

Sven Mühlthaler

**Strategische Standortplanung  
in Reverse-Logistik-Netzwerken -  
Eine empirische und modellgestützte Analyse**

Dargestellt für die Amaturenaufarbeitung

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr.rer. pol.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr. Richard Vahrenkamp

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel

Tag der mündlichen Prüfung

26. November 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2008

ISBN 978-3-89958-626-8

URN: urn:nbn:de:0002-6278

© 2009, kassel university press GmbH, Kassel

[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel  
Printed in Germany

# **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines strategischen Standortplanungsmodells zur ökonomisch effizienten Gestaltung von Reverse-Logistik-Netzwerken und dessen exemplarische Anwendung auf die Industriarmaturenbranche und die Aufarbeitung von Industriarmaturen. Die Arbeit entstand in den Jahren 2006 bis 2008 im Rahmen meiner externen Promotion im Fachgebiet Produktionswirtschaft und Logistik an der Universität Kassel.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Vahrenkamp, gilt mein besonderer Dank für die fachliche und persönliche Unterstützung meiner Arbeit. Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls von Prof. Dr. Vahrenkamp bedanken. Frau Prof. Dr. Wenzel danke ich für die Übernahme des Koreferats und ihre Unterstützung.

Herrn Dr. Liedtke, Freudenberg Process Seals KG, danke ich für die fachliche Unterstützung im Bereich der Dichtungssysteme für Industriarmaturen. Herrn Dr. Bob Daniel von der Firma Dash Optimization danke ich für die kostenlose Nutzung der Software Xpress-Ive. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Industriarmaturen- und Dichtungs-herstellern, Armaturenaufarbeitern, Chemiekonzernen, Raffinerien und dem Statistischen Bundesamt für die konstruktive Zusammenarbeit und für die Bereitstellung des benötigten Datenmaterials.

Meinen Eltern danke ich für die hervorragende Ausbildung und die stete Unterstützung während meiner gesamten Studien- und Promotionszeit.

Sven Mühlthaler



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Editorial</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	3
1.3 Vorgehensweise . . . . .	4
<b>2 Reverse-Logistik als Segment der Unternehmenslogistik</b>	<b>6</b>
2.1 Historische Entwicklung der Logistik . . . . .	6
2.2 Ziele, Aufgaben und Bereiche der Logistik . . . . .	8
2.2.1 Beschaffungslogistik . . . . .	9
2.2.2 Produktionslogistik . . . . .	11
2.2.3 Distributionslogistik . . . . .	16
2.2.4 Entsorgungslogistik und Reverse-Logistik . . . . .	21
<b>3 Grundlagen des Netzwerk-Designs</b>	<b>30</b>
3.1 Supply Chains und Supply Chain Management . . . . .	30
3.2 Analyse von Closed-Loop Supply Chains . . . . .	40
<b>4 Recycling und Aufarbeitung</b>	<b>44</b>
4.1 Definition des Begriffs Recycling . . . . .	45
4.2 Gliederung der Recyclingobjekte aus ökonomischer Sicht . . . . .	45
4.3 Recycling-Formen . . . . .	47
4.4 Abgrenzung der Recycling-Behandlungsprozesse . . . . .	47
4.5 Klassifizierung des Recyclings nach Anfall- und Einsatzort . . . . .	48
<b>5 Juristische Aspekte bei der Armaturenaufarbeitung</b>	<b>50</b>
5.1 Allgemeiner Überblick über Gesetze, Verordnungen und Richtlinien . . . . .	51
5.2 Normen und Regelwerke für Industriearmaturen . . . . .	54
<b>6 Industriearmaturen</b>	<b>60</b>
6.1 Branchen- und Marktanalyse für Industriearmaturen . . . . .	60
6.2 Aspekte bei der Armaturenauswahl . . . . .	65
6.2.1 Leistungsanforderungen an Industriearmaturen . . . . .	65
6.2.2 Auswahlkriterien und Vergleich von Armaturenbauarten . . . . .	67

6.2.3	Armaturenselektion nach Medium und Betriebsparametern . . . . .	69
6.2.4	Werkstoffe im Armaturenbau . . . . .	70
6.3	Dichtungssysteme bei Industriearmaturen . . . . .	73
6.3.1	Flachdichtungen . . . . .	74
6.3.2	Stopfbuchspackungen . . . . .	76
6.3.3	Befederte Dichtsysteme . . . . .	78
6.3.4	Faltenbalgabdichtungssysteme . . . . .	79
6.4	Unterteilung der Industriearmaturen in Armaturenklassen . . . . .	80
6.5	Gründe für Schäden bei Industriearmaturen . . . . .	83
6.5.1	Kavitation . . . . .	84
6.5.2	Ausdampfung . . . . .	85
6.5.3	Erosion und Abrasion . . . . .	85
6.5.4	Strahlverschleiß . . . . .	86
6.5.5	Vereisen . . . . .	86
6.6	Eigenschaften und Gefahrenpotentiale von Durchflussmedien . . . . .	86
6.6.1	Ammoniak . . . . .	87
6.6.2	Chlor . . . . .	87
6.6.3	Harnstoff . . . . .	88
6.6.4	Kesselspeisewasser . . . . .	88
6.6.5	Rohöl . . . . .	89
6.6.6	Seewasser . . . . .	89
6.6.7	Salpetersäure . . . . .	90
6.6.8	Sauerstoff . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Armaturenaufarbeitung</b>	<b>92</b>
7.1	Wirtschaftliche Betrachtung der Armaturenaufarbeitung . . . . .	92
7.2	Lebenszykluskosten von Industriearmaturen . . . . .	94
7.3	Produktentwicklung . . . . .	97
7.4	Netzwerkstrukturen bei der Armaturenaufarbeitung . . . . .	100
7.5	Tätigkeiten im Rahmen der Armaturenaufarbeitung . . . . .	103
7.6	Einsparpotential bei der Aufarbeitung von Industriearmaturen . . . . .	110
<b>8</b>	<b>Konzeption eines formalen Modells zur strategischen Planung von Reverse-Logistik-Netzwerken</b>	<b>113</b>
8.1	Analyse der Problemstruktur . . . . .	113
8.2	Zielkriterien, Modellanforderungen und Modellabgrenzungen . . . . .	114
8.3	Teilbereiche der Standortplanung . . . . .	116
8.4	Analyse simultaner Standortplanungsprobleme . . . . .	119
8.4.1	Standortplanung in der Ebene . . . . .	119
8.4.2	Standortplanung in Netzwerken . . . . .	121
8.4.3	Diskrete Standortplanung . . . . .	121

8.5	Bewertung der Ansätze . . . . .	127
8.6	Entwicklung eines Ansatzes zur Standortplanung von Reverse-Logistik-Netzwerken . . . . .	128
8.6.1	Literaturübersicht . . . . .	128
8.6.2	Entwicklung eines Rerverse-Logistik-Standortplanungsmodells für die Industriearmaturenbranche . . . . .	130
8.6.3	Lösungsmethoden . . . . .	135
8.6.4	Zusammenfassung . . . . .	138
<b>9</b>	<b>Modellanwendung auf die Industriearmaturenbranche</b>	<b>139</b>
9.1	Anwendung des entwickelten Standortplanungsmodells auf die Industriearmaturenbranche . . . . .	139
9.1.1	Situationsgerechte Darstellung der Armaturenwerke . . . . .	140
9.1.2	Situationsgerechte Darstellung der Armaturenwerkstätten . . . . .	141
9.1.3	Transport und Lagerung . . . . .	143
9.1.4	Darstellung der Ausgangssituation . . . . .	145
9.1.5	Implementation . . . . .	147
9.2	Darstellung der zu untersuchenden Szenarien . . . . .	148
9.2.1	Szenariountersuchungen . . . . .	149
9.2.2	Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien . . . . .	150
9.2.3	Modifizierte Ausgangssituation . . . . .	163
9.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	172
9.4	Kritische Würdigung . . . . .	173
9.4.1	Modellkritik . . . . .	173
9.4.2	Übertragbarkeit auf weitere Problemstellungen . . . . .	174
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>176</b>
10.1	Fazit . . . . .	176
10.2	Weiterer Forschungsbedarf . . . . .	178
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>179</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Lagerarten in der Materialwirtschaft (vgl. Vahrenkamp 2004, S. 98 [140]) . . . . .	11
2.2	Systematik der PPS-Systeme (vgl. Zäpfel/Missbauer 1987, S. 897 [162]) . . . . .	13
2.3	Lagerstufen bei horizontalen Distributionsstrukturen (in Anlehnung an Weber/Kummer 1998, S. 209 [152]) . . . . .	17
2.4	Bestandteile des ECR-Konzepts, (vgl. Werner 2000 S.54 [155]) . . . . .	19
3.1	Logistische Wertschöpfungskette . . . . .	30
3.2	SCM-Blickwinkelerweiterung . . . . .	33
3.3	Einordnung des SCM-Konzeptes im Logistikumfeld (vgl. Busch/Dangelmaier 2002, S. 8 [28]) . . . . .	36
3.4	Auswirkungen des Bullwhip-Effekts (vgl. Störk 2003, S. 5 [132]) . . . . .	39
3.5	Reverse-Logistik-Netzwerkstruktur (vgl. Dekker u.a. 2004, S. 68 [104]) . . . . .	41
4.1	Beseitigung (linke Grafik) und Verwertung (rechte Grafik) von Abfällen in der BRD im Jahr 2004 (Quelle: Statistisches Bundesamt) . . . . .	44
5.1	Emissionsgesetzgebung weltweit, Quelle: Vogel 2004, S. 6 [146] . . . . .	51
5.2	Entwicklung der weltweiten $CO_2$ -Emissionen, Quelle: VGB POWERTECH 2005 . . . . .	54
5.3	Europäische Druckgeräte Richtlinie (DRGL/PED), Quelle: VDMA-Merkblatt zur europäischen Druckgeräte Richtlinie . . . . .	55
6.1	Wachstumsraten der deutschen Industriearmaturenproduktion von 1999 bis 2005, Datenquelle: Statistisches Bundesamt . . . . .	61
6.2	Deutsche Armaturenproduktion im Jahr 2005, Datenquelle: Statistisches Bundesamt . . . . .	62
6.3	Umsatzentwicklung der Armaturensegmente auf der Basis 1999 = 100%, Datenquelle: Statistisches Bundesamt . . . . .	63
6.4	Export deutscher Industriearmaturen, Januar bis August 2005 und 2006; Datenquelle: Statistisches Bundesamt . . . . .	64
6.5	Schematischer Aufbau einer Industriearmatur (vgl. Lange 2003, S. 21) [77]	66
6.6	Medien und Betriebsparameter (vgl. Münckel 2000, S. 13 [87]) . . . . .	69
6.7	Optimale Armaturenauswahl (vgl. Münckel 2000, S. 14 [87]) . . . . .	70

6.8	Emissionsquellen in der europäischen Chemieindustrie, Quelle: European Sealing Association . . . . .	73
6.9	Leckagequellen, Quelle: Bron: ESA website . . . . .	74
6.10	Flachdichtung zwischen einem Flanschenpaar, Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG . . . . .	75
6.11	Stopfbuchspackungssatz auf der Basis von Vliesstoffringen nach TA Luft, Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG . . . . .	76
6.12	Fertigung von Vliesstoffringen, Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG . . . . .	77
6.13	Links geflochtene Packung, rechts Vliespackung, Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG . . . . .	78
6.14	Stopfbuchse mit Tellerbefederung und Führungshülse, (vgl. Vogel/Danner 2005, S. 207 [147]) . . . . .	79
6.15	Absperrventil mit Faltenbalg und Sicherheitsstopfbuchse, Quelle: W.T. Armatur GmbH & Co. KG und Witzenmann GmbH . . . . .	80
6.16	Beispiel für eine Standardarmaturenklasse, Quelle: Werknorm BASF AG .	81
6.17	Kavitationsschaden an einem Pumpenlaufrad . . . . .	85
7.1	Wachstumsraten der Armaturenaufarbeitungsbranche von 2003 bis 2005, Datenquelle: Statistisches Bundesamt . . . . .	93
7.2	LCC im Beschaffungsprozess (vgl. VDI 2884 [18]) . . . . .	95
7.3	Produktentwicklungsprozess (vgl. Warnecke [151]) . . . . .	98
7.4	Netzwerkstruktur eines internen Armaturenaufarbeitungsprozesses . . . . .	101
7.5	Netzwerkstruktur eines externen Armaturenaufarbeitungsprozesses . . . . .	102
7.6	Wachstumsraten der Kugel-, Kegel- und Zylinderhähne von 1999 bis 2005, Datenquelle: Statistisches Bundesamt . . . . .	104
7.7	Aufbau des Kugelhahns, Typ INTEC K210, INTEC = firmeninterne Produktbezeichnung, K = Kugelhahn, 2 = zweiteilig, 1 = gelagerte Kugel, beidseitig angefедerte Kugelsitze, 0 = weichdichtender Kugelsitz . . . . .	105
7.8	Stempel für die Dokumentation nach der Aufarbeitung an einem Flansch des Kugelhahns (vgl. Zahr 2003, S. 288 [160]) . . . . .	108
7.9	Vereinfachte Darstellung eines Armaturenaufarbeitungsprozesses . . . . .	109
7.10	Indexzahlen von Stahl- und Edelstahlpreisen und Gießereierzeugnissen, Datenquelle: Statistisches Bundesamt . . . . .	110
7.11	Kostengegenüberstellung bei Kükenhähnen, Anschaffungskosten versus Aufarbeitungskosten . . . . .	111
7.12	Kostengegenüberstellung bei Schiebern, Anschaffungskosten versus Aufarbeitungskosten . . . . .	112
7.13	Kostengegenüberstellung bei Klappen, Anschaffungskosten versus Aufarbeitungskosten . . . . .	112

8.1	Netzwerkstruktur für die Armaturenbranche . . . . .	130
9.1	Ausgangssituation für das Reverse-Logistik-Standortplanungsmodell . . . . .	145
9.2	Darstellung der Datenzusammenführung . . . . .	148
9.3	Optimale Lösung für das Ausgangsszenario bei 10 % Rückfluss . . . . .	153
9.4	Optimale Lösung für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei 10 % Rückfluss . . . . .	156
9.5	Optimale Lösung für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei 10 % Rückfluss . . . . .	159
9.6	Optimale Lösung für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei 10 % Rückfluss . . . . .	162
9.7	Modifizierte Ausgangssituation mit 3 potentiellen Regionallagern . . . . .	163
9.8	Optimale Lösung des Ausgangsszenarios mit drei potentiellen Regionallagern bei einer Rückflussquote von 10 % . . . . .	165
9.9	Optimale Lösung für das Szenario mit 3 potentiellen Regionallagern mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei 10 % Rückflussquote .	167
9.10	Optimale Lösung für das Szenario mit 3 potentiellen Regionallagern mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei 10 % Rückflussquote .	169
9.11	Optimale Lösung für das Szenario mit 3 potentiellen Regionallagern mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei 10 % Rückflussquote .	171
9.12	Vergleich der szenarioabhängigen Gesamtkosten in Mio. € . . . . .	172

# Tabellenverzeichnis

2.1	Charakterisierung der Entsorgungslogistik gegenüber den versorgungsorientierten logistischen Subsystemen (in Anlehnung an Stölzle 1993, S. 200 [131]) . . . . .	22
2.2	Gestaltungsalternativen der entsorgungs- und rückführlogistischen Aufgabenbereiche im Überblick (in Anlehnung an Stölzle 1993, S. 252 [131]) . . . . .	26
2.3	Klassifizierung von möglichen Forschungsfeldern im Bereich der Rückführlogistik (in Anlehnung an Letmathe , S. 7 [79]) . . . . .	27
2.4	Entsorgungs- und rückführlogistische Aufgabenbereiche und mögliche zugehörige Bezugsgrößen (in Anlehnung an Stölzle 1992, S. 96 [130]) . . . . .	29
5.1	Emissionsreduzierung pro Land, Quelle: CEN/TC 264, WG 17 . . . . .	50
5.2	Konformitätsbewertungsverfahren . . . . .	56
5.3	Kennbuchstaben des Bearbeitungsstandes . . . . .	57
5.4	Ziffern der Bezugsquellen . . . . .	58
5.5	Grundnormen . . . . .	58
5.6	Systemnormen und Normen für besondere Anwendungsbereiche . . . . .	59
5.7	VdTÜV-Merkblätter . . . . .	59
6.1	Vergleich und Bewertung der Armaturenbauarten (vgl. Mattick/Dittmer 2000 S. 4) [82]) . . . . .	67
6.2	Druck-Temperatur-Abhängigkeit für Flansche aus austenitischem Stahl 1.4401 (DIN EN 1092-1) . . . . .	68
6.3	Auswahl von Gehäusewerkstoffen nach DIN (vgl. Muschet 2003, S. 152 [88])	71
6.4	Auszug aus einer Ausfallstatistik für Gussfehler (vgl. Vogel 2000, S. 97) [148] . . . . .	72
6.5	Kennbuchstaben für die Armaturenart, Quelle: Werknorm BASF AG . . . . .	81
6.6	Armaturennummerierung, Quelle: Werknorm BASF AG . . . . .	82
6.7	Kennbuchstaben für Armaturenanschluss, Dichtfläche, Bauform, Quelle: Auszug aus Werknorm BASF AG . . . . .	83
7.1	Bauteilbezeichnung INTEC K 210 . . . . .	106
8.1	Reverse-Logistik-Standortplanungsmodelle . . . . .	129

9.1	Datenmaterial Armaturenhersteller Teil 1 für 2006 . . . . .	140
9.2	Datenmaterial Armaturenhersteller Teil 2 für 2006 . . . . .	141
9.3	Datenmaterial Armaturenaufarbeiter Teil 1 für 2006 . . . . .	142
9.4	Datenmaterial Armaturenaufarbeiter Teil 2 für 2006 . . . . .	142
9.5	Datenmaterial Lager beim Armaturenhersteller . . . . .	143
9.6	Datenmaterial Lager beim Kunden . . . . .	144
9.7	Kennzahlen für das Ausgangsszenario bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen sowie konstanter Gesamtnachfrage . . . . .	150
9.8	Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Ausgangsszenario bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	152
9.9	Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Ausgangsszenario bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	152
9.10	Kennzahlen für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen	154
9.11	Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	155
9.12	Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	155
9.13	Kennzahlen für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen . . . . .	157
9.14	Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	158
9.15	Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	158
9.16	Kennzahlen für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen	160
9.17	Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	161
9.18	Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei hoher Rückflussquote von 10 % . . . . .	161
9.19	Kennzahlen für das Ausgangsszenario mit drei potentiellen Regionallagern bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen . . . . .	164
9.20	Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen . . . . .	166
9.21	Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Kundenachfrage um 16 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen . . . . .	168

9.22 Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Kundenachfrage um 24 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen . . . . .	170
---	-----

# Abkürzungsverzeichnis

AbfG	Abfallgesetz
AD	Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BGBI	Bundesgesetzblatt
BiImSchG	Bundes-Immissionschutzgesetz
BiImSchV	Bundes-Immissionschutzverordnung
C	Kohlenstoff
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CEN/TC 69	Technisches Komitee „Industriearmaturen“
CEN/TC 264	Europäisches Komitee für Normung (Luftbeschaffenheit)
CLSC	Closed-Loop Supply Chain
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
Cr	Chrom
DGRL	Druckgeräterichtlinie
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EG	Europäische Gemeinschaft
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency
ESA	European Sealing Association
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
GE	Geldeinheiten
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HTCW	High Temperature Conversion of Waste
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
ISO	International Organization for Standardization
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
kWh/Nm <sup>3</sup>	Kilowattstunde pro Normkubikmeter (Heizwert eines Gases)
LCC	Life Cycle Costing
LP	Linear Programming



ME	Mengeneinheiten
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MJ/kg	Mega Joule pro Kilogramm (Brennwert/Heizwert)
Mo	Molybdän
MRP	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
Ni	Nickel
<i>NO<sub>x</sub></i>	Stickoxid
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPT	Optimized Production Technology
OR	Operations Research
PED	Pressure Equipment Directive
PN	Pressure Nominal (Nenndruck)
ppm	parts per million
PPS	Produktionsplanung und Steuerung
PTFE	Polytetrafluorethylen
SCM	Supply Chain Management
SEB	Stahl-Eisen-Betriebsblatt
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TRG	Technische Regeln Druckgase
TRGS	Technische Regeln für Gefahrenstoffe
UF	Urea-Formaldehyd
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VGB	Vereinigung der Großkraftwerks-Betreiber
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WLP	Warehouse-Location-Problem

# 1 Editorial

## 1.1 Problemstellung

Fragen der Abfallvermeidung, -entsorgung und -verwertung wurden in den letzten Jahren in Wissenschaft, Politik und Wirtschaftspraxis zunehmende Bedeutung zugesprochen. Durch die Einführung des Krw-/AbfG<sup>1</sup> und den zugehörigen Verordnungen, die seit Oktober 1996 in Kraft getreten sind, hat ein Paradigmenwechsel von der Beseitigungswirtschaft zur Kreislaufwirtschaft stattgefunden; somit wurde die Abfallwirtschaft zur Stoffstromwirtschaft.

