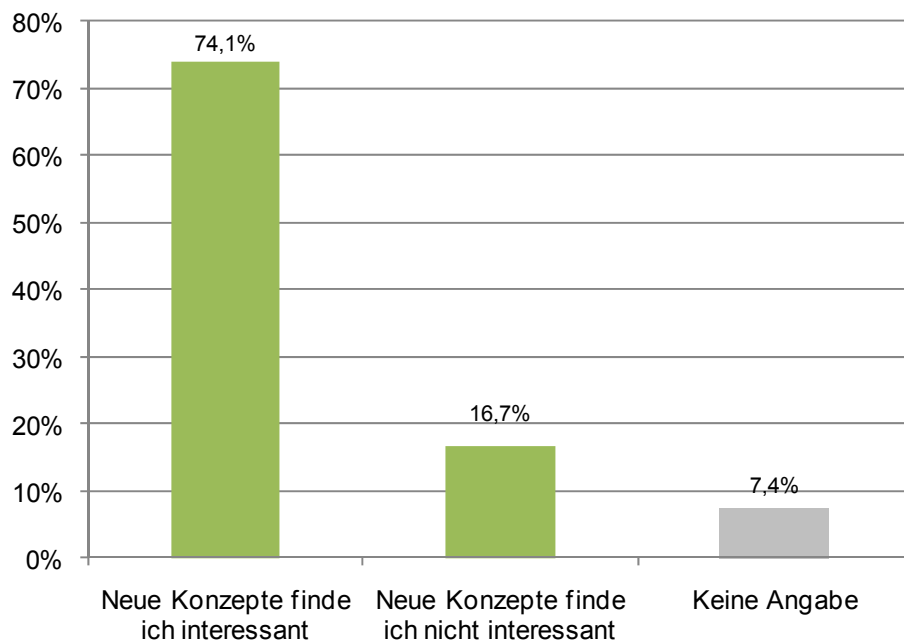


Abbildung 9-19 *Interesse der Unternehmen an neuen Bewertungskonzepten der Nachserienversorgung (n=53)*

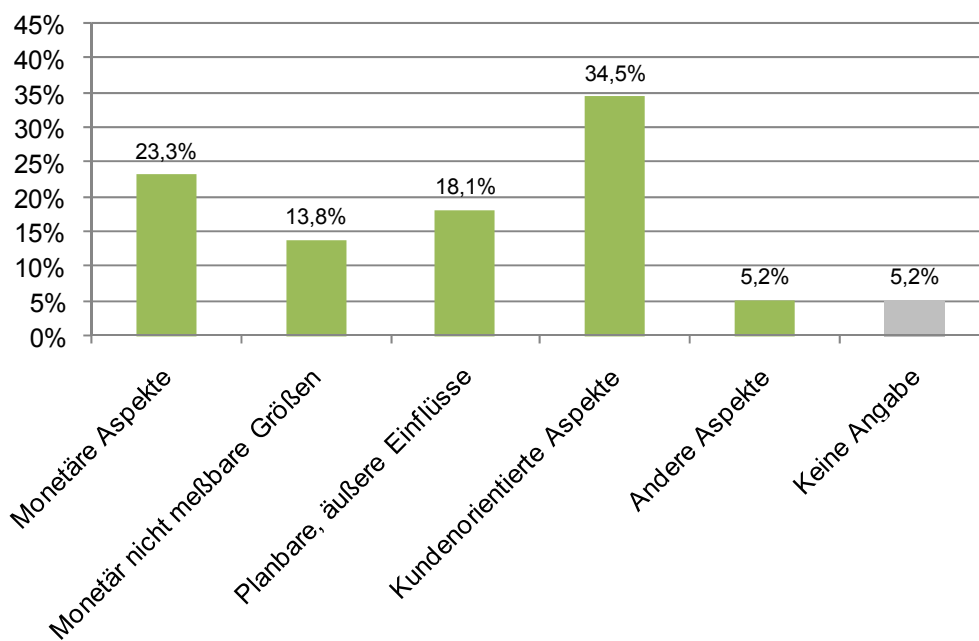


Abbildung 9-20 *Bewertungskriterien der Unternehmen bei der Strategiewahl in der Nachserienproduktion (n=53; a=116)*