Im Februar 2003 trat die EG-Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE) und die Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten endlich in Kraft. Ungefähr 2 Jahre später erfolgte die Umsetzung der EG-Richtlinien in deutsches Recht<sup>2</sup>. Alte Elektro- und Elektronikgeräte dürfen ab dem 24. März 2006 nicht mehr mit dem herkömmlichen Hausmüll entsorgt werden. Das schreibt das ElektroG vor. Die Verbraucherinnen und Verbraucher haben allerdings die Möglichkeit ihre alten Elektro- und Elektronikgeräte kostenlos bei den kommunalen Sammelstellen und bei Elektrofachgeschäften abzugeben. Von diesem Zeitpunkt an sind die Hersteller dazu verpflichtet, die Altgeräte zurückzunehmen und anschließend entweder Bestandteile wiederzuverwerten oder komplett zu entsorgen.

Durch den Einsatz von Kreislaufwirtschaftssystemen änderten sich im produzierenden Gewerbe wesentliche Bestandteile der Unternehmensstruktur, wie z.B. Fragen der Produktentwicklung und Organisation. Deshalb ist heute ein ganzheitliches Denken und Handeln erforderlich. Entscheidungen, die bereits frühzeitig in der Produktentwicklung getroffen werden, haben möglicherweise gravierende Auswirkungen auf spätere Lebenszyklusphasen. Somit ist eine life-cycle-übergreifende Produkt- und Prozessoptimierung von

<sup>1</sup> Durch dieses Gesetz wurden die Vorgaben des EG-Rechts in das deutsche Recht umgesetzt. Kernelemente sind der weite EG-Abfallbegriff, der auch Abfälle zur Verwertung erfasst, der Vorrang der Vermeidung und Verwertung von Abfällen vor der Beseitigung sowie die stärkere Eigenverantwortung der Abfallerzeuger.

<sup>2</sup> Am 23. März 2005 wurde das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG) im Bundesgesetzblatt (BGBl. I S.762) verkündet und trat am 24. März 2005 in Kraft

großer Bedeutung. Früher wurden Produkte oft konzipiert ohne Aspekte wie Wiederverwertbarkeit oder Entsorgung zu berücksichtigen. Durch die recyclinggerechte Produktentwicklung ergeben sich für die Unternehmen deutliche Kostenvorteile (vgl. Osmers/Werner 1996 [93]). Ein Umdenken fand statt und es wurde erkannt, dass für einen langfristigen Unternehmenserfolg der gesamte Lebenszyklus eines Produktes betrachtet werden muss. Unternehmen, die umweltbewusst agieren und nachweislich umweltfreundliche Produkte anbieten, haben immer häufiger einen Wettbewerbsvorteil (vgl. Beyer 2000 [20]).

Während sich die Politik und die öffentlichen Diskussionen prioritär mit Fragen aus dem Bereich der Entsorgung der Elektro- und Elektronikgeräte befassten, entstand parallel ein interessanter neuer Markt „Industrielle Armaturenaufarbeitung“, der sich zunächst ohne Gesetze und Verordnungen rein aus wirtschaftlichen Interessen entwickelte. Technische Aufarbeitungsbedingungen für Industriearmaturen sowie die Umrüstung auf neue Standards, wie z.B. die TA-Luft nach VDI 2440, gewährleisten die Qualitätssicherung von aufgearbeiteten Industriearmaturen. Große Raffinerien und Chemiekonzerne wie z.B. die BASF AG nutzen bereits aufgearbeitete Industriearmaturen, um die laufenden Betriebskosten der Prozessanlagen zu senken. Durch den Einsatz von aufgearbeiteten Industriearmaturen können Kostenreduktionen von bis zu 70 % im Vergleich zu einer neuen Industriematur erzielt werden. Dennoch ist die Lage der Armaturenaufarbeiter noch nicht optimal. Im Durchschnitt sind diese nur zu 70 % ausgelastet, während die Armaturenhersteller an ihrer Kapazitätsobergrenze produzieren und Kapazitätserweiterungsmaßnahmen planen. Durch die Verknappung von Rohstoffen, steigende Nachfrage, Klimaschutzmaßnahmen sowie steigende Stahl- und Edelstahlpreise wird ein Aufschwung für die industrielle Armaturenaufarbeitung prognostiziert. Die daraus resultierenden Herausforderungen im Bereich der Standortplanung, der Kapazitierung sowie der Planungsprozesse im Reverse-Logistik-Netzwerk stellen wichtige Aufgaben in der strategischen Unternehmensplanung sowohl für jeden einzelnen Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter als auch für die ganze Industriearmaturenbranche dar. Diese Aufgabenstellung wird unter Berücksichtigung der Anforderungen der TA-Luft als Reverse-Logistik-Netzwerkplanungsproblem bezeichnet. Zur Entwicklung eines allgemeinen Reverse-Logistik-Netzwerkplanungsansatzes, der auf verschiedene Branchen angewendet werden kann, ist es notwendig die allgemeine Problemstruktur von Reverse-Logistik-Netzwerkplanungsproblemen bei aufzuarbeitenden Industriearmaturen zu verdeutlichen.

In dieser Arbeit werden neue und aufzuarbeitende Industriearmaturen näher betrachtet, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede bezüglich verschiedener Anforderungen und Rahmenbedingungen zu analysieren. Dieses Produkt wurde ausgewählt, da es einerseits die aktuelle Klimaproblematik tangiert und andererseits über die eingesetzten Werkstoffe mit der Problematik der Ressourcenverknappung eng verbunden ist. Ferner besteht bei der Industriearmaturenbranche ein gesteigertes Interesse Untersuchungen durchzuführen,

um ökonomische Entscheidungshilfen und Anregungen zu erhalten. Deshalb gilt es, ausgehend von rechtlich formulierten, zukünftig greifenden Anforderungen und Richtlinien, ökonomische Zielgrößen für die einzelnen Armaturenaufarbeiter und Armaturenhersteller sowie für die gesamte Industriematurenbranche zu erreichen. Zur Wirtschaftlichkeitsüberprüfung der bestehenden Aufarbeitungs-, Fertigungs- und Lagerstandorte sowie der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen werden komplexe Planungsinstrumente, unter Berücksichtigung der zuvor aufgeführten Rahmenbedingungen, benötigt. Derartige Planungsinstrumente liegen derzeit für die Industriematurenbranche nicht vor.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Dissertation ist die Entwicklung eines gemischt ganzzahligen kapazitierten Reverse-Logistik-Standortplanungsmodells und dessen exemplarische Anwendung auf die Industriematurenbranche unter Berücksichtigung der bestehenden Gesetze, Richtlinien und Aufarbeitungsvorschriften. Ausgehend von einer ausführlichen Analyse

- der anfallenden aufzuarbeitenden Industriematuren, basierend auf empirischen Erfahrungen verschiedener Armaturenaufarbeiter,
- der Nachfrage nach neuen und aufgearbeiteten Industriematuren,
- der Lager-, Aufbereitungs- und Fertigungsstandorte,
- der zur Verfügung stehenden Verfahren zur Reparatur und Aufarbeitung sowie
- der Umsätze, der Kosten und Erlöse

werden Planungsinstrumente entwickelt, die Entscheidungshilfen für die Armaturenaufarbeiter und Armaturenhersteller liefern. Anhand unterschiedlicher Szenarien sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Rahmenbedingungen auf die strategischen Planungsziele der beteiligten Akteure des Reverse-Logistik-Netzwerkes dargestellt werden.

Die aus den betrachteten Szenarien resultierenden Ergebnisse sollen die einzelnen Unternehmen bei der strategischen Planung im Reverse-Logistik-Netzwerk unterstützen. Neben den ökonomischen Zielgrößen und den rechtlichen Anforderungen und Richtlinien sind Fragestellungen bezüglich der Kapazitätsanpassung, des Aufbaus von Lagerhaltungs- und Aufarbeitungskooperationen und der Standortüberprüfung sowie Standortwahl zu klären.

Das zu entwickelnde Modell soll branchenneutral sein und soll Lösungsansätze und Hilfestellungen nicht nur für die Industriematurenbranche liefern.

## 1.3 Vorgehensweise

Im Folgenden wird auf die Vorgehensweise der Arbeit näher eingegangen: In Kapitel 2 werden die historische Entwicklung, die Ziele, die Aufgaben und die Bereiche der Logistik erläutert. Im Fokus steht hierbei die Abgrenzung der Teilgebiete der Unternehmenslogistik. Des Weiteren werden in Kapitel 3 die Grundlagen des Netzwerk-Designs beschrieben. Die Unterschiede von herkömmlichen Supply Chains und Closed-Loop Supply Chains werden aufgezeigt. In Kapitel 4 wird eine Differenzierung zwischen den Begriffen Recycling und Aufarbeitung vorgenommen; dabei wird auf das Produkt- und Materialrecycling näher eingegangen.

Zentrale Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Normen bei der Armaturenaufarbeitung werden in Kapitel 5 erläutert. Eingehend analysiert werden die Europäische Druckgeräte Richtlinie (DGRL) und die in der Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) enthaltene erste allgemeine Verwaltungsvorschrift TA-Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24. Juli 2002) und die Bedeutung für die Armaturenaufarbeitung. Außerdem wird auf die wichtigsten Normen und Regelwerke im Rahmen der Armaturenaufarbeitung eingegangen. Zu diesem Thema fand ein Fachgespräch mit der Technischen Anlagenüberwachung der BASF AG Ludwigshafen statt.

Eine Branchen- und Marktanalyse für Industriearmaturen wird auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes in Kapitel 6 durchgeführt. Im Einzelnen werden die Wachstumsraten der Gesamtarmaturenproduktion von 1999 bis 2005, die Aufteilung der Armaturenproduktion in die einzelnen Armaturensegmente in 2005, die Umsatzentwicklung der Armaturensegmente von 2000 bis 2005 und der Exportanstieg deutscher Industriearmaturen von 2005 auf 2006 untersucht. Neben den Aspekten bei der Armaturenauswahl werden Dichtungssysteme, die Unterteilung der Industriearmaturen in Armaturenklassen, die Gründe für Schäden bei Industriearmaturen und die Eigenschaften und Gefahrenpotentiale von Durchflussmedien behandelt. Das verwendete Informationsmaterial für die Dichtungssysteme bei Industriearmaturen wurde bei Freudenberg Process Seals KG, W.T. Armatur GmbH & Co. KG und Witzenmann GmbH recherchiert. Die Unterteilung der Industriearmaturen in Armaturenklassen basiert auf der Werksnorm der BASF AG.

Im Kapitel 7 werden die Wachstumsraten der Armaturenaufarbeitungsbranche für 2003 bis 2005, Quelle Statistisches Bundesamt, dargestellt. Des Weiteren werden der Lebenszyklus und die Produktentwicklung von Kreislaufarmaturen behandelt. Die Netzwerkstrukturen bei der Armaturenaufarbeitung basieren auf Befragungen von Armaturenherstellern, wie z.B. Pfeiffer Chemie Armaturenbau GmbH, VAG Armaturen GmbH und Klinger Schöneberg GmbH sowie Armaturenaufarbeitern, wie z.B. Probst GmbH, SABO-armaturen service GmbH, Amros-Weber Armaturenservice GmbH und Armaturenwerkstätte BASF AG. Abschließend werden die Tätigkeiten im Rahmen der Armatu-

renaufarbeitung sowie das Einsparpotential bei der Aufarbeitung von Industriearmaturen beleuchtet. Die Daten für die Kostengegenüberstellungen basieren auf Recherchen bei unterschiedlichen Armaturenaufarbeitern, wie z.B. Amros-Weber Armaturenservice GmbH, BASF AG, Probst GmbH und SABO-armaturen service GmbH.

In Kapitel 8 werden die Zielkriterien, Modellanforderungen und -abgrenzungen dargestellt. Danach werden bereits existierende Ansätze beschrieben und bewertet. Für die untersuchten Ansätze werden Lösungsmethoden vorgestellt. Auf Basis der untersuchten Ansätze wird ein neues Reverse-Logistik-Standortplanungsmodell für die Industriearmaturenbranche entwickelt.

Das entwickelte strategische Standortplanungsmodell für Reverse-Logistik-Netzwerke wird in Kapitel 9 auf die Armaturenaufarbeitung praxisnah angewendet. Die Daten für das Modell wurden mit Hilfe qualitativer Methoden der Befragung (vgl. Diekmann 2000, S.375 [36]) gewonnen. Hierbei wurden nicht-standardisierte telefonische Experteninterviews (vgl. Kromrey 2000, S. 364 [73]) mit Fachpersonal der unterschiedlichen Unternehmen durchgeführt. Da die untersuchten Unternehmen die Preise und Kostenstruktur der Armaturenbranche gut wiederspiegeln und weitere Untersuchungen keine neuen Erkenntnisse liefern würden, kann auf die Erstellung eines Fragebogens verzichtet werden. Des Weiteren werden neben dem Ausgangsszenario unterschiedliche Szenarien analysiert, die Ergebnisse ausgewertet und Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen für die beteiligten Akteure bereitgestellt. Abschließend wird das Modell kritisch gewürdigt und ein Ausblick gegeben. In Kapitel 10 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

## 2 Reverse-Logistik als Segment der Unternehmenslogistik

In diesem Kapitel wird zuerst die historische Entwicklung der Logistik näher erläutert. Danach erfolgt eine Untergliederung des Begriffs Logistik in Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- sowie in Reverse-/Entsorgungslogistik. Ferner werden die unterschiedlichen Aufgaben und Zielsetzungen der jeweiligen Teilbereiche herausgearbeitet.

### 2.1 Historische Entwicklung der Logistik

Der Begriff Logistik hat etymologisch betrachtet zwei Wurzeln. Aus dem griechischen 'lego' (denken) leiten sich 'logizomai' (berechnen, überlegen) und 'logos' (Vernunft, Verstand, Rechnung) ab. Ebenso reiht sich das lateinische Wort 'logica' (Vernunft) in diesen Wortstamm ein (vgl. Weber/Kummer 1998, S. 1-3 [152]). Die meisten Experten gehen davon aus, dass der moderne betriebswirtschaftliche Begriff „Logistik“ von dem zweiten Ursprung, dem französischen Verb 'loger' - für „Quartier machen“ -, welches von dem lateinischen Wort 'logugea' (Miete) abstammt, abzuleiten ist. Die Wissenschaft ist sich einig, dass die älteste überlieferte Definition des Begriffs Logistik von dem byzantinischen Kaiser Leontios VI (886-911) stammt (vgl. Semmelroggen 1988, S. 6-9 [119]; Kapoun 1981, S. 123-127 [70]). In seinem Werk „Summarische Auseinandersetzung der Kriegskunst“ differenziert er die Kriegswissenschaft in Strategie, Taktik und Logistik. Die erste ausführliche Diskussion des Begriffes Militärlogistik wird dem Schweizer Baron Antoine-Henry de Jomini, der als General den Franzosen diente und später für Zar Alexander u.a. die Militärakademie St. Petersburg gründete, zugeschrieben. In seinem 1837 publizierten Werk „Abriss der Kriegskunst“ listete er alle wesentlichen Aufgaben, die der Unterstützung der Streitkräfte dienen, wie z.B. Truppentransporte, Versorgung mit Munition und Verpflegung, Standortbestimmung von Militärbasen und Lägern, auf (vgl. Weber/Kummer 1998, S. 1-3 [152]).

Der Handel über die Seidenstraße belegt eindeutig, dass die Logistik auch im Handel und nicht nur im militärischen Bereich einen Schlüsselfaktor für den Erfolg darstellte. Über einen Zeitraum von etwa 3000 Jahren fand ein intensiver Warenaustausch zwischen den Staaten des Mittelmeerraumes und den Hochkulturen aus Persien, Indien und China

statt. Auf Grund der andauernden Bedrohungen dieses Handelsweges durch Kriegszüge, politische Veränderungen, Überfälle durch Räuber und die Unberechenbarkeit der Natur mussten immer wieder Anpassungen an die jeweilige Situation vorgenommen werden. Diese flexible Koordination des Handels, Transports, der Lagerung und des Umschlags von Handelsgütern gewährleistete die Verfügbarkeit der nachgefragten Güter und sicherte den wirtschaftlichen Erfolg. Ein sehr leistungsfähiges Informationsnetz über schnelle Relais-Pferde ermöglichte es, Nachrichten über weite Strecken zu überbringen, die die Abänderungen der Handelswege sehr erleichterten (vgl. Isermann 1998, S. 21-22 [65]). Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass in der Logistik sehr viele unterschiedliche Faktoren, wie z.B. Informationsaustausch, Tourenplanung, Lagerstandorte, Servicegrad und der Faktor Unsicherheit usw. eine wichtige Rolle spielen.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Militärlogistik wurden nach dem Ende des 2. Weltkrieges in den USA für wirtschaftliche Zwecke verwendet. Die Hauptaufgabe der daraus resultierenden Unternehmenslogistik war die Optimierung von Transport, Läfern und Umschlagstätigkeiten im Realgüterbereich. Die ersten Publikationen in den USA zur betriebswirtschaftlichen Logistik, von den Management- und Marketing-Experten Maggee, Bowersox und Drucker, erschienen im Zusammenhang mit der damals eingeleiteten „Marketing-Revolution“. Man hatte das Marketing und dessen wichtigstes Element, die physische Distribution, als entscheidende Faktoren unternehmerischen Erfolgs entdeckt. Damit entstand die Forderung, dass den bisher wenig beachteten Aufgaben der physischen Distribution ein gleichberechtigter Platz in der Management- und Betriebswirtschaftslehre und der Praxis verschafft werden müsste - neben den schon lange intensiv studierten Funktionen, wie z.B. der Produktion und der Finanzierung, auf deren Optimierung sich vorher die Bemühungen konzentriert hatten. Dies führte zu wachsendem Interesse an der Entwicklung spezifischen Know-hows für die Aktivitäten des Transports, des Umschlags, der Kommissionierung und Lagerung von Produkten sowie damit eng verknüpfter Funktionen in der Verpackung. In den 70er Jahren entdeckten Europa und Deutschland die Vorteilhaftigkeit der Unternehmenslogistik. Die ersten Veröffentlichungen zu logistischen Themengebieten erschienen von den Professoren Pfohl (Marketing-Logistik, 1972) und Kirsch (Betriebswirtschaftliche Logistik, 1973). Ingenieure beeinflussten maßgeblich die Entwicklung der Logistik, dabei entstanden primär automatisierte-materialflusstechnische Lösungen, wie das Hochregallager, die Kommissioniertechnik, fahrerlose Transportsysteme usw. Betriebswirtschaftliche Problemstellungen wurden vernachlässigt. Die 80er Jahre waren geprägt von einer Optimierung funktionsübergreifender Abläufe (Logistik als Managementaufgabe). Automobilzulieferer perfektionierte ihre Lieferzyklen so, dass eine Just-in-time-Produktion ihrer Kunden möglich war. In den 90er Jahren stand die Entwicklung und Optimierung ganzer Prozess- und Wertschöpfungsketten im Vordergrund. Durch das Inkrafttreten des Krw-/AbfG im Oktober 1996 fand ein Paradigmenwechsel von der Beseitigungswirtschaft zur Kreislaufwirtschaft statt. Dadurch wurden bereits bestehende Wertschöpfungsketten um rückwärts

gerichtete Warenströme erweitert. Demzufolge mussten nun nicht mehr nur vorwärts gerichtete, sondern auch die rückwärts gerichteten Warenströme optimiert werden. Bezo gen auf die Industriarmaturenbranche bedeutet dies, die Optimierung der Warenströme von Neuarmaturen<sup>12</sup> und aufzuarbeitenden Industriarmaturen<sup>3</sup>. Durch die Ressourcenverknappung und die Verschärfung von Umweltrichtlinien steigt das Interesse an der Aufarbeitung von Industriarmaturen und die damit eng verbundene Reverse-Logistik gewinnt zunehmend an Bedeutung.

## 2.2 Ziele, Aufgaben und Bereiche der Logistik

Die primären Ziele der logistischen Planung, Gestaltung und Steuerung von Wertschöpfungsketten sind Kostensenkung, schnellere und flexiblere Reaktionsfähigkeit auf veränderte Marktsituationen und die Verbesserung des Servicegrades und der Qualität. Bei der Kombination der oben genannten Ziele kommt es zwangsläufig zu Zielkonflikten. Beispielsweise vermindert ein hoher Lagerbestand einerseits die Kosten, die durch Fehlmengen verursacht werden, und erhöht die Lieferbereitschaft, andererseits steigen dadurch die Lagerhaltungskosten. Die optimale Ausbalancierung dieser Konfliktfelder erfordert die Anwendung geeigneter Optimierungsverfahren. Geeignete Lösungsansätze und -verfahren werden in Kapitel 8 näher beleuchtet.

Es existieren sehr viele Definitionen des Begriffs Logistik in der Betriebswirtschaftslehre. Zuerst wird üblicherweise eine objektbezogene Unterteilung in eine Makrologistik und eine Mikrologistik vorgenommen (vgl. Pfohl 1996, S. 15ff. [101]). Die Makrologistik befasst sich mit gesamtwirtschaftlichen Systemen und der Gestaltung von Güterfluss-Systemen in Volkswirtschaften. Zum Bereich der Mikrologistik zählen Güter- und Informationsflüsse zwischen Industrie- und Handelsunternehmen. Diese sogenannte Unternehmenslogistik wird weiter differenziert in die Subsysteme: Beschaffungslogistik, Produktionslogistik, Distributionslogistik und Reverse-Logistik/Entsorgungslogistik. Zwischen diesen Subsystemen bestehen Interdependenzen, z.B. fallen in der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik Abfälle an, die durch die Entsorgungslogistik einer Deponie oder Müllverbrennungsanlage zugeführt werden. Defekte Teile oder Halb- und Fertigfabrikate werden im Rahmen der Reverse-Logistik zurückgenommen und in Recycling- oder Aufbereitungsanlagen verwertet oder als neuwertige Produkte wieder auf den Absatzmarkt gebracht. Deshalb kann die Reverse- und Entsorgungslogistik sowohl als ein Subsystem der Unternehmenslogistik als auch der anderen drei Logistikgebiete betrach-

<sup>1</sup> Die Menge der Neuarmaturen setzt sich aus neugefertigten und aufgearbeiteten Industriarmaturen zusammen, da beide den gleichen Qualitätsmerkmalen genügen müssen.

<sup>2</sup> vorwärts gerichtete Warenströme

<sup>3</sup> rückwärts gerichtete Warenströme

tet werden. Im Anschluss werden die vier Subsysteme der Logistik erläutert, wobei der Schwerpunkt auf der Reverse- und Entsorgungslogistik liegen wird.

### 2.2.1 Beschaffungslogistik

Die Beschaffungslogistik von Betrieben und Unternehmen befasst sich mit der Optimierung der Materialflüsse von den Lieferanten zum Eingangslager oder direkt zur Produktion. Ihre Aufgabe ist es, alle planenden, steuernden, durchführenden Tätigkeiten, die einer bedarfsgemäßen, nach Art, Menge, Raum und Zeit abgestimmten Materialversorgung und Erzeugnissen, die für die Erfüllung der betrieblichen Produktions- und Absatzaufgaben erforderlich sind, zu unterstützen [95]. Im Anschluss sind die wichtigsten Teifunktionen der Beschaffungslogistik subsummiert:

- Materialdisposition,
- Organisation der Anliefertransporte,
- Warenannahme und Wareneingangskontrolle,
- Kommissionierung,
- Lagerlogistik (z.B. Crossdocking),
- innerbetriebliche Transportlogistik,
- Materialflussplanung.

Sowohl in der Praxis als auch in der Literatur wird eine Vielzahl von Ausdrücken verwendet, die mit dem Begriff „Beschaffungslogistik“ in engem Zusammenhang stehen, ihn substituieren oder die o.g. Teifunktionen der „Beschaffungslogistik“ beschreiben. Deshalb ist die Beschaffungslogistik von den Begriffen Beschaffung, Einkauf und Materialwirtschaft abzugrenzen.

Die **Beschaffung** (Procurement, Sourcing) ist eine der wichtigsten Grundfunktionen eines Unternehmens. Die Aufgabe der bedarfsgesteuerten Beschaffung besteht darin, die wirtschaftliche Versorgung des Unternehmens mit betrieblichen Produktionsfaktoren, die für die Leistungserstellung benötigt und nicht selbst erzeugt werden, zu sichern. Sie dient somit als Schnittstelle zwischen den Unternehmen und den externen Anbietern (Beschaffungsmärkten). Hinsichtlich des Umfangs der Objekte wird zwischen einer Beschaffung im engeren Sinn und einer Beschaffung im weiteren Sinn unterschieden. Bei der engeren Definition ist die Beschaffung ausschließlich für die Versorgung mit Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, Fertigerzeugnissen, Halbfabrikaten und Handelswaren verantwortlich, wohingegen bei der weiteren Begriffsfassung auch Anlagegüter, Dienstleistungen, Rechte, externe Informationen, Arbeitskräfte und Kapital als Beschaffungsobjekte angesehen werden (vgl. Vahrenkamp 2004, S. 98 [140]; Ihde 1991, S. 196 [64]; Bloech/Ihde

1997, S. 64-66 [23]). Des Weiteren lässt sich das Beschaffungswesen in operative und strategische Aufgabenbereiche unterteilen.

Die Beschaffung im engeren Sinne wird oft synonym mit dem Begriff **Einkauf**, dem häufig operative Tätigkeiten, wie z.B. die Erlangung und Bereitstellung von Sachgütern und Dienstleistungen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte zu Grunde gelegt werden, verwendet (vgl. Schulte 2001, S.6 [118]). Es existieren jedoch Unterschiede zwischen der reinen Bestelltätigkeit eines verwaltenden/alten Einkaufs und dem gestaltenden/modernen Einkauf. Die Zielsetzung des modernen Einkaufs ist die Optimierung des Preis-/Leistungsverhältnisses durch Aktivitäten, wie z.B. qualifizierte Angebotsvergleiche (vgl. Arnolds 1998, S. 22 [3]). Durch die unterschiedlichen Definitionen des Begriffs Einkauf in der Literatur ist die Grenze zwischen operativen und strategischen Tätigkeiten fließend. Die Abgrenzung zwischen der Beschaffung und der Beschaffungslogistik eines Unternehmens kann wie folgt dargelegt werden: Die Aufgabe der Beschaffung (des Einkaufs) ist die Bereitstellung und Pflege von Lieferkapazitäten sowie die Entwicklung zukünftiger Lieferkapazitäten (vgl. Pfohl 2003, S.182 [97]). Die Beschaffungslogistik verwendet die vorhandenen Lieferkapazitäten, indem sie Güter- und Informationsflüsse zur Bereitstellung der benötigten Güter induziert (vgl. Pfohl 2003, S. 183 [97]). Der Einkauf ist ein Teilbereich der Beschaffung und bezieht sich auf Produktionsfaktoren, Betriebsmittel und (außer Gebäude) Werkstoffe. Der Einkauf ist demzufolge auch als Teilbereich der Materialwirtschaft anzusehen (vgl. Witte 2000, S. 4 [157]).

Die Meinungen bezüglich einer Abgrenzung des Begriffes **Materialwirtschaft** gehen in der Literatur weit auseinander. Einige verstehen unter Materialwirtschaft ausschließlich Beschaffung (Einkauf), andere hingegen subsummieren unter dem Begriff Materialwirtschaft die Aktivitäten, die mit der Beschaffung und Bevorratung von Materialien zusammenhängen (vgl. Hartmann 2002, S. 21 [59]). Wieder andere Autoren verstehen darunter noch zusätzlich den inner- und außerbetrieblichen Transport. Somit lässt sich das Aufgabenspektrum der Materialwirtschaft in vier Bereiche untergliedern (vgl. Bichler/Krohn 2001, S. 1 [21]):

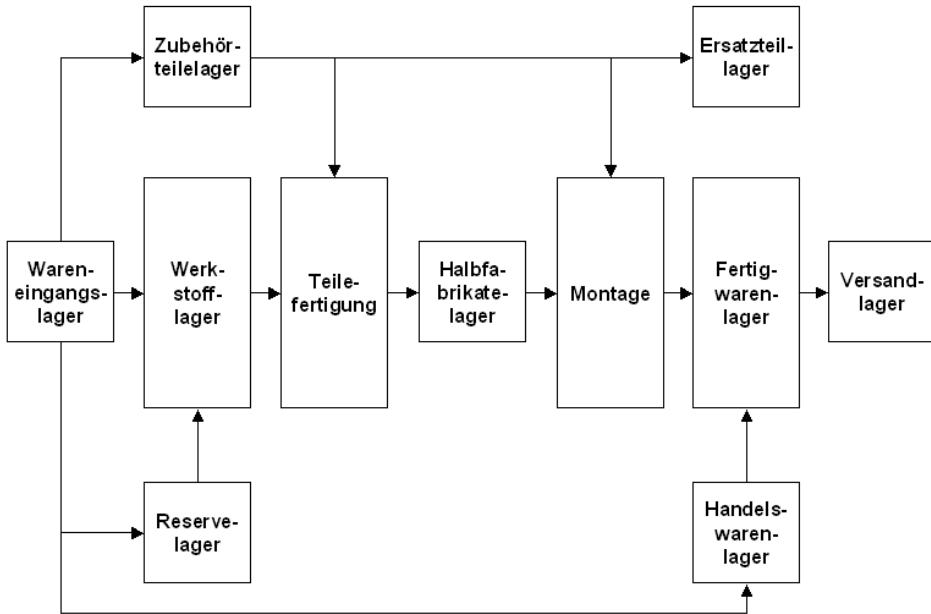
1. Einkauf,
2. Einkauf, Lagerhaltung und Disposition,
3. Einkauf, Lagerhaltung, Disposition und innerbetrieblicher Transport (Materialfluss),
4. Einkauf, Lagerhaltung, Disposition, inner- und außerbetrieblicher Transport.

Bei der Koordination der Transporte und Lagerprozesse sind die folgenden Ziele zu beachten (vgl. Vahrenkamp 2004, S. 98 [140]):

- Sicherstellung der Versorgung,
- niedrige Lager- und Sicherheitsbestände,

- Beschleunigung der Materialflüsse.

Die wichtigsten Teilfunktionen der klassischen Materialwirtschaft sind die Steuerung des innerbetrieblichen Materialflusses und die Verwaltung und Organisation der unterschiedlichen Lagerstandorte für Rohstoffe, Zwischen- und Endfabrikate. Abschließend werden in Abbildung 2.1 die unterschiedlichen Lagerarten innerhalb eines Unternehmens grafisch dargestellt.



**Abbildung 2.1:** Lagerarten in der Materialwirtschaft (vgl. Vahrenkamp 2004, S. 98 [140])

## 2.2.2 Produktionslogistik

Die Produktionslogistik, als Subsystem der Unternehmenslogistik, ist eng mit der Beschaffungslogistik und Distributionslogistik verbunden (vgl. Drews 2006, S. 19 [41]; vgl. Ihde 1991, S. 215 [64]). Ihre Aufgabe ist es, die art- und mengenmäßig, räumlich und zeitlich abgestimmte Versorgung des Produktionsprozesses mit den benötigten Einsatzgütern (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Fremdbezugsteile) und der Abgabe der Halbfertig- und Fertigerzeugnisse an das Absatzlager sicherzustellen (vgl. Pfohl 2003, S. 193 [97]). Die Produktionslogistik plant, steuert und kontrolliert die innerbetrieblichen Transportvorgänge sowie die Material- und Güterbestände. Die Schnittstellen zur Beschaffungslogistik und Distributionslogistik sind am Wareneingangs- und am Warenausgangslager; somit besteht kein direkter Kontakt zur Unternehmenswelt. Neben den

Transport- und Lageraufgaben existieren weitere Funktionen der Produktionslogistik ,wie z.B. (vgl. Schulte 2005, S. 343 [117]):

- die Schaffung einer materialflussgerechten Fabrikstruktur (Fabrikplanung),
- die Planung und Steuerung der Produktion sowie
- die interne Materialbereitstellung in Produktion und Montage.

Der Planungszeitraum für eine Neuplanung sowie Restrukturierungs- oder Erweiterungsplanung von Produktionsstätten ist eine mittel- bis langfristige Entscheidung, die in die strategische Unternehmensplanung einzubeziehen ist. Der Zeithorizont für Produktionsplanung und -steuerung ist in der Regel eher mittel- bis kurzfristig. Wird die Dauer und Stärke der Erfolgsauswirkungen als weiteres Kriterium berücksichtigt, kann eine Differenzierung zwischen strategisch-taktischer und operativer Produktionslogistik vorgenommen werden. Der Aufgabenbereich der strategisch-taktischen Produktionslogistik umfasst z.B. (vgl. Bloech/Ihde 1997 , S. 818 [23]):

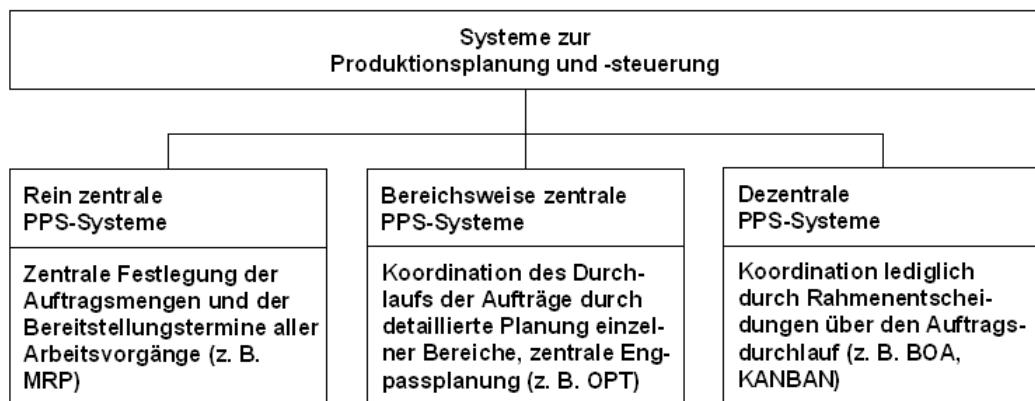
- die Wahl der Fertigungsstufen,
- innerbetriebliche Standortplanung,
- die Neuerrichtung oder den Ausbau geeigneter Fertigungssegmente und deren kapazitive Abstimmung,
- die Wahl der Bevorratungsebene,
- die Auswahl des Konzeptes für die Materialflussteuerung,
- die Auslegung der Transport- und Lagerkapazitäten.

Der operativen Produktionslogistik obliegt die Koordination und Kontrolle der Materialflüsse innerhalb und zwischen den Produktionsstätten. Ihre Aufgabe ist es, auf der Basis der tatsächlich vorhandenen oder prognostizierten Auftragslage, den Materialfluss nach Art, Menge und Zeit zu determinieren und die Auftragsabwicklung zu überwachen, somit hat sie sowohl planende als auch steuernde Funktionen (vgl. Bloech/Ihde 1997 , S. 819 [23]). Das Ziel der Produktionslogistik ist die Ermittlung der minimalen Logistikkosten bei einem angestrebten Servicegrad. Die Logistikkosten können wie folgt untergliedert werden (vgl. Bloech/Ihde 1997 , S. 818 [23]):

- Bestandskosten,
- Lagerkosten,
- Transportkosten,
- Handlingskosten und
- Kosten des Logistiksystems.

Da die Ermittlung der Logistikkosten sich in der Praxis oft als sehr schwierig erweist, werden diese üblicherweise durch entsprechende Zeit- und Mengengrößen ersetzt. Niedrige Lagerbestände und kurze Durchlaufzeiten dienen als Ersatzgrößen. Die Aufgabe der Produktionslogistik besteht nun darin, bei kurzen Durchlaufzeiten und niedrigen Lagerbeständen, die quantitative, qualitative und zeitliche Versorgung der Produktionsstandorte zu sichern.

Die Produktionslogistik galt bisher im Gegensatz zur Beschaffungs-, Distributions- und Entsorgungslogistik als gut kontrollierbar und langfristig optimierbar, da sie durch Puffer gegenüber Versorgungsengpässen und Marktschwankungen abgesichert war. Steigende Variantenvielfalt, kürzere Produktlebenszyklen und technologische Veränderungen mit der Zielsetzung die Fertigungsdurchlaufzeiten zu reduzieren, sind Gründe, die u.a. dafür verantwortlich sind, dass dies heute nur noch sehr selten der Fall ist. Aufgrund der engen Verknüpfung der Kundenaufträge mit der Fertigungssteuerung wird eine Just-in-time-Produktion mit bedarfsorientierten Losgrößen angestrebt, deren Handlungsmöglichkeiten durch angewandte Produktionsplanungs- und steuerungssysteme festgelegt werden (vgl. Ihde 1991, S. 215 [64]). Die Gestaltungsmöglichkeiten von PPS-Systemen hängen vom Zentralisationsgrad der zu treffenden Entscheidungen ab. Deshalb wird eine Untergliederung der Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung wie in Abbildung 2.2 vorgenommen.



**Abbildung 2.2:** Systematik der PPS-Systeme (vgl. Zäpfel/Missbauer 1987, S. 897 [162])

Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme sind EDV-gestützte Systeme, die zur Planung, Steuerung und Kontrolle des Materialflusses in logistischen Ketten eingesetzt werden (vgl. Domschke/Scholl/Voß 1993, S. 18 [40]). Ihre Aufgabe ist es, das komplexe Problem der Produktionsplanung und -steuerung mit seinen vielfältigen Teilproblemen und gegenseitigen zeitlichen und sachlichen Abhängigkeiten optimal zu lösen (vgl. Fandel/François/Gubitz 1997, S. 1 [46]). Mit den heutigen Rechenmethoden ist es nicht

möglich, alle Teilprobleme im Rahmen einer **Simultanplanung** zu lösen, deshalb wird bei den heutigen PPS-Systemen eine **Sukzessivplanung** bevorzugt. Bei dem Sukzessivplanungskonzept wird das Gesamtproblem der Produktionsplanung und -steuerung in mehrere Planungsphasen zerlegt; diese Phasen werden sukzessive betrachtet und die dort anfallenden Optimierungsprobleme werden in der Regel mit Heuristiken gelöst.

Das in den achtziger Jahren entwickelte **MRP II-Konzept** (Manufacturing Resource Planning) stellt die Basis zentraler PPS-Systeme dar (vgl. Glaser/Petersen 1996, S. 1407 [51]). Diese Systeme arbeiten nach dem Push-Prinzip (Bring-Prinzip) (vgl. Tempelmeier 2005, S. 305 [135]) und sind in die folgenden Planungsebenen eingeteilt (vgl. Fleischmann 1988, S. 347-372 [48]):

- Planung des aktuellen Produktionsprogramms,
- Materialbedarfsplanung,
- Durchlaufterminierung,
- Kapazitätsterminierung,
- Steuerung und Kontrolle der Produktion.

Bei der **Planung des aktuellen Produktionsprogramms** werden im Rahmen einer Primärbedarfsplanung die Absatz- bzw. Produktionsmengen für Ersatzteile und Endprodukte festgelegt. Dazu werden die Daten, die sich bei der Auswertung der konkreten Kundenaufträge und der Absatzprognosen ergeben, verwendet.