10 Literaturverzeichnis

ANDLER, Kurt: *Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgrösse*. München : R. Oldenbourg, 1929

ARGONNE NATIONAL LABORATORY: *NEOS : Server for Optimization*. URL <http://www-neos.mcs.anl.gov/>

BARKAWI, Karim (Hrsg.); BAADER, Andreas (Hrsg.); MONTANUS, Sven (Hrsg.): *Erfolgreich mit After Sales Services : Geschäftsstrategien für Servicemanagement und Ersatzteillogistik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006

BAUMANN, Siegfried ; HÖFFERER, Stefan ; MATAUSCHEK, Johann: *Obsolescence Management : Lösungsansätze zur Sicherstellung der Langzeitverfügbarkeit von elektronischen Ersatzteilen in der Automobilindustrie*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (2008), 1-2, S. 59-64

BENKER, Hans: *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen : Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von Mathematica, Maple, Mathcad, Matlab und Excel*. Berlin : Springer, 2003

BIEDERMANN, Hubert: *Ersatzteilmanagement : Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen*. Berlin : Springer, 2008

BOCHOW-NEß, Olaf: *Zustandsüberwachung mit Monitorstrukturen*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL <http://www.reecar.org/servlet/is/951/>

BÖCKHORST, Stephan: *Zustandsuntersuchung gebrauchter Steuergeräte aus dem Fahrzeuginnenraum*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL <http://www.reecar.org/servlet/is/951/>

BOTHE, Tim: *Planung und Steuerung der Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienfertigung*. Zugl. Dissertation Universität. Aachen 2003. Aachen : Shaker, 2003 (Schriftenreihe des IFU 7)

CANTNER, Uwe ; HANUSCH, Horst ; KRÜGER, Jens: *Produktivitäts- und Effizienzanalyse : Der nichtparametrische Ansatz*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007

CORSTEN, Hans: *Produktionswirtschaft : Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. 11. Aufl. München : Oldenbourg, 2007 (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre)

DEKKER, R. ; KLEINJIN, M.J. ; DE ROOIJ, P.J.: *A spare parts stocking policy based on equipment criticality*. In: *International Journal of production economics* 56-57 (1998), S. 69-77

DEMPE, Stephan ; SCHREIER, Heiner: *Operations Research : Deterministische Modelle und Methoden*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2006

DERSTROFF, Matthias C.: *Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen*. Zugl. Dissertation Universität Braunschweig 1994. Heidelberg : Physica, 1995 (Produktion und Logistik)

DIN 24420 Teil 1: *Ersatzteillisten*. Berlin : Beuth, 1976

DIN 31051: *Grundlagen der Instandhaltung* Berlin : Beuth, 2003

DOMBROWSKI, Uwe: Ersatzteilmanagement in der industriellen Praxis : Vergangenheitsbewältigung und Zukunftsgestaltung. In: *Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement : Problemfeld Elektronik von der Entwicklung bis zum Auslauf* branchenübergreifende Konzepte. Tagung Leonberg/Stuttgart, 22. und 23. Juni 2004. Düsseldorf : VDI Verlag, 2004 (VDI-Berichte, 1848), S. 13-31

DOMBROWSKI, Uwe ; BOTHE, Tim: *Ersatzteilmanagement : Strategien für die Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienproduktion*. In: *wt Werkstattstechnik online* 91 (2001), Nr. 12, S. 792-796

DOMBROWSKI, Uwe ; BOTHE, Tim: Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement für die Nachserienversorgung. In: DECKER, J. (Hrsg.): *Wissenschaftssymposium Logistik der BVL 2002. Dokumentation Magdeburg (26.-27.06.2002)*. München : Huss, 2002

DOMBROWSKI, Uwe ; BOTHE, Tim: *Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienfertigung*. In: *Industrie Management* 4 (2003), Nr. 19, S. 19-22

DOMBROWSKI, Uwe ; HORATZEK, Sascha ; WREHDE, Johannes: *Der Weg zu einem lebenszyklusorientierten Ersatzteilmanagement Teil I: Zukunftsgestaltung*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (2005a), Nr. 3, S. 125-129

DOMBROWSKI, Uwe ; HORATZEK, Sascha ; WREHDE, Johannes: *Der Weg zu einem lebenszyklusorientierten Ersatzteilmanagement Teil II: Vergangenheitsbewältigung*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (2005b), Nr. 4, S. 197-201