Ausgehend von den zuvor bestimmten Primärbedarfen werden die Sekundärbedarfsmengen für die Vor- und Zwischenprodukte mit Hilfe der **Materialbedarfsplanung** ermittelt. Je nachdem, ob sich die Materialbedarfsplanung über Stücklisten an den expliziten Bestimmungsgrößen aus dem Produktionsprogramm orientiert oder auf Verbrauchswerte der Vergangenheit zurückgreift, spricht man von **programmgebundener** oder **verbrauchsgebundener Materialbedarfsplanung** (vgl. Glaser 1986, S. 5 ff. und 29 ff. [50]; Reichwald/Dietel 1991, S. 498 ff. [106]). Daraus resultieren unter Berücksichtigung der aktuellen Lagerbestände, Bestellaufträge für fremdbezogene Güter und Fertigungsaufträge bei eigengefertigten Produkten.

Die Ausgangsdaten der **Durchlaufterminierung** bilden die während der Materialdisposition bestimmten Fertigungsaufträge (vgl. Glaser/Petersen 1996, S. 1409 [51]). Dabei erfolgt die Berechnung der groben Start- und Endtermine der Fertigungsaufträge zunächst ohne Berücksichtigung der Kapazitäten und Ressourcen. Im Anschluss werden die Fertigungsaufträge den Produktiveinheiten zugeteilt. Die sich daraus ergebenden Kapazitätsbelastungen werden den vorhandenen Kapazitäten der Produktiveinheiten gegenübergestellt. Bei einer Überlastung der Produktiveinheiten müssen die Fertigungsstarttermine einiger Aufträge verschoben werden.

Um dies zu vermeiden wird im Rahmen der **Kapazitätsterminierung** in jeder Periode ein Vergleich zwischen Kapazitätsnachfrage und Kapazitätsangebot durchgeführt. Treten hierbei in einer oder mehreren Perioden Ungleichgewichte auf, so wird durch einen Kapazitätsabgleich eine zeitliche Verschiebung der Fertigungsaufträge vorgenommen.

Nach der Freigabe der Fertigungsaufträge durchlaufen diese im Rahmen der **Produktionssteuerung** zuerst eine bezüglich der Fertigungsprioritäten durchgeführte Reihenfolgeplanung und danach ihre zeitliche Feinterminierung. Nachdem im Rahmen einer Verfügbarkeitsprüfung sichergestellt wurde, dass alle erforderlichen Produktionsfaktoren zum geplanten Zeitpunkt vorhanden sind, wird der Auftrag freigegeben (vgl. Domschke/Scholl/Voß 1993, S. 20 [40]). Während der Bearbeitung des Auftrags werden ständig die Ist- und Plandaten miteinander verglichen, um bei Soll - Ist - Abweichungen Korrekturen vornehmen zu können.

Trotzdem konnte sich das MRP II-Konzept nicht so richtig durchsetzen, wenn man die Anzahl der eingesetzten Systeme als Maßstab heranzieht. Zu späte Berücksichtigung der Kapazitäten, was zu erhöhten Lagerbeständen und Durchlaufzeiten führen kann und die nicht realisierbaren Resultate der Feinterminierung, die aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der Produktiveinheiten (z.B. Störungsfälle bei Maschinen) entstehen, sind Mängel, die sukzessive Planungssysteme aufweisen. Um sich dieser Problematik zu stellen, wurden neue Ansätze entwickelt, die eher dezentralen Charakter haben, wie z.B.:

- belastungsorientierte Auftragsfreigabe,
- retrograde Terminierung,
- Fortschrittzahlenkonzept,
- Just-in-time/Kanban,
- Steuerung und Kontrolle der Produktion,
- OPT-System (Engpasssteuerung),
- PPS-Systeme im Rahmen des CIM-Konzeptes.

Für eine genaue Erläuterung der Ansätze wird auf Domschke/Scholl/Voß 1993, S. 21-23 [40]; Schulte 2005, S. 418-437 [117]; Glaser/Petersen 1996, S. 1414-1416 [51] verwiesen.

Die heutigen praxisnahen Verfahren und Methoden zur Produktionsplanung und Steuerung sind sehr flexible, kostenorientierte Systeme, die die globalisierten Märkte berücksichtigen. Sie gewährleisten eine vollständige Integration zwischen technischen und betriebswirtschaftlichen Systemen, resultierend in einer effizienteren Fertigungssteuerung. Da in den meisten Fällen mittlerweile eine prozessorientierte Optimierung im Vordergrund steht, können auch kleine Unternehmen von den weniger komplexen PPS-Systemen profitieren.

### **2.2.3 Distributionslogistik**

Die Absatzlogistik, auch Distributionslogistik genannt, befasst sich mit der optimalen Distribution der Produkte und stellt somit die Verbindung zwischen der Produktion und der Absatzseite des Unternehmens dar. Sie umfasst alle Lager- und Transportvorgänge von Fertigfabrikaten, Handelswaren und ggf. Ersatzteilen von der Unternehmung zum Abnehmer sowie die damit verbundenen Informations-, Steuerungs- und Kontrolltätigkeiten. Ziel ist es, die richtige Ware zum richtigen Zeitpunkt, am richtigen Ort, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität und gleichzeitigem optimalen Verhältnis zwischen Lieferservice und anfallenden Kosten bereitzustellen (vgl. Schulte 2005, S. 455 [117]). Der Aufgabenbereich der Distributionslogistik lässt sich in langfristige und kurzfristige Problemstellungen wie folgt unterteilen (vgl. Bloech/Ihde 1997, S. 177 [23]):

**Langfristige Problemstellungen** betreffen:

- die Standortwahl der Distributionslager,
- die Planung der Transportverfahren,
- die Planung des Grades der Fremdlogistik,
- die Planung der Verpackungssysteme.

**Kurzfristige Problemstellungen** sind:

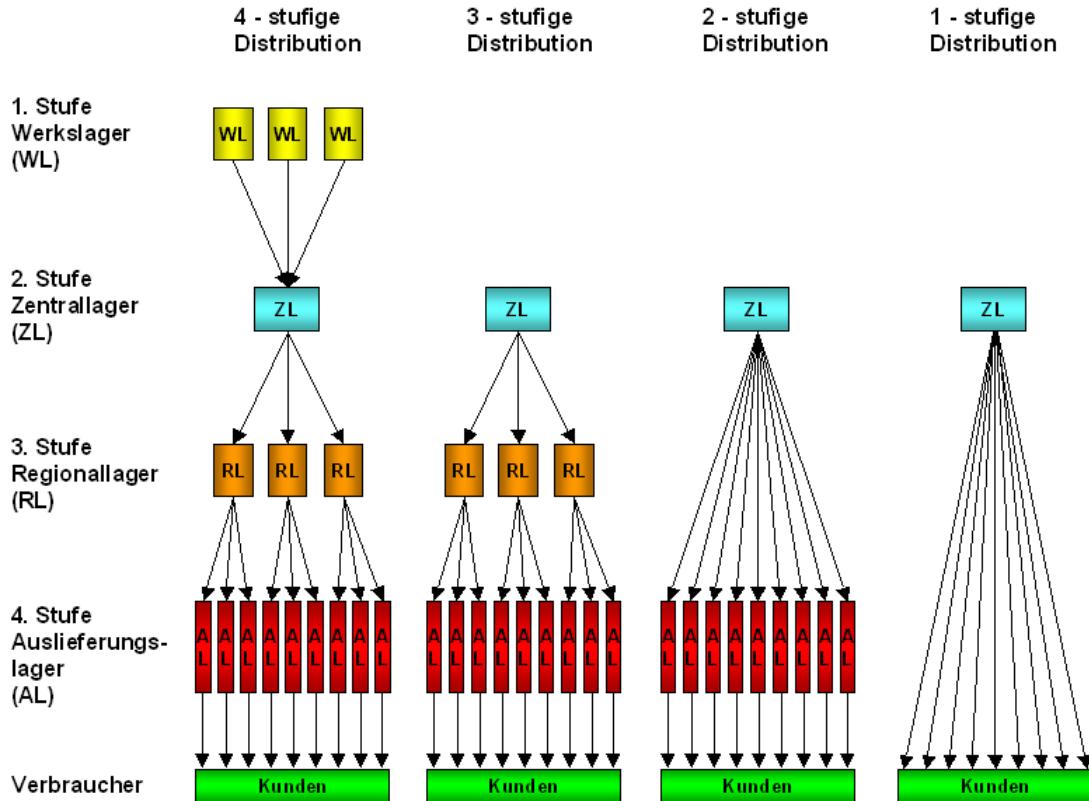
- Lagerhaltung,
- Kommissionierung und Verpackung,
- Tourenplanung mit Transportmitteleinsatzplanung, und Anlieferungsterminplanung,
- Auftragsabwicklung,
- Warenausgang und Ladungssicherheit.

Die Bestimmung des richtigen Standorts für die Zentral-, Regional- und Auslieferungslager ist von entscheidender Bedeutung, da es sich um einen dynamischen Prozess handelt, der unterschiedliche Marktanforderung und Kundenwünsche berücksichtigen muss.

Die Distributionsstruktur eines Warenverteilungssystems lässt sich durch die folgenden Elemente, die eng miteinander verbunden sind, beschreiben:

- Zahl der Lagerstätten,
- Zahl der unterschiedlichen Lagerstufen,
- Standorte der Lagerstätten sowie
- räumliche Zuordnung der Lagerstätten zu den jeweiligen Absatzgebieten.

In der Regel wird zwischen einer vertikalen und horizontalen Distributionsstruktur differenziert. Die **vertikale Distributionsstruktur** beschreibt, wie viele Distributionsstufen vorhanden sind. Hierbei kann zwischen vier verschiedenen Lagerarten unterschieden werden. In Abbildung 2.3 werden die unterschiedlichen Lagerstrukturen in der Distribution dargestellt, wobei das vierstufige Lagersystem in der Praxis eher selten vorkommt. Im



**Abbildung 2.3:** Lagerstufen bei horizontalen Distributionsstrukturen (in Anlehnung an Weber/Kummer 1998, S. 209 [152])

Anschluss wird auf die unterschiedlichen Lagertypen näher eingegangen (vgl. Wannenwetsch 2004, S. 260-261 [149]).

**Werkslager**, auch Fertigungslager genannt, sind räumlich bei einer Produktionsstätte angesiedelt. Sie nehmen deren Fertigwarenausstoß meist zum kurzfristigen Mengenausgleich auf und umfassen nur die vor Ort gefertigten Produkte, gegebenenfalls ergänzt durch Ersatzteile für die Prozessanlage (z.B. aufgearbeitete Armaturen).

**Zentrallager** sind dem Werkslager nachgeordnete Lagerstufen. Ihre Anzahl ist meist be-

grenzt, dennoch enthalten sie jeweils die gesamte Produktpalette des Unternehmens. Ihre Funktion besteht darin, Bestände nachfolgender Lagerstufen, sofern vorhanden, aufzufüllen. Bei einer zentralisierten Distributionsstruktur werden in den Zentrallagern die Waren in den jeweils vom Kunden bestellten Mengen und Sorten zur Auslieferung bereitgestellt.

**Regionallager** dienen als Puffer für die Produktion und den Absatzmarkt zur Entlastung vor- und nachgelagerter Lagerstufen innerhalb einer Absatzregion. Sie enthalten nur Teile des Sortiments und ihre Umschlagshäufigkeit ist wesentlich größer als die des Zentrallagers.

**Auslieferungslager** sind dezentral im gesamten Verkaufsgebiet verteilt und befinden sich auf der untersten Stufe der Lagerhierarchie. Sie enthalten, wie die Regionallager, nur die jeweils absatzstärksten Produkte der Region. Ihre Aufgabe besteht darin, die vom Kunden gewünschten Produkte bereitzustellen. Auslieferungslager sind einem bestimmten Verkaufsbezirk und den dazugehörigen Abnehmern zugeordnet.

Im Mittelpunkt der **horizontalen Distributionsstruktur** steht die Anzahl der Lager auf jeder Stufe und ihre unterschiedliche Standortbestimmung. Da die Auslieferungslager zahlenmäßig am stärksten vertreten sind und sich relativ weit ausdehnen bzw. aggregieren lassen, wird ihnen im Rahmen der horizontalen Distributionsstruktur die meiste Aufmerksamkeit geschenkt. Die Zuordnung der einzelnen Lager zu ihren Absatzgebieten, auch als „warehouse-location problem“ bezeichnet, ist ein Aspekt, der bei der Festlegung der Lagerstandorte zu beachten ist. Hierbei sind die folgenden Einflussfaktoren zu berücksichtigen (vgl. Schulte 2005, S. 464 [117]):

- Abnehmerkreis,
- Bestellmengen und Bestellfrequenz der Kunden,
- Produktionsstandorte und falls vorhanden, Aufbereitungs- und Recyclinganlagen sowie
- die daraus resultierenden Depot-, Lagerhaltungs-, Transport- und Auftragsabwicklungskosten zwischen den jeweilig vorhandenen Einrichtungen und den Lagern sowie für die Warenauslieferung als auch -rücknahme.

Um kostensenkende Maßnahmen bei der Distributionsstruktur durchführen zu können, ist es sehr wichtig, die unterschiedlichen Kosten und deren Zusammensetzung zu kennen. Diese werden deshalb wie folgt unterteilt (vgl. Bloech/Ihde 1997, S. 176 [23]):

- Die **Depotkosten** hängen von der Anzahl, dem Standort und der Kapazität der Depots (Lager, Umschlagepunkte) ab. Darüber hinaus haben Lagerstufen und die eingesetzte Lagertechnik, wie z.B. vollautomatische Hochregallager, einen Einfluss auf die Depotkosten.
- Die Höhe der **Lagerhaltungskosten** wird von dem Zentralisierungsgrad und der Selektivität der Lagerhaltung beeinflusst. Ferner werden durch das Lieferbereitschafts-

niveau, die Umschlagshäufigkeit, die Bestellpolitik und die Sicherheitsbestände sowie die Wertstruktur der Waren die Kosten der Bestandsführung determiniert.

- Die wichtigsten Einflussfaktoren der **Transportkosten** sind: Lieferfrequenz, Sendungsgröße, Stufigkeit, Gewicht-Volumen/Wert-Verhältnis, Tourenlänge, Fuhrparkgröße, Fuhrparkzusammenstellung, Art der Verkehrsträger und das verwendete Transportnetz.
- Die **Auftragsabwicklungskosten** hängen von der verwendeten Informations- und Kommunikationstechnologie, dem Automatisierungsgrad des Abwicklungsprozesses und der Struktur der Informations- und Kommunikationssysteme ab.

Abschließend wird auf die wichtigsten Konzepte zur Optimierung von Distributionssystemen eingegangen.

**Efficient Consumer Response (ECR)** (effiziente Reaktion auf die Kundennachfrage) zielt darauf ab, durch eine gute Zusammenarbeit von Herstellern und Handel, Waren- und Informationsflüsse zu optimieren, um Kosten zu senken. ECR lässt sich in Logistik- und Marketingkomponenten, siehe Abbildung 2.4, unterteilen.

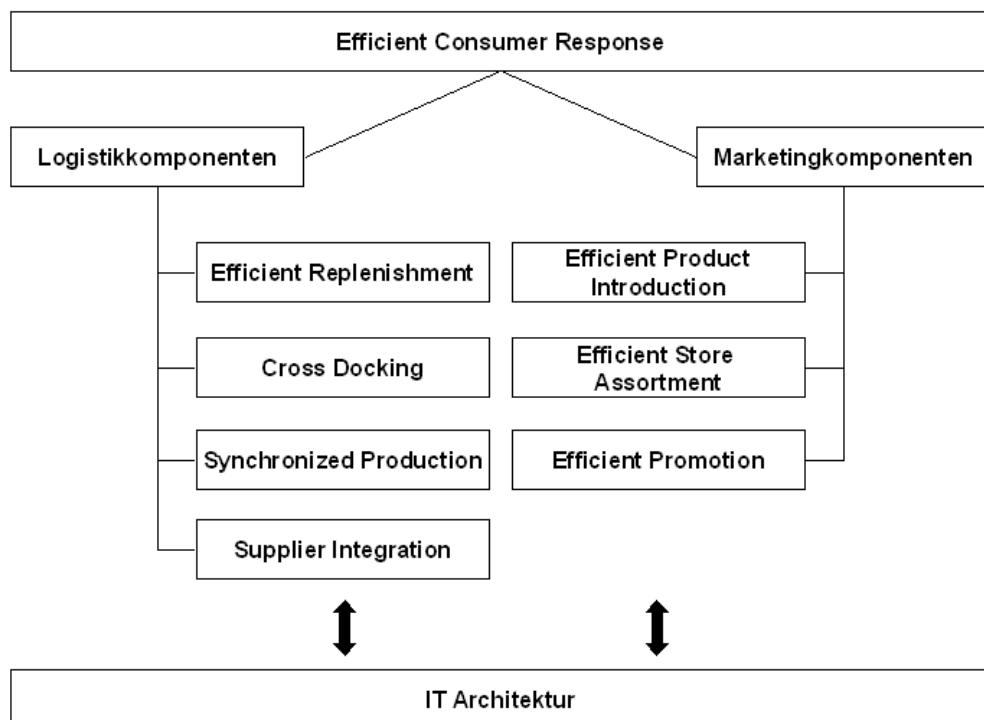


Abbildung 2.4: Bestandteile des ECR-Konzepts, (vgl. Werner 2000 S.54 [155])

Darüber hinaus existieren noch weitere ECR-Konzepte, wie z.B. Tower 24, Quick Response Logistik und Vendor Management Inventory. Für eine ausführliche Erläuterung der einzelnen Konzepte wird auf Wannenwetsch 2004, S. 263-270 [149] verwiesen.

Ein weiteres Konzept ist das „**Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR)**“, auch bekannt als „kooperatives Planen, Prognostizieren und Managen von Warenströmen“. Zentraler Punkt dabei ist die Erstellung einer möglichst genauen Bedarfsprognose durch ein Planungsteam bestehend aus Marketingmitarbeitern und Logistikern. Der Aufgabenbereich des Teams beinhaltet im Wesentlichen (vgl. Wannenwetsch 2004, S. 271 [149]):

- die Planung der Promotionsaktivitäten und Prognose der Promotionsvolumina,
- die Kontrolle der Filialbestellung und -bestände und Monitoring der Promotionsumsätze
- und die Abschätzung der Promotion nach Beendigung.

Ziel des CPFR-Prozesses ist die Reduzierung der Lagerbestände sowie die Vermeidung von Versorgungsengpässen. Hierbei ist die uneingeschränkte Zusammenarbeit der CPFR-Partner (Käufer und Verkäufer) von essenzieller Bedeutung, um eine Optimierung der Wertschöpfungskette vornehmen zu können.

Abschließend werden **Telematiksysteme und Strategien der Sendungsverfolgung** noch kurz erläutert. Die wesentlichen Bestandteile der Telematik sind die Telekommunikation und die Informatik. Die Telematik verknüpft die Technologiebereiche Telekommunikation und die Informatik miteinander. Durch die Einbeziehung des Internets bietet die Telematik jedem Unternehmen im Bereich der internen und externen Logistik Einsparpotenziale. Zu den wichtigsten Vorteilen der internetbasierten Telematiksysteme zählen (in Anlehnung an Lang 2002, in Wannenwetsch/Nicolai, S.186 [150]):

- Abbildung des gesamten Logistikprozesses von Bestellung bis zur Sendungsverfolgung,
- Ortung und Routenplanung, Kommunikation zwischen Disponent und Fahrer,
- Leistungsvergleiche zwischen Fahrern,
- Kosten- und Leistungsvergleiche zwischen Fahrzeugen.
- Verringerung der Leerfahrten und bessere Koordination der Einsatzzeiten,
- bessere Kommunikation mit Kooperationspartnern und Kunden,
- Optimierung der wartungsbedingten Stillstandzeiten.

In der Praxis wenden Unternehmen Tracking und Tracing, Barcoding, Transpondertechnologien und Global Positioning System (GPS) an, um Sendungen zu verfolgen. Für eine genaue Erläuterung dieser Telematiksysteme wird auf Wannenwetsch 2004, S. 274-278 [149] verwiesen.

## 2.2.4 Entsorgungslogistik und Reverse-Logistik

Der Begriff **Entsorgung** umfasst die geordnete Beseitigung und umweltgerechte Verwertung und Verwendung von Abfällen und alle dazu erforderlichen planenden und ausführenden Tätigkeiten. In den letzten Jahren hat die Entsorgung der Reststoffe, die bei der betrieblichen Leistungserstellung in den Unternehmen anfallen, stark an Bedeutung gewonnen. Für diese Entwicklung waren die folgenden Einflussfaktoren verantwortlich (vgl. Werner 2000, S. 77 ff. [155]):

- steigende Entsorgungskosten durch knapper werdenden Deponieraum und Akzeptanzprobleme der Müllverbrennung,
- Umweltverträglichkeit als Wettbewerbsfaktor,
- gestiegenes Umweltbewusstsein der Bevölkerung und Unternehmen,
- strengere gesetzliche Rahmenbedingungen,
- immer mehr entsorgungspflichtige Produkte.

Neben den Aufarbeitungs- und Entsorgungsprozessen ist die **Entsorgungslogistik** einer der wichtigsten Teilprozesse der Entsorgung. Die Entsorgungslogistik ist der Teilbereich der Logistik, der sich mit den der Wertschöpfungskette entgegengerichteten Güterflüssen sowie den zugehörigen Informationsflüssen befasst. Objekte der Entsorgungslogistik sind die bei Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Logistikprozessen als unerwünschte Kuppelprodukte anfallenden Rückstände und Abfälle (vgl. Stevens/Laarmann 2005, S. 97 [128]). In Tabelle 2.1 werden die Unterschiede der Entsorgungslogistik gegenüber den versorgungsorientierten logistischen Subsystemen hinsichtlich des Objektbereichs dargestellt.

Während sich die traditionelle Logistik, auch als Versorgungslogistik bezeichnet, mit dem Materialfluss beschäftigt, der bei den Lieferanten beginnt und den Verbrauchern endet, haben entsorgungslogistische Güterflüsse ihren Ursprung beim Kunden, dem Ort der Rückstandsentstehung, und enden am Ort der Rückstandsverwertung oder -beseitigung. Die der Versorgungslogistik entgegengesetzte Flussrichtung der Entsorgungslogistik kommt besonders in dem zusätzlich die Retourenlogistik und die Behälterlogistik (vgl. Steven/Tengler/Krüger 2003 [129]) umfassenden Begriff Reverse-Logistik zum Ausdruck.

Im Hinblick auf die Präzisierung der entsorgungslogistischen Aufgabenbereiche sind die unterschiedlichen Prozesse zu identifizieren, die eine Transformation des Reststoffprofils an der Quelle (Anfallstelle) in das gewünschte Reststoffprofil der Senke (Ort des Wiedereinsatzes oder der Beseitigung) gewährleisten. Zu diesen Transformationen zählen im Einzelnen Änderungen in der Zeit-, Raum-, Mengen- und Sortenstruktur, Änderungen der Eigenschaften für Lagerung, Transport, Umschlag, Sammlung und Trennung sowie Änderungen der logistischen Determiniertheit von Reststoffen. Daraus lassen sich als

**Tabelle 2.1:** Charakterisierung der Entsorgungslogistik gegenüber den versorgungsorientierten logistischen Subsystemen (in Anlehnung an Stölzle 1993, S. 200 [131])

Subsysteme der Logistik nach den Phasen des Stoffstromes	Objektbereich	Flussrichtung	Formalziel-orientierung	Ausgewählte ökologische Sachziele
Beschaffungslogistik	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Kaufteile und Handelswaren	Versorgung von Bedarfsträgern	Ökonomische und ökologische Ziele	Umweltschutz-orientierte Lieferantenwahl
Produktionslogistik	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Zwischen- und Endprodukte	Versorgung von Bedarfsträgern	Ökonomische und ökologische Ziele	Wahl emissionsarmer Fördermittel
Distributionslogistik	Endprodukte Handelswaren	Versorgung von Bedarfsträgern	Ökonomische und ökologische Ziele	Einsatz möglichst weniger und umweltgerechter Verpackungen
Entsorgungslogistik	Reststoffe	Vom Ort der Reststoffentstehung zum Ort des Wiedereinsatzes oder der geordneten Beseitigung	Ökonomische und ökologische Ziele	Erhöhung der Wiedereinsatzquote von Reststoffen durch getrennte Sammlung

zugehörige Logistikprozesse und auch als entsorgungslogistische Aufgabenbereiche die Lagerung, der Transport, der Umschlag, die Sammlung und Trennung, die Verpackung und die Auftragsabwicklung unterscheiden (vgl. VDI 1086 1993, S. 27 [143]). Diese entsorgungslogistischen Aufgabenbereiche werden nun ausführlich analysiert (in Anlehnung an VDI 1086 1993, S. 29 [143]).

## Lagerung

Als Teilaufgaben der Lagerung lassen sich die Lagerhaltung und das Lagerhaus differenzieren. Die wichtigste Funktion bei der Lagerhaltung von Reststoffen ist, zeitlich nicht abgestimmte Prozesse zu überbrücken. Eine wesentliche Voraussetzung für die planmäßige Lagerhaltung von Reststoffen stellt die Ermittlung des Bedarfs an Lagerkapazität dar. Bei einer deterministischen oder programmgebundenen Bedarfsermittlung wird der Reststoffanfall nach Art und Menge, auf der Basis eines geplanten Produktionsprogramms oder Kundenauftrags, analytisch ermittelt. Eine andere Alternative stellt die stochastische oder verbrauchsgebundene Bedarfsermittlung dar, die ausgehend vom Reststoffanfall vergleichbarer Perioden der Vergangenheit versucht, mit Hilfe von Prognoseverfahren den

Lagerbedarf an Reststoffen für die zu planende Periode zu ermitteln. Für den Fall, dass die Bedingungen der deterministischen und stochastischen Bedarfsermittlung nicht erfüllt und größere Ungenauigkeiten toleriert werden können, kommen Methoden der subjektiven Schätzung zum Einsatz.

Der Aufgabenkomplex Lagerhaus ist eng verbunden mit der Bedarfsermittlung, weil die Ergebnisse der Bedarfsermittlung zur kapazitiven Auslegung des Lagerhauses für Reststoffe herangezogen werden. Im Zuge der Lagerorganisation wird bei einem Lagerhaus im Wesentlichen die Lagerbauform und Lagerplatzzuordnung festgelegt. Bei der Lagerplatzzuordnung stellt sich die Frage, für jede Rohstoffart eine separate Lagerzone auszuweisen oder eine gemeinsame Nutzung einer Lagerfläche durch mehrere Reststoffarten zuzulassen. Generell müssen die Reststoffe in ihren Behältern deponiert werden, so dass sie sich nicht vermischen können. Bei der Auswahl der Lagerbauform stehen als Alternativen Freiläger, überdachte oder geschlossene Läger und vollautomatisierte Hochregalläger zur Verfügung.

## Transport

Das entsorgungslogistische Subsystem Transport sorgt für den Transformationsprozess der Raumüberbrückung von Reststoffen und übernimmt somit eine Beförderungsfunktion. Die charakteristischen Eigenschaften des Reststofftransports liegen in der Inhomogenität der Transportobjekte, der Komplexität der Transportleistungen, der hohen Transportempfindlichkeit, dem hohen Risiko unfallbedingter Umweltbelastungen und der Problematik der Vermeidung von Leerfahrten begründet.

Der **außerbetriebliche Transport** kann in die Etappen Sammel-, Nah- und Ferntransport unterteilt werden. Mit dem Sammeltransport werden die erforderlichen Beförderungsvorgänge zur Sammlung der Rückstände durchgeführt. Der Nahtransport, ein Direkttransport, überbrückt die Strecke von einem Zwischenlager zu einer Umladestation, einer Aufbereitungs- oder Behandlungsanlage. Gegenstand des Ferntransportes ist der konsolidierte Transport der Rückstände zum Ort ihres Wiedereinsatzes oder ihrer Beseitigung (z.B. Deponie oder Müllverbrennungsanlage). Bei Sammel- und Nahtransporten dominiert als Verkehrsträger die Straße, da Gleis- und Wasserstraßenanschlüsse meistens nicht vorhanden sind. Für Ferntransporte wird die Eisenbahn und die Binnenschifffahrt bevorzugt.

Der **innerbetriebliche Transport** umfasst den mit der Sammlung verbundenen Transport von den Anfallstellen bis zum Zwischenlager, die Bewegungsprozesse innerhalb eines Lagers sowie den Transport vom Zwischenlager zu einer innerbetrieblichen Aufarbeitungsanlage bzw. der Sammelstelle für den außerbetrieblichen Transport. Ein wichtiges Entscheidungskriterium stellt die Wahl der einzusetzenden Fördermittel sowie die Transportorganisation dar. Als Fördermittel können Stetig- oder Unstetigförderer eingesetzt werden. Stetigförderer kommen bevorzugt zum Einsatz, wenn Reststoffe in größeren Men-

gen für einen längeren Zeitraum über eine vorgegebene Strecke zu transportieren sind. Die Transportorganisation beinhaltet die Einsatzmodalitäten der Fördermittel. Der Direktverkehr ist dadurch gekennzeichnet, dass die Fördermittel unmittelbar zwischen jeder Anfallstelle und der entsprechenden Abladestelle eingesetzt werden. Müssen auf einer Tour diverse Quellen angefahren werden, handelt es sich um Stern- oder Ringverkehr.

## **Umschlag**

Umschlagprozesse finden statt, wenn ein Wechsel des Transportmittels oder eine Zwischenlagerung des Transportgutes erfolgt. Im Fall der Bildung logistischer Einheiten bestehen Schnittstellen zu den Aufgabenbereichen Verpackung, Lagerung und Transport. Die Anzahl der entsorgungslogistischen Umschlagprozesse sollte aus Kosten- und ökologischen Gründen möglichst gering gehalten werden. In Analogie zu den Fördermitteln werden stetige und unstetige Umschlagmittel bezüglich der Kontinuität des Umschlagmittel-einsatzes differenziert. Zu den stetigen Umschlagmitteln zählen Band- und Kreisförderer oder Rutschen und Rollbahnen. Gabelstapler, Drehkräne, Hebebühnen und Hängebahnen werden den unstetigen Umschlagmitteln zugeordnet. Bei der Umschlagorganisation kommen als Gestaltungsalternativen das Umleer- und das Wechselverfahren in Frage (vgl. Schulte 2005, S. 515 [117]). Im Fall des Umleerverfahrens werden die Rückstände aus einem Behälter heraus umgefüllt. Die unmittelbare Umfüllung von Reststoffen aus einem Behälter in einen anderen Behälter wird als direktes Umleerverfahren bezeichnet. Bei der indirekten Umleerung werden die Reststoffe zunächst zwischengelagert, um erst zu einem späteren Zeitpunkt wieder in einen Behälter gefüllt zu werden. Das Wechselverfahren ist eine Methode der Abfallsammlung, bei der gefüllte Abfallcontainer gegen leere ausgewechselt werden. Das Umleerverfahren eignet sich besonders gut für die Sammlung von Siedlungsabfällen, das Wechselverfahren hingegen ist bei der Sammlung sperriger Abfälle (z.B. Sperrmüll) oder bei Abfällen mit hoher Dichte (z.B. Bodenaushub, Bauschutt) im Vorteil.

## **Sammlung und Trennung**

Da die Verfahren der Sammlung von Reststoffen und die Reststofftrennung meistens miteinander kombiniert werden, ist es sinnvoll, diese zu einem Aufgabenbereich zusammenzufassen. Dieser Aufgabenbereich ist eng mit der Forderung inhomogener Reststoffströme verbunden. Die Zielsetzung dieses entsorgungslogistischen Subsystems ist es, die Sortenreinheit der Rückstände gemäß den Anforderungen der Rückstandssenken zu erhöhen. Hierbei ist die Organisation der Sammlung und Trennung sowie das Sammelprinzip von großer Bedeutung. Für die Organisation von Sammlung, Trennung und Sortierung kommen die folgenden Modelle in Betracht (in Anlehnung an Schulte 2005, S. 516 [117]):

- gemischte Sammlung ohne nachträgliche Trennung und Sortierung,
- gemischte Sammlung mit nachträglicher Trennung und Sortierung,
- getrennte Sammlung am Ort der Entstehung.

Aus den Bereitstellungsprinzipien in der versorgungsorientierten Logistik lassen sich die Gestaltungsalternativen des Sammelprinzips entwickeln. In der Entsorgungslogistik ist zu prüfen, in welcher zeitlichen Relation zur Entstehung der Reststoffe deren Sammlung erfolgt. Dabei wird zwischen der synchronen und nicht synchronen Sammlung unterschieden. Während bei der synchronen Sammlung durch die Entstehung eines Reststoffes sofort ein Sammelzyklus erfolgt, wird bei der nicht synchronen Sammlung unabhängig vom Zeitpunkt der Reststoffentstehung die Sammlung ausgelöst. Bei letztgenannter Konstellation wird weiterhin zwischen der regelmäßigen und unregelmäßigen Sammlung unterschieden.

## **Verpackung**

Einerseits sind Packgüter in der Entsorgungslogistik gleichzusetzen mit den Reststoffen, andererseits können Verpackungen Reststoffe aufnehmen. Besondere Bedeutung kommt im Rahmen der Entsorgungslogistik der Schutzfunktion gegenüber der Umwelt zu. Die unterschiedlichen Anforderungen an die Verpackungsgestaltung ergeben sich aus den spezifischen Merkmalen der Reststoffe (Form, Art, Masse, Gewicht, umweltrelevante Eigenschaften) und den übrigen entsorgungslogistischen Aufgabenfeldern. Die Zielsetzung bei der Auswahl der Verpackung ist neben dem reinen Verpackungsprozess immer auch die Bildung von optimalen Ladeeinheiten. Als logistische Ladeeinheiten kommen neben Paletten hauptsächlich Behälter in Frage. In der Regel wird bei den Behälterformen in Abhängigkeit von den Funktionsanforderungen zwischen tragenden, umschließenden und abschließenden Behältern differenziert. Zu den tragenden Behältern zählen alle Varianten von Paletten. Umschließende Behälter sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zusätzliche Seitenwände aufweisen und nach oben geöffnet sind. Hierbei kommen Gitterboxpaletten, Mulden und oben offene Container am häufigsten zum Einsatz. Abschließende Behälter sind umschließende Behälter mit fester Höhenbegrenzung. Im Entsorgungsbereich erfüllen Sicherheitsbehälter eine Schutzfunktion und gewährleisten, dass keine umweltgefährdenden Stoffe entweichen können.

## **Auftragsabwicklung**

Die Auftragsabwicklung umfasst die Übermittlung, Aufbereitung und Umsetzung von Aufträgen, bis hin zu deren Fakturierung und stellt somit mit dem durch sie bewirkten Informationsfluss die Koordination der einzelnen logistischen Prozesse sicher. Die Auftragsabwicklung im Entsorgungsbereich ist fokussiert auf den umweltschutzrelevanten Informationsfluss, da im Gegensatz zur Auftragsabwicklung in der Versorgungslogistik rechtliche Vorschriften zu berücksichtigen sind. Nach Maßgabe der Unterscheidung von internen und externen Aufträgen bietet sich als Entscheidungstatbestand der Schwerpunkt der am Austausch der einschlägigen Informationen Beteiligten an. Hierbei wird eine Differenzierung zwischen einem intra- und einem interorganisatorischen Schwerpunkt vorgenommen. Während beim intraorganisatorischen Schwerpunkt entsorgungslogistisch relevante Informationen im Wesentlichen zwischen den Mitarbeitern eines Unternehmens

ausgetauscht werden, findet beim interorganisatorischen Schwerpunkt ein lebhafter Informationsaustausch mit externen Adressaten statt. Dieser Informationsaustausch kann einen großen Umfang fremdvergebener Prozesse zum Ausdruck bringen oder eine solche Ausgliederung in die Wege leiten. In der Tabelle 2.2 sind sämtliche Gestaltungsalternativen der entsorgungslogistischen Aufgabenbereiche zusammengefasst.

**Tabelle 2.2:** Gestaltungsalternativen der entsorgungs- und rückführlogistischen Aufgabenbereiche im Überblick (in Anlehnung an Stölzle 1993, S. 252 [131])

Aufgabenbereich	Entscheidungstatbestand	Gestaltungsalternativen
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bedarfsermittlung für den benötigten Lagerraum</li> <li>– Lagerplatzzuordnung</li> <li>– Lagerbauform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benötigter Lagerraum</li> <li>• Benötigte Lagerfläche</li> <li>• Getrennte Lagerzonen</li> <li>• Gemeinsame Lagerzonen</li> <li>• Frei</li> <li>• Überdacht</li> <li>• Geschlossen</li> </ul>
Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fördermitteleinsatz</li> <li>– Transportorganisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stetige Fördermittel</li> <li>• Unstetige Fördermittel</li> <li>• Direktverkehr</li> <li>• Stern- oder Ringverkehr</li> </ul>
Umschlag	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Umschlagmitteleinsatz</li> <li>– Umschlagorganisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stetige Umschlagmittel</li> <li>• Unstetige Umschlagmittel</li> <li>• Umleerverfahren</li> <li>• Wechselverfahren</li> </ul>
Sammlung und Trennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organisation der Sammlung und Trennung</li> <li>– Sammelprinzip</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Getrennte Sammlung</li> <li>• Gemischte Sammlung mit nachträglicher Trennung</li> <li>• Gemischte Sammlung ohne nachträgliche Trennung</li> <li>• Synchron</li> <li>• Regelmäßig</li> <li>• Unregelmäßig</li> </ul>
Verpackung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Form der Behälter in Abhängigkeit ihrer Funktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tragend</li> <li>• Umschließend</li> <li>• Abschließend</li> </ul>
Auftragsabwicklung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schwerpunkt der Unternehmenszugehörigkeit der am Austausch der Information Beteiligten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intraorganisatorischer Schwerpunkt</li> <li>• Interorganisatorischer Schwerpunkt</li> </ul>

Die **Reverse-Logistik**, im Deutschen auch als Rückführ- oder Rückwärts-Logistik bezeichnet, umfasst die Aktivitäten der Sammlung, Sortierung, des Transportes und der Lagerung von Altprodukten, Bauteilen oder Stoffen zwischen verschiedenen Anfallorten,

stofflichen Verwertungsanlagen und Einsatzorten sowie die Organisation dieser Aktivitäten (vgl. Brenck/Rutkowsky/Ziegler/Weiland 1996, S. 87 [26]). Die Aufgabenbereiche der Entsorgungs- und Rückführlogistik weisen viele Parallelen auf; deshalb ist es schwer, eine eindeutige Abgrenzung vorzunehmen. Da das Forschungsgebiet der Rückführlogistik sehr umfangreich ist, ist es sinnvoll die einzelnen Forschungsfelder zu klassifizieren. Die Aufstellung in Tabelle 2.3 zeigt die große Spannweite der Rückführlogistik und die unterschiedlichen Gliederungskriterien und deren Ausprägungen.