DOMBROWSKI, Uwe ; LEICHNITZ, Henning: *Portfoliodarstellung im Obsolescence Management : Abbildung von Produktportfolios im Rahmen des Obsolescence Management von Produkten*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (2008), Nr. 6, S. 422-427

DOMBROWSKI, Uwe ; QUANTSCHNIG, Martin: *Potential der lebenszyklusorientierten Planung im Ersatzteilmanagement*. In: *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007), 7/8, S. 567-571

- DOMBROWSKI, Uwe ; SCHULZE, Sven: *Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement : Neue Herausforderungen durch innovationsstarke Bauteile in langlebigen Primärprodukten*. In: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik* (2008a), S. 439-462. - Aktualisierungsdatum: 2008-01-01
- DOMBROWSKI, Uwe ; SCHULZE, Sven: *Repair of Automotive Electronics as a Module of Life-Cycle-orientated Spare Parts Management*. International Conference on Life Cycle Engineering, (LCE 2008), Sydney, Australien, 17.-19.03.2008. In: *Proceedings of the 15th CIRP* (2008b), S. 464-469
- DOMBROWSKI, Uwe ; WECKENBORG, Sebastian: *Outsourcing von Elektronikkomponenten in der Nachserienversorgung*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009), Nr. 11, S. 954-959
- DOMBROWSKI, Uwe ; WREHDE, Johannes ; SCHULZE, Sven: *Efficient Spare Part Management to Satisfy Customers Need*. URL
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4383933>
- DOMSCHKE, Wolfgang ; DREXL, Andreas: *Einführung in Operations Research*. 6. Aufl. Berlin : Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch)
- DOMSCHKE, Wolfgang ; SCHOLL, Armin: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre : Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*. 3. Aufl. Berlin : Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch)
- DYCKHOFF, Harald: *Produktionstheorie : Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006 (Springer-Lehrbuch)
- ESTER, Birgit: *Benchmarks für die Ersatzteillogistik : Benchmarkingformen, Vorgehensweise, Prozesse und Kennzahlen*. Zugl. Dissertation TH Darmstadt 1997. Berlin : Schmidt, 1997 (Unternehmensführung und Logistik 13)
- EVERSHEIM, Walter: *Fertigung und Montage*. 2. Aufl., 1989 (Studium und Praxis)
- FINKENWIRTH, André: *Ersatzteildisposition in der Automobilindustrie mit einem System-Dynamics-Lagerhaltungsmodell*. Pfaffenweiler : Centaurus, 1993
- FORTUIN, Leonard: *The All-Time Requirement of Spare Parts for Service After Sales : Theoretical Analysis and Practical Results*. In: *International Journal of Operations & Production Management* 1 (1980), Nr. 1, S. 59-70.
- FRIEDRICHS, A.: *Anforderungen an die Produktgestaltung aus Sicht der Langzeitversorgung*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL
<http://www.reecar.org/servlet/is/951/>
- FRONTLINE SYSTEMS INC.: *Interner Excel Solver*. URL <http://www.solver.com/>

GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Stichwort: entscheidungsorientierte Kostenrechnung*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/5956/entscheidungsorientierte-kostenrechnung-v4.html> - Überprüfungsdatum 2010-05-07

GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Stichwort: Lagerkosten*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/11386/lagerkosten-v5.html> - Überprüfungsdatum 2010-05-03

GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Stichwort: Logistikkosten*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55882/logistikkosten-v4.html> - Überprüfungsdatum 2010-05-03

GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Stichwort: Opportunitätskosten*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6755/opportunitaetskosten-v5.html> - Überprüfungsdatum 2010-05-14

GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Stichwort: Produktionskosten*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/14291/produktionskosten-v5.html> - Überprüfungsdatum 2010-05-12

GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Stichwort: Relevante Kosten, online im Internet*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/5957/relevante-kosten-v4.html> - Überprüfungsdatum 2010-05-14

GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK, MATERIALFLUSS UND LOGISTIK: *Effiziente Ersatzteil-Logistik*. Tagung Kassel, 11. und 12. Oktober 2000. Düsseldorf : VDI-Verl., 2000 (VDI-Berichte 1573)

GLASER, Horst ; GEIGER, Werner: *PPS - Produktionsplanung und -steuerung : Grundlagen - Konzepte - Anwendungen*. 2. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 1992