**Tabelle 2.3:** Klassifizierung von möglichen Forschungsfeldern im Bereich der Rückführlogistik (in Anlehnung an Letmathe , S. 7 [79])

	Ausprägungen				
	I	II	III	IV	V
<b>Fokus</b>	Betrieb	Logistik-dienstleister	Zulieferer	Kunde	Supply Chain
<b>Funktion</b>	Beschaffung	Produktion	Absatz	Entsorgung	Logistik
<b>Rückgabe-grund</b>	Produktions-rückstand	Rückgaberecht	Verpackung	Garantiefall	Ende der Nutzungsdauer
<b>Betrachtungs-richtung</b>	vorwärts	rückwärts	Kombination		
<b>Gegenstand</b>	Stoffflüsse	Informations-flüsse	Anreizsysteme	Kombination	
<b>Unsicherheit</b>	Volumina von Rücklaufströmen	Rückgabezeitpunkte	Qualität von Rücklaufströmen	Preise von Rücklaufströmen	technologische Unsicherheit
<b>Methoden</b>	qualitativ	quantitativ-deterministisch	quantitativ-stochastisch	empirisch	
<b>Interesse</b>	ökonomische Aspekte	rechtliche Aspekte	ökologische Aspekte	Kombination	
<b>Produkt-bezug</b>	allgemein	Altfahrzeuge	Elektroschrott	Gebäude	sonstige Altprodukte z.B. Armaturen
<b>Lebens-zyklusphase</b>	Vorleistungsphase	Marktphase	Recyclingphase	Nachleistungsphase	phasen-übergreifend
<b>Aufarbei-tungsstrategie</b>	produkt-bezogen	bauteil-bezogen	materialbe-bezogen	Teilever-schrottung	Kombination
<b>Recycling-strategie</b>	produkt-bezogen	bauteil-bezogen	materialbe-bezogen	Beseitigung	Kombination

Sowohl bei der Entsorgungslogistik als auch bei der Rückführlogistik entstehen Kosten für Transport, Lagerung, Umschlag, Sammlung, Trennung und Konditionierung und Auf-

bereitung durch die Überbrückung der Diskrepanzen zwischen Anfallorten und den Verwertungsoptionen. Die Identifizierung und Abgrenzung der Aufgabenbereiche mit ihren Entscheidungstatbeständen und Gestaltungsalternativen stellt eine wichtige Voraussetzung zur Erfassung von Entsorgungslogistik- und Rückführlogistikkosten dar.

Im Hinblick auf eine verursachungsgerechte Kostenverrechnung sind hierbei leistungsbezogene Verrechnungssätze zu bilden, zu deren Ermittlung die folgenden Schritte notwendig sind (in Anlehnung an VDI 1086 1993, S. 34 [143]):

- Aufdeckung der Abhängigkeiten der entsorgungs- und rückführlogistischen Kostenkomponenten von den entsprechenden Leistungen mit Hilfe von messbaren Bezugsgrößen,
- Trennung der entsorgungs- und rückführlogistischen Kosten in fixe und variable Kostenbestandteile,
- für die variablen Kostenbestandteile müssen leistungsbezogene Verrechnungssätze, in Anlehnung an die entsorgungs- und rückführlogistischen Aufgabenbereiche mit ihren jeweiligen Bezugsgrößen, ermittelt werden.

Vor diesem Hintergrund ist die Wahl der Bezugsgrößen von großer Bedeutung für die Kostenerfassung. Dabei kommen grundsätzlich für jeden entsorgungs- und rückführlogistischen Aufgabenbereich mehrere Bezugsgrößen in Frage. In Tabelle 2.4 werden mögliche Bezugsgrößen unter Berücksichtigung der jeweiligen Entscheidungstatbestände und Gestaltungsalternativen dargestellt.

Die große Vielfalt an Bezugsgrößen in Tabelle 2.4 ist für die betriebliche Anwendung eher unpraktisch. Deshalb ist eine unternehmensspezifische Auswahl aus den möglichen Bezugsgrößen vorzunehmen. Diese Auswahl hängt im Wesentlichen von dem Ausmaß ab, in dem im Unternehmen Informationen über die entsorgungs- und rückführlogistischen Aufgabenbereiche zur Verfügung gestellt werden (vgl. Pfohl/Stölzle 1992b, S. 203-205 [100]).

Wird eine hinreichende Verfeinerung im Rahmen der Identifizierung und Abgrenzung der entsorgungslogistischen Prozesse innerhalb der entsorgungs- und rückführlogistischen Aufgabenbereiche vorgenommen, wäre es denkbar, die Erfassung und Verrechnung der Kosten mit dem Instrument der Prozesskostenrechnung vorzunehmen. Die in Tabelle 2.4 beschriebenen Bezugsgrößen müssten dann als „cost drivers“ für die leistungsmengeninduzierten entsorgungs- und rückführlogistischen Prozesse formuliert werden (vgl. VDI 1086 1993, S. 36 [143]). Abschließend kann festgehalten werden, dass die Minimierung der entsorgungs- und rückführlogistischen Kosten von essentieller Bedeutung für die Unternehmen ist, um konkurrenzfähig zu bleiben.

**Tabelle 2.4:** Entsorgungs- und rückführlogistische Aufgabenbereiche und mögliche zugehörige Bezugssgrößen (in Anlehnung an Stölzle 1992, S. 96 [130])

Aufgabenbereich	Entscheidungstatbestand	Gestaltungsalternativen
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bedarfsermittlung für den benötigten Lagerraum</li> <li>- Lagerplatzzuordnung</li> <li>- Lagerbauform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benötigter Lagerraum</li> <li>• Benötigte Lagerfläche</li> <li>• Zahl der gelagerten Reststoffarten</li> <li>• Lagervolumen</li> <li>• Lagerdauer</li> </ul>
Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fördermitteleinsatz</li> <li>- Transportorganisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportlänge</li> <li>• Transportleistung</li> <li>• Transportgeschwindigkeit</li> <li>• Transportvolumen</li> <li>• Transportgewicht</li> </ul>
Umschlag	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umschlagmitteleinsatz</li> <li>- Umschlagorganisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der umgeschlagenen Reststoffarten</li> <li>• Dauer der Umschlagprozesse</li> <li>• Umschlagvolumen</li> <li>• Umschlaggewicht</li> </ul>
Sammlung und Trennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organisation der Sammlung und Trennung</li> <li>- Sammelprinzip</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der Reststoffarten pro Anfallstelle</li> <li>• Volumen der zu trennenden Reststoffarten</li> <li>• Gewicht der zu trennenden Reststoffarten</li> <li>• Dauer der Sammlung</li> <li>• Füllzeit der Behälter</li> <li>• Anzahl der Anfallstellen</li> </ul>
Verpackung	- Form der Behälter in Abhängigkeit ihrer Funktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Behältervolumen pro Behälterform</li> <li>• Umlaufzahl pro Behälterform</li> </ul>
Auftragsabwicklung	- Schwerpunkt der Unternehmenszugehörigkeit der am Austausch der Information Beteiligten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der internen und externen Entsorgungsaufträge</li> <li>• Zahl der beauftragten Entsorgungsunternehmen</li> </ul>

# 3 Grundlagen des Netzwerk-Designs

In diesem Kapitel werden herkömmliche Supply Chains und Closed-Loop Supply Chains, auch als Reverse-Logistik-Netzwerke bezeichnet, untersucht. Die Unterschiede in den Netzwerkstrukturen werden herausgearbeitet und die daraus resultierenden fallspezifischen Probleme vorgestellt.

## 3.1 Supply Chains und Supply Chain Management

Die Verschärfung des Wettbewerbs in der aktuellen Wirtschaft, die auf die zunehmende Globalisierung und die steigende Dynamik der Märkte zurückzuführen ist, stellt immer höhere Anforderungen an die Unternehmen. In der Vergangenheit wurden von den Unternehmen die Bereiche Beschaffung, Produktion und Absatz oft getrennt optimiert. Um konkurrenzfähig zu bleiben, müssen die einzelnen Geschäftsprozesse besser aufeinander abgestimmt werden, um niedrigere Kosten, kürzere Durchlaufzeiten und einen höheren Servicegrad zu erreichen. Viele dieser Geschäftsprozesse erstrecken sich entlang einer **Supply Chain** (Wertschöpfungskette), auch als unternehmensübergreifendes virtuelles Netzwerk bezeichnet, siehe Abbildung 3.1, deren optimale Gestaltung im heutigen Wettbewerb immer mehr an Bedeutung gewinnt und oft den Schlüssel zum Unternehmenserfolg darstellt. Sehr schöne Beispiele für Supply Chains können in der Automobil-, Lebensmittel- und Textilbranche beobachtet werden. Diese Supply Chains müssen sich

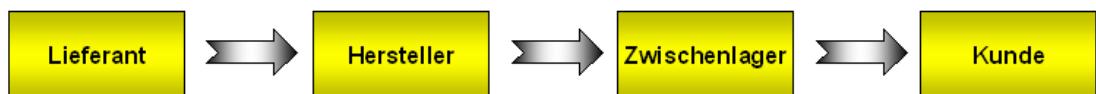


Abbildung 3.1: Logistische Wertschöpfungskette

den wachsenden Herausforderungen stellen, wie z.B. einer schnelleren Ablieferung, individuellen Kundenwünschen, präzisen Lieferzusagen und termingerechten Lieferungen. Außerdem muss eine moderne Wertschöpfungskette schnell und problemlos auf Nachfrageschwankungen, wechselndes Kundenverhalten und Marktveränderungen abgestimmt werden können. Um sich Wettbewerbsvorteile auf dem Markt zu verschaffen und zu

sichern, müssen die Herausforderungen innerhalb der logistischen Wertschöpfungskette erfolgreich gemeistert werden, und zwar entlang der gesamten Versorgungskette.

Es reicht also nicht aus, nur einzelne Elemente der Versorgungskette zu verbessern, da hierbei ungewollte Effekte auftreten können. So sind beispielsweise eine höhere Auslastung der Kapazitäten und eine Minimierung des Lagerbestandes für sich gesehen zwei sinnvolle Ziele. Die direkte Konsequenz dieser Maßnahmen kann jedoch ein schlechterer Kundenservice sein, da die Aufträge nicht mehr rechtzeitig erfüllt werden können. Aufwändig akquirierte Kunden wechseln gegebenenfalls zu Mitbewerbern, was für ein Unternehmen den Weg in den Ruin bedeuten kann.

Unter **Supply Chain Management (SCM)** versteht man die optimale Gestaltung des Informations- und Materialflusses zur Leistungserstellung von Erzeugnissen (Leistung) im gesamten Logistiknetzwerk, unter Verwendung geeigneter Planungs- und Kommunikationstechnologien. Der Aufgabenbereich des Supply Chain Managements erstreckt sich sowohl auf unternehmensinterne Prozesse als auch auf die Vernetzung mit Lieferanten und Kunden. Bezuglich der internen Supply Chain ist man bestrebt, Kommunikations- und Materialflüsse zwischen allen an der Wertschöpfungskette beteiligten Abteilungen zu optimieren. Die unternehmensintegrierte Supply Chain konzentriert sich auf eine schnelle und einfache Überbrückung der Schnittstellen zwischen internen und externen Bereichen (vgl. Wannenwetsch 2004, S. 425 [149]).

Um die Effektivität und die Effizienz von industriellen Supply Chains zu steigern, werden strategische, taktische und operative Planungssysteme verwendet. Im Folgenden werden die Unterschiede dieser Planungssysteme näher erläutert.

## **Strategische Planung**

Ziel der strategischen Planung ist es, die Erfolgsposition des Unternehmens und damit seine Überlebensfähigkeit in den globalen Märkten auf Dauer zu sichern (vgl. Isermann 1998, S. 82 [65]). Der Planungshorizont der strategischen Planung ist eher langfristig und umfasst ca. 6 - 10 Jahre. Um die Erfolgs- und Fähigkeitenpotentiale des Unternehmens in Ausgleich bringen zu können, ist die Entwicklung von Strategien für die jeweiligen Geschäftsfelder von großer Bedeutung. Folglich hat die strategische Planung auch die Analyse der vorhandenen Erfolgspotentiale (Stärken und Schwächen) des Unternehmens zum Gegenstand und erstellt darauf aufbauend Prognosen über die Attraktivität bestimmter Teilmärkte. Auf dieser Planungsebene sind auch die Synergie- und Substitutionseffekte, die sich durch die Aufgabe oder Förderung bestimmter Geschäftsfelder ergeben, zu beachten (vgl. Wöhre, 2000, S.135 [159]). Der Flussorientierung kommt ebenfalls eine sehr wichtige Rolle in diesem Prozess zu. Sie ist maßgeblich für die Erfüllung der Marktanforderung verantwortlich, ist aber auch in der Lage neue Erfolgspotentiale zu erschließen.

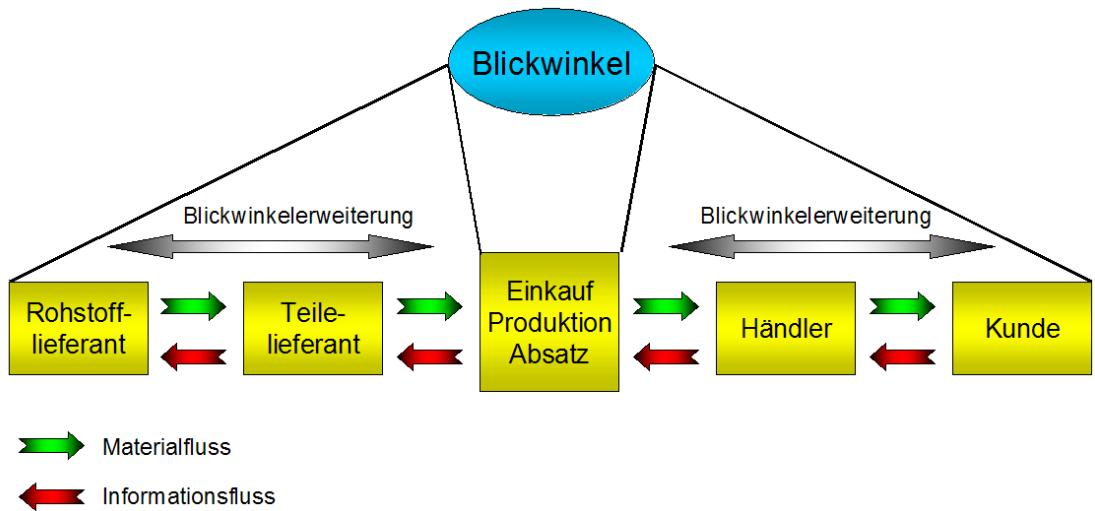
## **Taktische Planung**

Die zwischen der strategischen Planung und der operativen Planung angesiedelte taktische Planung umfasst strukturverändernde Maßnahmen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg (vgl. Isermann 1998, S. 82 [65]). Der Planungszeitraum der taktischen Planung ist mittelfristig und liegt zwischen ca. 2-5 Jahren. Bei der Verankerung des Flussprinzips sind die Beschaffungs-, die Produkt- und die Distributionsstruktur sowie die Absatzstrukturplanung von großer Bedeutung. Für eine ausführliche Charakterisierung der vier Strukturbereiche wird auf Isermann 1998, S. 82-83 [65] verwiesen.

## **Operative Planung**

Unter dem Begriff der operativen Planung werden alle kurzfristigen Planungsmaßnahmen zur Erlangung des Unternehmens- oder Organisationszieles zusammengefasst. Das System der operativen Planung (Tagesgeschäft, höchstens ein Jahr) setzt sich aus einer Sach- und Formalzielplanung zusammen, die typischerweise in einem mehrstufigen Budgetierungsprozess miteinander abgeglichen werden. Die Aufgabe der operativen Planung besteht darin, ausgehend von den Ergebnissen der strategischen Planung, Pläne für kurz- und mittelfristige Produktionsprogramme zu entwickeln und daraus für die einzelnen Funktionsbereiche Maßnahmenkataloge zur Umsetzung der Pläne zu erarbeiten. Dabei ist das Problem der Abstimmung der Teilpläne der verschiedenen Produktionsbereiche zu beachten (vgl. Wöhre, 2000, S.135 [159]). Eine einheitliche Definition der operativen Planung ist nicht möglich, da sie sich aus vielen Teilbereichen, wie z.B. Controlling, Betriebliche Planung, Arbeitsplanung (Produktion), Kosten- und Leistungsrechnung (hier insbesondere die Sortimentsermittlung durch die Deckungsbeitragsrechnung und Plankostenrechnung) oder Marketing zusammensetzt. Für die Auftragserfüllung in der Produktion und in der Dienstleistung werden verschiedene Bedarfsermittlungs- und Dispositionssstrategien eingesetzt.

Obwohl der Begriff Supply Chain Management bereits im Jahre 1982 von Oliver & Weber eingeführt wurde, beginnt er erst in den 90er Jahren an Bedeutung zu gewinnen. Für diese Entwicklung sind einerseits die neuen Herausforderungen (Outsourcing, zunehmende Globalisierung und steigende Kundenanforderungen) und andererseits die sich durch die technologische Entwicklung ergebenden Möglichkeiten (neue Informations- und Kommunikationstechnologien) verantwortlich. Davon getrieben, sehen immer mehr Unternehmen die Notwendigkeit, ihre komplexer werdenden Logistiknetzwerke effizienter zu verknüpfen und die gestiegene Anzahl der Schnittstellen zu optimieren. Die Sichtweise ändert sich, indem der Blickwinkel sich erweitert, und zwar von der Fokussierung auf das eigene Unternehmen auf eine Betrachtungsweise, die alle Einheiten, die zu einer Leistungserstellung beitragen, erfasst. In Abbildung 3.2 werden die unterschiedlichen Blickwinkel entlang einer Wertschöpfungskette unter Berücksichtigung der Material- und Informationsflüsse dargestellt.



**Abbildung 3.2:** SCM-Blickwinkelerweiterung

Diese Änderung des Betrachtungswinkels steht am Anfang jedes SCM-Projektes. Daraus resultieren für Unternehmen die folgenden Kernfragen:

- Wie kann eine angemessene Reaktion auf eintretende Nachfrageschwankungen bei niedrigen Lagerbeständen gestaltet werden?
- Wie kann man in Zusammenarbeit mit den Lieferanten flexible Produktionspläne gestalten?
- Wie kann ein optimaler Kundenservice mit der bestmöglichen Nutzung der Bestände, des gebundenen Kapitals und der Transportmöglichkeiten verknüpft werden?
- Wie kann man das Medium Internet als optimalen Vertriebskanal nutzen?
- Wie kann man am besten auf die persönlichen Kundenwünsche eingehen, wenn die Logistikplanung auf die optimale Auslastung der Transportanlagen ausgerichtet ist?
- Wie kann man die Durchlaufgeschwindigkeit in der Logistikkette erhöhen und zugleich die für den Wettbewerb notwendige Flexibilität aufrechterhalten?
- Wie kann man bei Lieferengpässen die Auslieferungszusagen präzise und zuverlässig einhalten?

Diese Fragen kann man nur dann ausreichend beantworten, wenn man die gesamte Logistikkette als ein zu optimierendes Ganzes betrachtet, mit dem Ziel eine reaktionsschnelle und flexible Verzahnung der einzelnen Systemelemente zu realisieren. Zu diesem Zweck müssen sogenannte Collaborative Communities gebildet werden, die sich aus Lieferanten, Herstellern, Spediteuren und Kunden zusammensetzen und die sich in einem dynamischen

Informationsaustausch befinden. Diese separaten Einheiten werden somit auf ein gemeinsames Ziel ausgerichtet und abgestimmt. Daraus resultiert eine Win-win-Beziehung zwischen den einzelnen Elementen des Systems.

Nicht zu vergessen ist die Tatsache, dass sich die Rationalisierung der Logistikkette nicht nur auf die unternehmensübergreifenden Prozesse bezieht, sondern auch auf die Vorgänge im eigenen Unternehmen. Sie umfasst also sämtliche unternehmensinterne und -externe Prozesse von der Konzeption der Logistikkette bis zur Bezugsquellenfindung, von der Bedarfsplanung bis zum Vertrieb. Die Neustrukturierung der Wertschöpfungskette betrifft also sowohl die unternehmensinternen Logistikprozesse als auch die Logistikprozesse der Lieferanten und Kunden.

Alle internen und externen Beteiligten sind elektronisch miteinander vernetzt. Dies gewährleistet einen unmittelbaren Austausch notwendiger Informationen. Die einheitliche Datenbasis beschleunigt die Prozesse erheblich, so dass Aufträge schnellstmöglich und effizient bearbeitet werden können.

Die wesentlichen Bausteine des Supply Chain Management sind:

### **Integrierte Logistikkonzeption**

Sie basiert auf dem Gleichgewichtsprinzip entlang der Versorgungskette. Dies bedeutet, dass die an einer Stelle der Kette entstandenen Mehrkosten an einer anderen Stelle wieder ausgeglichen werden müssen (z.B. höhere Transportkosten müssen durch niedrigere Lagerhaltungskosten kompensiert werden).

### **Partnerintegration**

Darunter versteht man die Einbeziehung von Lieferanten und Kunden in den Planungsprozess des eigenen Unternehmens. So können z.B. gemeinsame Strategien über Auslagerung und Funktionen (Outsourcing) entwickelt oder sogar das Zusammenlegen von bestimmten Bereichen beschlossen werden. Unnötig gewordene Arbeitsschritte werden eliminiert, Doppelarbeit wird vermieden, der Auftragsbearbeitungsprozess beschleunigt und somit Kosten eingespart. Auf diese Art und Weise werden Prozesse neu gestaltet und genau auf den optimalen Ablauf der Logistikkette zugeschnitten (z.B. Prozessneugestaltung innerhalb einer durch SCM optimierten Versorgungskette). Durch die Integration der Lieferanten kann man Lieferzusagen unter Berücksichtigung aller Material- und Kapazitätsverfügbarkeit machen, die Planungen werden präziser und der Kundenservice kann verbessert werden. Die Partnerintegration ermöglicht es, die Läger entlang der gesamten Versorgungskette den verschiedenen Einheiten zuzuordnen. Die Lieferhäufigkeit lässt sich somit für eine bedarfsoorientierte Beschaffung steigern (just in time). Hinzu kommt noch eine optimale Nutzung der vorhandenen Lager- und Transportkapazitäten.

## Daten- und Planungsintegration

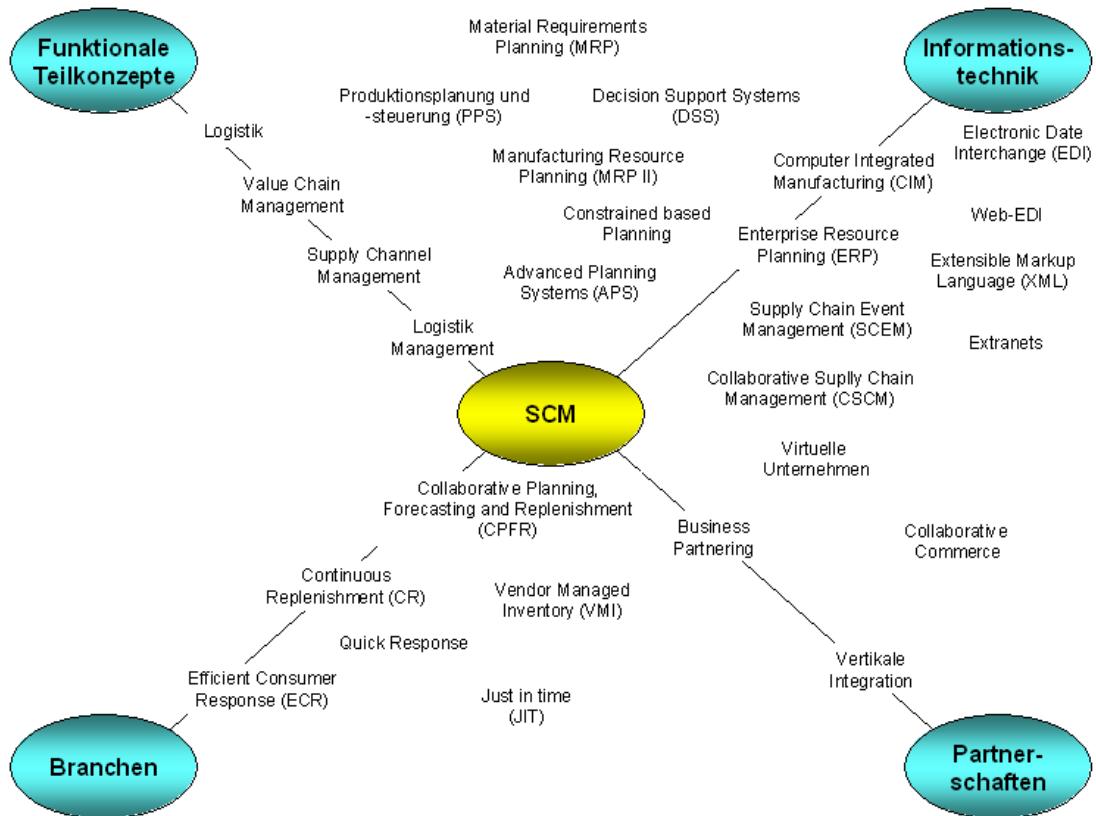
Für die Daten- und Planungsintegration der Unternehmen entlang der logistischen Wertschöpfungskette nutzt man die Möglichkeiten der Kommunikations- und Planungstechnologien zum dynamischen Informationsaustausch. Die Kommunikationstechnologien nutzen elektronische Netzwerke (EDI, Internet, LAN etc.) und Datenübertragungskontrolle (TCP/IP, OSI) für die Sicherung einer schnellen und effizienten Vernetzung der Beteiligten. Die Planungstechnologien nutzen APS-Systeme (Advanced Planning System setzt auf ERP-Systeme), die die Möglichkeit der Koordination, der Planung und Ausführung sowie die Früherkennung von Engpässen entlang der gesamten Logistikkette bieten. Die erarbeiteten Pläne können mit Hilfe des Systems simultan in den Unternehmen der Versorgungskette eingeführt werden. Dadurch erreicht man eine Erhöhung der Auskunftsfähigkeit und Transparenz. Eine optimal koordinierte Logistikkette trägt wesentlich dazu bei, dass neue Produkte schnell eingeführt und eine hohe Liefertreue garantiert werden können. Dies ist in erster Linie vor allem aufgrund der immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen von besonderer Bedeutung.

Die durch das Supply Chain Management angestrebten Hauptziele sind Kostenvorteile, Zeit- und Geschwindigkeitsvorteile sowie Qualitätsvorteile. Um diese Ziele besser erreichen zu können, wurden verschiedene Ausprägungen des SCM-Konzeptes ausgearbeitet. So versucht man z.B. beim Collaborative Supply Chain Management (CSCM) die Optimierung der Logistikkette durch kollaborativ initiierte Abstimmung der Partner entlang der Wertschöpfungskette zu erreichen, während beim prozessorientierten SCM die genannten Ziele durch Neugestaltung der unternehmensinternen und externen Prozesse (Material- und Informationsfluss) verfolgt werden.

Weitere Ziele der Rationalisierung der logistischen Versorgungskette sind:

- Abbau von Beständen entlang der gesamten Logistikkette, z.B. durch Schaffung gemeinsamer Versorgungs- und Lagerstrukturen;
- Erhöhung der Transparenz und Zurückverfolgbarkeit der Prozesse, z.B. bezüglich der Liefer- und Versorgungsvorgänge in den einzelnen Ebenen der Kette;
- Erhöhung der Präzision in der Planung, z.B. Früherkennung von Restriktionen, Übersicht über vorhandene Kapazitäten und Bestände;
- Reduzierung der Prozess- und Durchlaufzeiten, z.B. Auftragsabwicklung mit Hilfe elektronischer Kommunikationstechnologien;
- Steigerung der Flexibilität bei der Reaktion auf Marktschwankungen, z.B. durch Früherkennung von Lieferengpässen durch die dynamische Gestaltung des Informationsflusses;
- Verbesserung der Kapazitätsauslastung, z.B. durch die rechtzeitige Anpassung der Produktionskapazitäten.

Um die SCM-Aufgaben realisieren zu können, werden unterschiedliche Konzepte eingesetzt. Eine Einordnung der am häufigsten genannten Konzepte und deren Abgrenzung wird in Abbildung 3.3 vorgenommen. Als Einordnungsdimensionen werden Informationstechnik, Partnerschaften, branchenspezifische Konzepte und funktionale Teilkonzepte herangezogen. Bei zahlreichen der in der Abbildung 3.3 aufgeführten Begriffe, wie z.B. CPFR, QR oder ECR handelt es sich um Umsetzungskonzepte zur Realisation spezieller SCM-Teilaufgaben. Je größer der Abstand eines Begriffes vom Bildmittelpunkt (SCM) ist, desto schwächer ist der Zusammenhang in historischer, funktionaler oder inhaltlicher Hinsicht (vgl. Schulte 2005, S. 525 [117]).



**Abbildung 3.3:** Einordnung des SCM-Konzeptes im Logistikumfeld (vgl. Busch/Dangelmaier 2002, S. 8 [28])

Im Anschluss wird, neben den in Abbildung 3.3 aufgeführten Methoden, auf das Prinzip des Postponements und den Bullwhip-Effekt eingegangen.

## **Postponement**

Unter Postponement versteht man, möglichst spät in der Supply Chain die kundenindividuelle Differenzierung eines Standardproduktes in verschiedene Varianten durchzuführen, so dass man von einer verspäteten Variantenbildung (Postponement) sprechen kann.

Für die Strategie des Postponements sind die folgenden Grundsätze zu berücksichtigen (vgl. Vahrenkamp 2005, S. 33 [141]):

- Die Prozessschritte sollen so beschaffen sein, dass weniger stark differenzierende Schritte vor dem Entkopplungspunkt<sup>1</sup> liegen. Da mehr Produktvarianten zusammengefasst werden, sind hierdurch die Prognosen präziser.
- Die Präzision von Prognosen ist wichtig für die Schritte vor dem Entkopplungspunkt.
- Die Prozessschritte nach dem Entkopplungspunkt müssen schnell und flexibel sein. Flexibel deswegen, weil unterschiedlich ausgestattete Endprodukte hergestellt werden sollen. Schnell deswegen, um die Wartezeiten der Kunden zu verkürzen. Unter dem hohen Zeitdruck muss dennoch die Fertigung fehlerfrei sein und eine hohe Qualität aufweisen. Dafür müssen speziell trainierte Arbeitskräfte eingesetzt werden.
- Auf den Stufen, die nach dem Entkopplungspunkt folgen, sind die Produkte den kurzfristigen Kundenanforderungen auf den Märkten rasch anzupassen. Dafür sind Informationen über den Kundenbedarf schnell und präzise durch Rückmeldesysteme aus dem Handel zu erlangen.

Für eine ausführliche Erläuterung des Logistik-Postponement und des Form-Postponement wird auf Vahrenkamp [141] verwiesen.

## **Bullwhip-Effekt**

Der theoretische Hintergrund des Bullwhip-Effekts wurde zum ersten Mal von Jay Forrester in den 60er Jahren in den USA analysiert. Dieser befasste sich in seinen Werken „System Dynamics“ und „Industrial Dynamics“ mit dem Verhalten der Supply Chains bei divergierenden Bedarfen und der daraus resultierenden Aufschaukelung. Eine genaue Untersuchung des Bullwhip-Effekts wurde von Procter & Gamble in den 90er Jahren anhand der Pampers Windeln durchgeführt.

Der Bullwhip-Effekt, auch Peitschenschlag-Effekt genannt, beschreibt die zunehmenden Schwankungen bei Bestellmengen und Beständen entlang der Supply Chain. Dieses Phänomen verstärkt sich, je weiter man sich von der Kundennachfrage entfernt, d.h. dass die Bestellmengen der vorgelagerten Stufen keinen Zusammenhang mehr mit den Bestellmengen der Konsumenten haben.

---

<sup>1</sup> Übergang innerhalb der Supply Chain von der variantenunspezifischen Fertigung zur variantenspezifischen Fertigung

An dieser Stelle werden einige Ursachen des Bullwhip-Effekts aufgeführt (vgl. Nickel 2007, S. 55-56 [91]):

### **Nachfragevorhersagen mit lokalen Informationen**

Jeder Teilnehmer in der Supply Chain wertet die Bestellung einer unmittelbar vorhergehenden Einheit als Signal für die zukünftige Nachfrage. Ausgehend von diesem Signal aktualisiert der Teilnehmer lokal seine Nachfragevorhersage mit der für ihn neuen Markt-situation und passt gegebenenfalls seine Sicherheitsbestände und Bestellungen gegenüber seinen Lieferanten daran an.

### **Auftragsbündelung**

Aufgrund hoher fixer Bestellkosten, günstiger Preise für volle LKW-Ladungen und periodisch laufenden MRP-Systemen platzieren Teilnehmer nur in periodischen Abständen Bestellungen bei ihren Lieferanten.

### **Vorlaufzeiten**

Bedingt durch lange Vorlaufzeiten bewirkt geringfügig höhere Nachfragevariabilität erhebliche Änderungen in den Sicherheitsbeständen und Bestellmengen des Teilnehmers.

### **Preisfluktuationen**

Sind die Preise von Produkten niedrig, werden Unternehmen gewöhnlich ihre Lager füllen wollen und große Bestellmengen ordern. Bei anhaltend hohen Produktpreisen dagegen warten die Unternehmen, bis das Lager leer ist.

### **Knappheit**

Wird bekannt, dass ein Hersteller mit der Produktion nicht nachkommt und nur Teilmengen der Bestellungen erfüllen kann, so werden Kunden entsprechend mehr bestellen, als sie eigentlich benötigen.

Die Auswirkungen des Bullwhip-Effekts sind angepasste Kapazitäten und höhere Lagerbestände, die auf die Nachfrageschwankungen zurückzuführen sind. Dies verursacht höhere Lager- und Kapitalbindungskosten, welche sich über höhere Endverbraucher-Preise und die Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit bemerkbar machen. Somit ist die Zielsetzung jedes Unternehmens, den Bullwhip-Effekt zu verringern. Mögliche Auswege zur Reduzierung des Bullwhip-Effekts sind (vgl. Nickel 2007, S. 57-58 [91]):

- Zentralisierung von Informationen,
- Verkürzung von Vorlaufzeiten,
- Aufbrechen der Auftragsbündelung,

- Preis-Stabilisierung,
- Aufklärung über Knappheit.

Abschließend werden die Auswirkungen des Bullwhip-Effekts anhand eines kleinen Beispiels aufgeführt. Es wird eine Kundennachfrage mit geringer Schwankung angenommen sowie eine lokale Planung auf jeder Stufe der Supply Chain. In Abbildung 3.4 werden die Schwankungen der Nachfrage/Bestellmengen für die jeweilige Stufe der Supply Chain dargestellt. Dabei kann man schön erkennen, dass die Schwankungen immer größer werden, je weiter man sich vom Kunden entfernt. Für die explizite Berechnung der einzelnen Werte wird auf Störk [132] verwiesen.

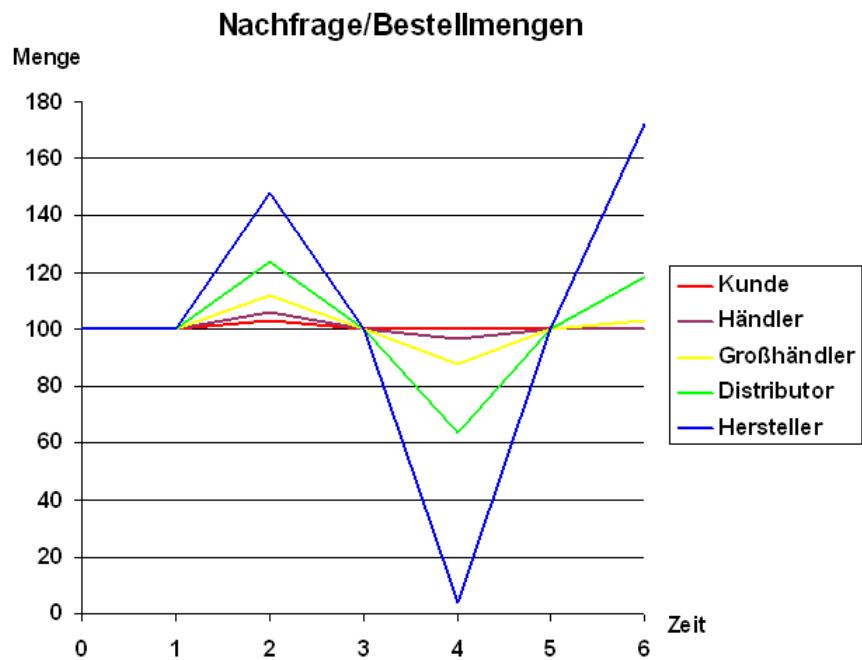


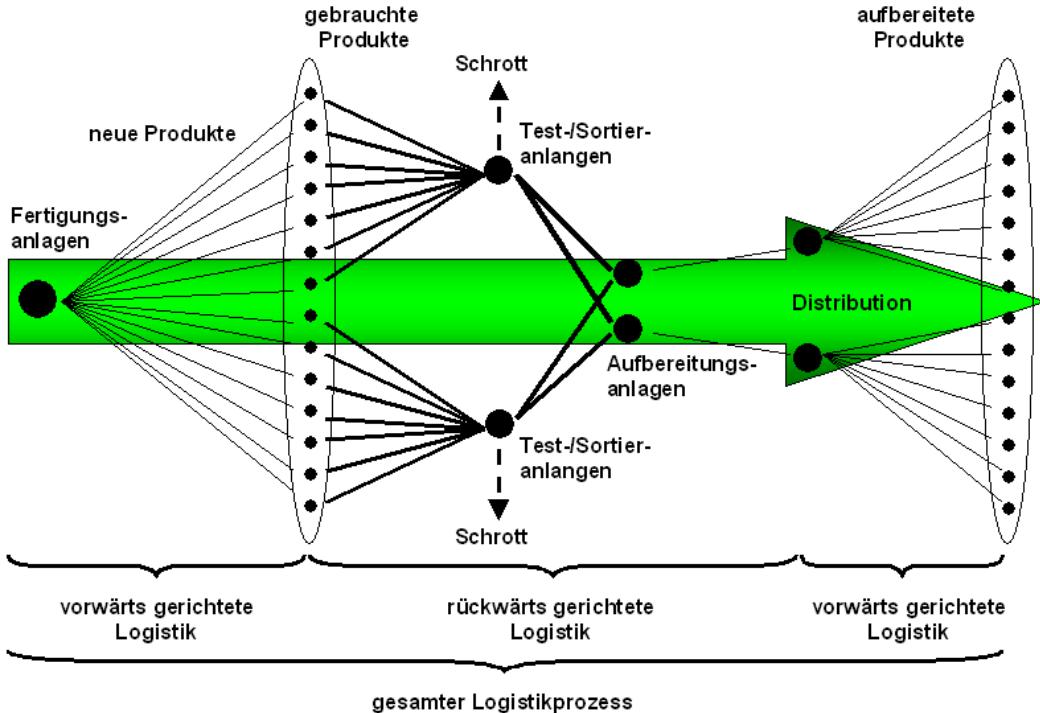
Abbildung 3.4: Auswirkungen des Bullwhip-Effekts (vgl. Störk 2003, S. 5 [132])

## 3.2 Analyse von Closed-Loop Supply Chains

Bei der Umsetzung von Closed-Loop Supply Chains (Reverse-Logistik-Netzwerken) wird in der Regel zwischen drei Handlungsoptionen unterschieden. Während **Recyclingstrategien** im Sinne eines Materialrecycling darauf abzielen, die in einem Produkt enthaltenen Wertstoffe als Sekundärrohstoffe am Anfang der Supply Chain (bei Zulieferern) wieder zu verwerten, ist es Ziel des **Remanufacturing**, vollständige Komponenten in (ansonsten) „neuwertige Produkte“ einzusetzen. Im Rahmen einer **ReUse-Strategie** werden vollständige Produkte (nach Durchführung notwendiger Wartungsarbeiten und unter Gewährung entsprechender Garantieleistungen) auf den Sekundärmärkten angeboten (vgl. Tuma/Lebreton 2005, S. 60 [138]). Insbesondere die letzten beiden Strategien erfordern eine enge Kooperation der an der Wertschöpfungskette beteiligten Akteure, wie dies bisher produktions- und distributionsseitig oftmals durch Einführung eines unternehmensübergreifenden Supply Chain Managements erreicht wird. Die explizite Einbeziehung von Recycling- und Demontageunternehmen und die gezielte Rückführung demontierter Produktkomponenten oder komplett aufzuarbeitender Produkte (z.B. Industriarmaturen) in die Wertschöpfungskette führt nun zu einer Closed-Loop Supply Chain (CLSC), die mittels geeigneter Instrumente des Closed-Loop Supply Chain Managements koordiniert werden muss. Hierzu gehört neben einem durchgängigen Informationsmanagement für die gesamte CLSC insbesondere auch die modellbasierte Unterstützung strategischer, taktischer und operativer Entscheidungen (vgl. Spengler/Schröter 2005, S. 3 [122]). In dieser Arbeit werden ausschließlich strategische Entscheidungsunterstützungen für Armaturenhersteller und -aufarbeiter behandelt.