GÖTZE, Uwe: *Kostenrechnung und Kostenmanagement*. 4. Aufl. Berlin : Springer, 2007 (Springer-Lehrbuch)

GÖTZE, Uwe: *Kostenrechnung und Kostenmanagement*. 5. Aufl. Berlin : Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch)

GRAF, René: *Erweitertes Supply-chain-Management zur Ersatzteilversorgung*. Essen : Vulkan, 2005

HAGEN, Markus: *Methoden, Daten- und Prozessmodell für das Ersatzteilmanagement in der Automobilelektronik*. Dissertation, 2003

HARRIS, Ford W.: *How Many Parts to Make at Once Factory*. In: *The Magazine of Management* 10 (1913), Nr. 2, S. 135 ff.

HESSELBACH, Jürgen ; HERRMANN, C. ; GRAF, René ; MANSOUR, M.: Life Cycle Management als Ansatz für eine flexible Gestaltung der Ersatzteilversorgung. In: *Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement : Problemfeld Elektronik von der Entwicklung bis zum Auslauf branchenübergreifende Konzepte*. Tagung Leonberg/Stuttgart, 22. und 23. Juni 2004. Düsseldorf : VDI Verlag, 2004 (VDI-Berichte, 1848), S. 87-95

HESSELBACH, Jürgen ; MANSOUR, Markus ; GRAF, René: Reuse of components for the spare part management in the automotive electronics industry after end-of-production. In: FELDMANN, Klaus (Hrsg.): *Integrated product policy - chance and challenge : Proceedings of the 9th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering, Erlangen, Germany, April, 09. - 10. 2002*. Bamberg : Meisenbach, 2002, S. 191-197

HOHAUS, Christian ; STOBBE, Irina: *Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL <http://www.reecar.org/servlet/is/951/>

HOMBURG, Christian: *Quantitative Betriebswirtschaftslehre : Entscheidungsunterstützung durch Modelle ; mit Beispielen, Übungsaufgaben und Lösungen*. 3. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2000 (Gabler-Lehrbuch)

HORNGREN, Charles T. ; FOSTER, George ; DATAR, Srikant M. ; KLEBER, Michaela I.: *Kostenrechnung : Entscheidungsorientierte Perspektive*. 9. Aufl. München : Oldenbourg, 2001 (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)

HÜLSMANN, Jochen: *Einführung in die Wirtschaftsmathematik*. 4. Aufl. Berlin : Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch)

IHDE, G. B. ; MERKEL, H. ; HENNING, R.: *Ersatzteillogistik. Theoretische Grundlagen und praktische Handhabung*. 3. Aufl. München : Huss, 1999

IHDE, Gösta ; LUKAS, Gernot ; MERKEL, Helmut ; UNSHELM, Karl: *Ersatzteil-Logistik : Grundlagen und empirische Ergebnisse*. Düsseldorf : Verkehrs-Verlag J. Fischer, 1980

IHME, Joachim: *Logistik im Automobilbau : Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*. München : Hanser, 2006

INDERFURTH, Karl ; KLEBER, Rainer: *Modellgestützte Flexibilitätsanalyse von Strategien zur Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase*. Magdeburg, 2008

INDERFURTH, Karl ; MUKHERJEE, Kampan: *Decision support for spare parts acquisition in post product life cycle*. In: *Central European Journal of Operations Research* 16 (2008), Nr. 1, S. 17-42

- JOSSÉ, Germann: *Basiswissen Kostenrechnung : Kostenarten, Kostenstellen, Kostenträger, Kostenmanagement*. 5. Aufl. München : Dt. Taschenbuch, 2008 (dtv Beck-Wirtschaftsberater im dtv 50811)
- KAERGER, Wolfgang: *Elektronische Baugruppen aus Altfahrzeugen : Gewinnung und Beschaffung über Demontagebetriebe*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL <http://www.reecar.org/servlet/is/951/>
- KIENER, Stefan: *Produktions-Management : Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung*. 8. Aufl. München : Oldenbourg, 2006
- KNIGGE, Jens ; ROSENTRITT, Caroline: *Systematische Auswahl und Anpassung von Strategien zur Ersatzteil-Bedarfsdeckung*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009), Nr. 12, S. 1147-1150
- KNODE, Martin Dipl.-Ing.: *Demontage von elektronischen Baugruppen aus ELV*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL <http://www.reecar.org/servlet/is/951/>
- LOUKMDIS, Georgios ; MEYER, Jan Christoph: *ET-Versorgung: Effiziente Disposition im Ersatzteilmanagement : Entscheidungsmodell für differenzierten Einsatz von Prognosestrategien im Lebenszyklus der Ersatzteilversorgung*. In: *Unternehmen der Zukunft* (2006)
- MARTI, Kurt ; GRÖGER, Detlef: *Einführung in die lineare und nichtlineare Optimierung*. Heidelberg : Physica, 2000 (Physica-Lehrbuch)
- MEERS, Michael ; RICHTER, Michael ; NICKEL, Rouven: *Losgrößenbestimmungsverfahren: Stand der Technik und Entwicklungsbedarf*. In: *PRODUCTIVITY Management* 14 (2009), Nr. 4, S. 50-54
- MEIDLINGER, Andreas: *Dynamisierte Bedarfsprognose für Ersatzteile bei technischen Gebrauchsgütern*. Frankfurt am Main, Serlin, Sern, New York, Paris, Wien : Europäischer Verlag der Wissenschaften Peter Lang, 2004 (Reihe V Volks- und Betriebswirtschaft 1536)
- MEIFARTH, Uwe ; WEBER, Björn ; BAUER, Andreas: *Ersatzteilmanagement elektronischer Bauteile - Randbedingungen und Anforderungen in der Zivilluftfahrt*. In: *Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement : Problemfeld Elektronik von der Entwicklung bis zum Auslauf branchenübergreifende Konzepte*. Tagung Leonberg/Stuttgart, 22. und 23. Juni 2004. Düsseldorf : VDI Verlag, 2004 (VDI-Berichte, 1848), S. 37-57
- MENTE, T. ; KLEIKEMPER, V. ; ERNST, Ch.: *Zustandsidentifikation langzeitgelagerter und gebrauchter Steuergeräte mit dem Ziel der Wiederverwendung*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008

- MERGENTHALER, W. ; LAMPE, G.: *Zufälle kalkulieren*. In: *Automobilproduktion B 30470* (2001)
- MERTENS, Peter (Hrsg.); RÄSSLER, Susanne (Hrsg.): *Prognoserechnung*. 6. Aufl. Heidelberg : Physica, 2005 (Springer-11775 /Dig. Serial])
- MÉSZÁROS, Csaba: *BPMPD : Solver for Optimization* URL <http://www.sztaki.hu/~meszaros/bpmpd/>
- MÜLLER, David: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (Springer-Lehrbuch)
- OBERENDER, Christof Dr.-Ing.: *Nachhaltigkeit von Ersatzteilstrategien und Entscheidungsfindung*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL <http://www.reecar.org/servlet/is/951/>
- OBERENDER, Christof Dr.-Ing.: *ReECar - Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik*. Abschlusspräsentation des Verbundprojekts ReECar Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Gebrauchtteilen in der Kfz-Elektronik Dortmund, 13. November 2008. URL <http://www.reecar.org/servlet/is/951/>
- OPERATING SYSTEM LABORATORY: *LPabo : Solver for Optimization*. URL <http://oslab.snu.ac.kr/>
- PAULI, Bernhard: *Zuverlässigkeitsprognosen für elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug : Modellbildungen und deren praktische Anwendungen*. Zugl. Dissertation Wuppertal 1997. Aachen : Shaker, 1998 (Berichte aus der Fahrzeugtechnik)
- PEPELS, Werner ; ARETZ, Wera: *Marktforschung : Organisation und praktische Anwendung*. 2. Aufl. Düsseldorf : Symposion Publ., 2008
- PFOHL, Hans-Christian: *Logistiksysteme : Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8. Aufl. Berlin : Springer, 2010
- PLINKE, Wulff ; RESE, Mario: *Industrielle Kostenrechnung : Eine Einführung*. 7. Aufl. Berlin : Springer, 2006
- PRASAD, P. S. S. ; KRISHNAIAH, O. V.: *Multilevel Lot Sizing with a Genetic Algorithm Under Fixed and Rolling Horizons*. In: *Advanced Manufacturing Technology* (2001), Nr. 7, S. 520-527
- ROSSI, Hanjo: *Ein heuristisches Dekompositionsverfahren für mehrstufige Losgrößenprobleme*. Zugl. Dissertation Universität Berlin, 2003
- SCHRÖDER, Michael: Einführung in die kurzfristige Zeitreihenprognose und Vergleich der einzelnen Verfahren. In: MERTENS, Peter; RÄSSLER, Susanne (Hrsg.): *Prognoserechnung*. 6. Aufl. Heidelberg : Physica, 2005 (Springer-11775 /Dig. Serial]), S. 7-37

- SCHRÖTER, Marcus: *Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains : Ein systemdynamischer Ansatz*. 1. Aufl. Wiesbaden : Dt. Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006
- SCHRÖTER, Marcus ; SPENGLER: *Strategic Management of Spare Parts in Closed-loop Supply Chains : A System Dynamics Approach*. In: *INTERFACES - An International Journal of INFORMS* 33 (2003), Nr. 6, S. 7-17
- SCHUH, Günther ; SCHMIDT, Carsten: *Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung : Prozesse*. In: SCHUH, Günther (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung : Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3., völlig neu bearb. Aufl. Berlin : Springer, 2006 (VDI-/Buch]), S. 108-194
- STARK, Martin: *Die Gestaltung der Aufbauorganisation als Schlüssel zu einer effizienten Langzeitversorgung*. In: *Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement : Problemfeld Elektronik von der Entwicklung bis zum Auslauf branchenübergreifende Konzepte*. Tagung Leonberg/Stuttgart, 22. und 23. Juni 2004. Düsseldorf : VDI Verlag, 2004 (VDI-Berichte, 1848), S. 145-160
- SUHL, Leena ; MELLOULI, Taïeb: *Optimierungssysteme : Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. 2. Aufl. Dordrecht : Springer, 2009 (Springer-Lehrbuch)
- TEMPELMEIER, Horst: *Resource-constrained materials requirements planning - MRP rc*. In: *Production Planning & Control* 8 (1997), Nr. 5, S. 451-461
- TEMPELMEIER, Horst: *Material-Logistik : Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006
- TEMPELMEIER, Horst ; DERSTROFF, Matthias: *Mehrstufige Mehrprodukt-Losgrößenplanung bei beschränkten Ressourcen und genereller Erzeugnisstruktur*. In: *OR Spektrum* (1993), Nr. 15, S. 63-73
- TEUNTER, Ruud ; FORTUIN, Leonard: *End-of-life service : A case study*. Eindhoven NL, 1997
- VDA-AUSSCHUSS AFTERMARKET: *Präsentation der Arbeitsergebnisse : Nachserienversorgung (Elektronik)*. 2006
- VOIGT, Kai-Ingo: *Industrielles Management : Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008 (Springer-Lehrbuch)
- Voss, Holger: *Life Cycle Logistics : Der Weg zur produktlebenszyklusorientierten Ersatzteillogistik*. Zugl. Dissertation Universität Erlangen Nürnberg 2006. 1. Aufl. Bern : Haupt, 2006 (Schriftenreihe Logistik der Kühne-Stiftung 11)

-
- WAGNER, Harvey M. ; WHITIN, Thomson M: *Dynamic Version of the Economic Lot Size Model*. In: *Management Science* 5 (1958), Nr. 1, S. 89-96
- WESTKÄMPER, Engelbert: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006 (Springer-Lehrbuch)
- WIENDAHL, Hans-Peter: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. Mit 2 Tabellen. 4. Aufl. München , Wien : Hanser, 1997 (Haufe-Praxisratgeber)
- WIENDAHL, Hans-Peter: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 6. Aufl. München : Hanser, 2008
- WOLLENWEBER; JENS: *Dynamische Gestaltung von Ersatzteilsystemen : Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes unter integrierter Betrachtung von Prognoseverfahren, Netzwerkstrukturen und Bestandspolitiken*. IGF-Forschungsvorhaben 14422 N, 2006
- WÖLTJE, Jörg: *Betriebswirtschaftliche Formelsammlung*. 2. Aufl. Freiburg : Haufe-Mediengruppe, 2007 (Haufe-Praxisratgeber)
- ZÄPFEL, Günther: *Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement*. 2. Aufl. München : Oldenbourg, 2001 (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)