Die Strukturierung einer CLSC zur Aufarbeitung von Industriarmaturen erfordert bereits zu einem frühen Zeitpunkt das Anbahnen strategischer Partner mit Lieferanten, Logistikdienstleistern und Recyclingunternehmen einerseits sowie die langfristige Planung zukünftig zu tätigender Investitionen in Inspektions- und Aufarbeitungswerzeuge, in zu errichtende Altarmaturen-/Ersatzteillager und in die Redistributionslogistik zur Rücknahme der Altarmaturen andererseits. In den traditionellen Supply Chains ist die Nachfragemenge unbekannt. Bei der Gestaltung von CLSCs ist es die Versorgerseite, die eine zusätzliche Unsicherheit ausmacht, d.h. die Rückflussmenge von Altgeräten, die Qualität und der Rückflusszeitpunkt sind nicht bekannt und nur schwer beeinflussbar. Weitere Faktoren wie die Vielzahl der beteiligten Akteure, der Zustand der aufzuarbeitenden Geräte und der durchzuführenden Sortier-, Demontage-, Test- und Aufarbeitungsaufgaben machen die Strukturierung von CLSCs zu einem sehr komplexen Planungsproblem. Aufzuarbeitende Produkte sind weniger standardisierte Inputfaktoren gegenüber konventionellen Komponenten wie z.B. Rohstoffen. Der effektiven Abstimmung von Angebot und Nachfrage kommt daher eine große Bedeutung zu. Folglich ist sehr wichtig, die Schwankungen der Flussvolumina und die Flusszusammensetzung möglichst genau ermitteln zu können.

Der größte Unterschied zwischen einer herkömmlichen Supply Chain und einer CLSC ist die Netzwerkstruktur. Bei den CLSCs kann eine Many-to-many-Struktur beobachtet werden, die aus einem konvergenten und divergenten Teil besteht, siehe Abbildung 3.5.



**Abbildung 3.5:** Reverse-Logistik-Netzwerkstruktur (vgl. Dekker u.a. 2004, S. 68 [104])

Dagegen weisen Supply Chains in der Regel eine Few-to-many-Struktur auf, d.h. sie bestehen ausschließlich aus divergenten Bestandteilen. CLSCs können auf vielfältige Weise erweitert werden und analog zu klassischen Standortmodellen kann die Formulierung zu einem dynamischen kapazitätsbeschränkten Mehrproduktfall verallgemeinert werden. Auf diese fallspezifischen Eigenschaften wird hier nicht näher eingegangen.

Die wichtigsten Faktoren, die es bei der Gestaltung von CLSCs zu berücksichtigen gilt, sind:

- Beschaffungsunsicherheit,
- Grad der Zentralisierung des Testens und der Sortierung,
- Wechselwirkungen zwischen den vorwärts und rückwärts gerichteten Strömen.

Ein weiteres Merkmal von CLSCs betrifft potentielle Synergien zwischen den verschiedenen Produktflüssen. Während traditionelle Distributionsnetzwerke üblicherweise wie Ein-

bahnstraßen funktionieren, umfassen CLSCs mehrere eingehende und ausgehende Flüsse, die sich überschneiden können. In vielen Fällen werden CLSCs nicht in einem Schritt entwickelt, sondern sie werden dadurch realisiert, dass man die Reverse-Logistik-Aktivitäten zu einem existierenden Distributionsnetzwerk hinzufügt. Die Meinungen differieren, ob nun ein sequenzieller Ansatz zu einer guten Lösung führt, oder ob man besser einen integralen Ansatz für die gesamte CLSC in Betracht ziehen sollte, da bisher kaum Erfahrungen hierzu vorliegen.

Wichtige strategische Planungsaufgaben zur Neugestaltung von CLSCs oder zur Umgestaltung bereits bestehender Supply Chains sind im Wesentlichen (vgl. Spengler/Schröter 2005, S. 5 [122]):

- Wahl der zu beteiligenden Akteure und Kooperationsformen,
- Standort-, Technologie- und Kapazitätsplanung zum Aufbau von Redistributionssystemen zur Erfassung, Lagerung, Demontage und Aufarbeitung,
- Entwicklung demontagegerechter Produkte und Ersatzteile,
- Bestimmung geeigneter Produktrücknahmestrategien.

Im Anschluss wird eine Reihe zusätzlicher Elemente aufgezeigt, die für eine CLSC spezifisch sind (in Anlehnung an Dekker u.a. 2004, S. 76 [104]):

- **Integration von Einrichtungen in vorwärts und rückwärts gerichtete Vertriebskanäle:**

Die Unterscheidung zwischen Integration und Trennung der verschiedenen Prozesse ist ein wichtiger Aspekt, der bei der Gestaltung von CLSC zu berücksichtigen ist. Wenn sich beispielsweise ein Lager und ein Testcenter am selben Standort befinden, kann das Anlagevermögen gemeinsam genutzt werden und ist somit wirtschaftlich vorteilhaft. Diese Variante kann durch eine zusätzliche Variable für kombinierte Einrichtungen (Lager und Testcenter gemeinsam) in ein entsprechendes Modell implementiert werden.

- **Integration von vorwärts und rückwärts gerichteten Transportströmen:**

Ähnliche Synergien können durch die Kombination von Transportrouten für vorwärts und rückwärts gerichtete Produktflüsse entstehen. Dies kann modelliert werden, indem man zusätzliche Flussvariablen einführt, die simultane Flüsse in beide Richtungen zwischen zwei Standorten darstellen (z.B. doppeltgerichtete Kanten).

- **Unterscheidung von Nachfrage nach neuen und wiederaufbereiteten Produkten:**

Oft wird nur eine Art von Nachfrage betrachtet, die entweder durch neue oder wiederaufbereitete Produkte gedeckt werden kann. Alternativ hierzu könnte eine Unterscheidung zwischen den beiden Märkten für neue und wiederaufbereitete Produkte gemacht

werden. Mathematisch gesehen führt dieser Ansatz zu einer Formulierung von Strömen in einem Mehrproduktnetzwerk.

- **Vielfältige Wiederaufbereitungsmöglichkeiten:**

In der einfachsten Darstellung einer Wiederaufbereitungsstrategie wird eine Unterscheidung zwischen interner Wiederverwertung und externer Abraumbeseitigung vorgenommen. Um ein verfeinertes Bild zu entwickeln, könnte man zwischen mehreren Wiederverwertungsmöglichkeiten differenzieren. Auch dieser Ansatz lässt sich mit Hilfe einer Mehrproduktnetzwerkformulierung abbilden.

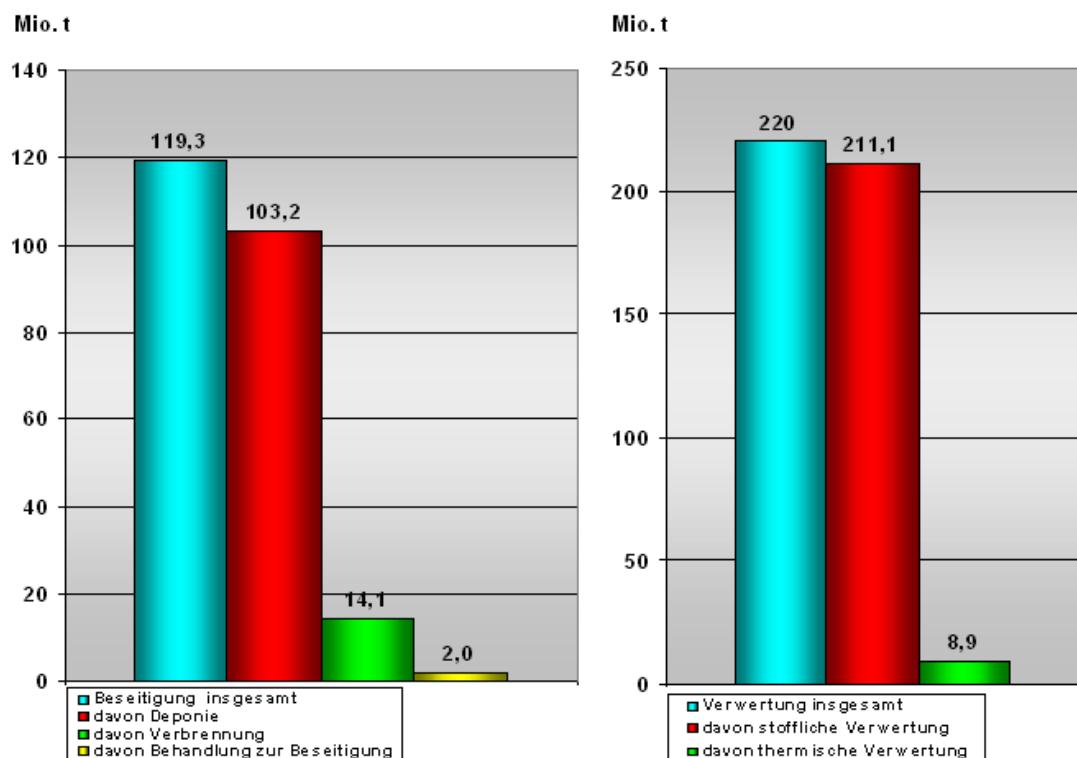
- **Unterscheidung zwischen Hol- und Bringsystemen:**

Die Sammel- und Transportfunktionen hängen sehr stark vom Layout der CLSC und den dazugehörigen Sammelstrategien ab. Je länger die Sammelrhythmen an den Sammelpunkten sind, desto höher ist das Transportaufkommen zum Zwischenlager oder zur Aufbereitungsanlage. In CLSCs wird zwischen Hol- und Bringsystemen unterschieden. Beim Bringsystem werden die gebrauchten Produkte von den Endverbrauchern zum jeweiligen Sammelort gebracht. Dieses System ist nur dann sinnvoll, wenn die erforderlichen Transportwege zu den erforderlichen Sammelorten kurz sind, die Zahl der Aufkommensquellen groß ist oder die pro Quelle anfallende Menge gering ist (vgl. Stache 1995, S. 79 [126]). Ein Nachteil des Bringsystems besteht darin, dass die Rückflussquoten niedriger sind als beim Holsystem, da der Entsorgungsaufwand dem Konsumenten angelastet wird. Auch ist zu bedenken, dass beim Bringsystem Leerfahrten anfallen. Bei Holsystemen werden nacheinander die Sammelpunkte mit einem Fahrzeug abgefahrene, um das Sammelgut beim Abfallerzeuger einzusammeln. Auf diese Weise sind im Allgemeinen sehr hohe Rückführungsquoten realisierbar. Der spezifische Transportaufwand pro Altprodukt fällt schon durch die Vermeidung von Leerfahrten wesentlich niedriger aus als bei Bringsystemen. Dem steht ein hoher organisatorischer Aufwand entgegen, der zum einen durch die Disposition der anzufahrenden Sammelstellen und zum anderen durch die informationstechnische Erfassung der im Einzelnen gesammelten Mengen verursacht wird. Mehrstufige Holsysteme, bei denen die Materialflüsse zwischen den Zwischenlagern und der Verwertung nicht direkt, sondern wiederum als Sammeltour zwischen mehreren Zwischenlagern ausgeführt werden, bieten sich nur in denjenigen Fällen an, in denen die Kapazität des Verkehrsmittels nicht bereits an einem Zwischenlagerstandort ausgelastet wird. Probleme in der Praxis werden oft durch die Kombination von beiden Systemen gelöst.

In Kapitel 8 wird ein grober Überblick über die wichtigsten Entwicklungslinien der betriebswirtschaftlichen Modellierung für die unterschiedlichen Netzwerke gegeben.

## 4 Recycling und Aufarbeitung

In Deutschland mussten im Jahr 2004 insgesamt 339,4 Mio. t Reststoffe entsorgt werden (Quelle: Statistisches Bundesamt, November 2006). Davon entfielen 290,9 Mio. t (85,7 % der gesamten Reststoffmenge) auf Betriebe des produzierenden Gewerbes und 48,5 Mio. t auf Siedlungsabfälle. In Abbildung 4.1 wird die Aufteilung des gesamten Reststoffaufkommens 339,4 Mio. t (Beseitigung 35 % und Verwertung 65 %) dargestellt. Zur Beseitigung gehören die Deponierung, die Verbrennung sowie die Behandlung zur Beseitigung. Die Verwertung beinhaltet die thermische Verwertung (Feuerung) und die Behandlung sowie die stoffliche Verwertung.



**Abbildung 4.1:** Beseitigung (linke Grafik) und Verwertung (rechte Grafik) von Abfällen in der BRD im Jahr 2004 (Quelle: Statistisches Bundesamt)

Im Jahre 1990 wurde knapp ein Viertel der in Deutschland anfallenden Reststoffe recycelt. Die Verschärfung gesetzlicher Vorschriften, die Verknappung der Rohstoffe, die Senkung der Reststoff-Entsorgungskosten und die Imageverbesserung von Unternehmen haben zu einer Steigerung der Verwertungsquote um ca. 40 % auf 65 % im Jahre 2004 geführt und somit hat das Recycling weiter an Bedeutung gewonnen. Neben der Schonung der Ressourcen und der Umwelt führt das Recycling im Rahmen der Materialwirtschaft zu wirtschaftlichen Chancen, wie z.B. der Kostenminderung und Erlösmehrung, die teilweise schon kurzfristig realisiert werden können. Die Ziele des Recyclings lassen sich also wie folgt zusammenfassen (in Anlehnung an Boers/Richter 2005 [24]):

- Schonung von Primärrohstoffressourcen,
- Senkung des Energiebedarfs durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen,
- Reduzierung der zu beseitigenden bzw. zu behandelnden Abfallmengen,
- Minderung der Umweltbelastung.

## 4.1 Definition des Begriffs Recycling

In der betriebswirtschaftlichen und technischen Literatur existieren diverse Definitionen des Recyclingbegriffs. Einen wertvollen Beitrag zur Vereinheitlichung der Begriffsvielfalt im Bereich des Recycling hat die VDI-Richtlinie 2243 „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ geliefert. Sie definiert Recycling als „die erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten oder Teilen von Produkten in Form von Kreisläufen“ [144]. Die dabei mit dem Recycling-Begriff im Zusammenhang stehenden Begriffe können den Recyclingobjekten im ökonomischen Sinn, den Recycling-Formen sowie den Recycling-Behandlungsprozessen zugeordnet werden (vgl. Weege [153], Beitz 1982 [10], Meyer 1983 [84], Kleinaltenkamp 1985 [71], Bundesministerium für Forschung und Technologie 1986 [27], Steinhilper 1988 [127], Häberle 1996, S. 16 ff. [54], Carrington 1996 [29], Remz 2001 [107]).

## 4.2 Gliederung der Recyclingobjekte aus ökonomischer Sicht

Im Folgenden wird eine begriffliche Differenzierung und Klassifizierung der Recyclingobjekte aus wirtschaftlicher Perspektive vorgenommen.

Die Produktionsfaktoren (Werkstoffe) werden im Rahmen des industriellen Fertigungsprozesses als Primärstoffe und Sekundärstoffe eingesetzt. **Primärstoffe** sind Güter, die

zuvor ausschließlich in Fertigungssprozesse der jeweils vorgelagerten Fertigungsstufen verwendet wurden. **Sekundärstoffe** sind Rückstände aus den verschiedensten Fertigungs- und Produktionsbereichen, die schon einmal oder mehrfach in einem Fertigungsprozess der jeweils gleichen Fertigungsstufe verarbeitet wurden. Um den Einsatz von Sekundärstoffen zu ermöglichen, müssen diese vor ihrer weiteren Verwertung aufbereitet und einer Qualitätssicherung unterzogen werden, damit sie den Anforderungen der primären Einsatzstoffe genügen. Die hier verwendeten Begriffe Primär- bzw. Sekundärstoffe umfassen sowohl materielle Güter als auch materielle Güter besonderer Art (Energiestoffe).

Die Resultate eines industriellen Fertigungsprozesses sind einerseits erwünschte **Produkte**, andererseits unerwünschte Ausbringungsgüter, die als **Reststoffe** bezeichnet werden. Die erwünschten Fertigungserzeugnisse werden entweder im eigenen Betrieb weiterverarbeitet oder an externe Betriebe abgesetzt. Die anfallenden Reststoffe können unter Umständen in sekundären und weiteren Stoffkreisläufen als Rohstoffe eingesetzt (rezykliert) werden. Eine Unterteilung der Reststoffe in nutzbare und nicht nutzbare Güter ist hier sinnvoll. Nutzbare Reststoffe werden als **Produktionsrückstände** bezeichnet und entweder unmittelbar oder nur mittelbar genutzt (vgl. Häberle 1996, S. 17 [54]). **Unmittelbar nutzbare Produktionsrückstände** können direkt als Sekundärstoff in einem Fertigungsprozess eingesetzt oder an externe Betriebe veräußert werden. Hierzu sind einzig und allein Steuerungsvorgänge wie Sortieren, Lagern und Transportieren erforderlich. **Mittelbar nutzbare Produktionsrückstände** müssen einem mechanischen, chemischen oder physikalischen Aufarbeitungsprozess unterzogen werden, bevor sie wieder als Sekundärstoffe in einem Fertigungsprozess verwendet werden können (z.B. Aufarbeitung von Industriearmaturen und Wiedereinsatz in einer Prozessanlage in der chemischen Industrie). In der Literatur werden Recyclingprozesse, die einen Aufarbeitungsschritt enthalten, auch als indirektes Recycling bezeichnet (vgl. Corsten/Götzemann 1992, S. 114 [33]).

Nicht nutzbare Reststoffe werden **Produktionsabfälle** genannt (vgl. Häberle 1996, S. 17 [54]). Diese verursachen in der Regel betriebliche Kosten, da ein ökonomisches Interesse und oft ein rechtlicher Zwang zur Entsorgung durch z.B. Deponierung oder Verbrennung besteht. Im Rahmen der Armaturenaufarbeitung werden z.B. die mit Produktrückständen behafteten Dichtungselemente deponiert oder in Müllverbrennungsanlagen verbrannt.

Die Minimierung der Reststoffe und sinnvolle Verwertung ist immer ein Ziel des produktionsintegrierten Umweltschutzes.

## 4.3 Recycling-Formen

Eine Unterteilung der Recyclingprozesse kann nach der Art der Nutzung der Sekundärstoffe und nach deren Einsatzort vorgenommen werden. Dabei wird zwischen Wieder- und Weiterverwendung bzw. Wieder- und Weiterverwertung unterschieden.

**Wiederverwendung** bedeutet die erneute Nutzung eines gebrauchten Produktes für den gleichen Verwendungszweck ohne oder mit geringer Veränderung einiger Teile (vgl. Spengler 1994, S. 11 [124]). Von **Weiterverwendung** spricht man bei der erneuten Nutzung eines gebrauchten Produktes für einen anderen als ursprünglich vorgesehenen Verwendungszweck. **Wiederwertung** bezeichnet einen Vorgang bei dem Produktionsabfälle, Produktionsrückstände oder Altstoffe im gleichen bereits durchlaufenen Produktionsprozess wiederholt eingesetzt werden. Im Rahmen der **Weiterverwertung** durchlaufen Produktionsabfälle oder Altstoffe einen anderen als den ursprünglichen Produktionsprozess, so dass Werkstoffe bzw. Produkte mit neuen Eigenschaften bzw. anderer Gestalt entstehen. Handelt sich dabei um qualitativ höherwertige Werkstoffe oder Produkte, so spricht man auch von **Upcycling** (stückige Verwendung/Aufwertung), im umgekehrten Fall von **Downcycling** (stoffliche Verwertung/Abwertung) (vgl. Spengler 1994, S. 12 [124]).

Die unterschiedlichen Recyclingprozesse werden wie folgt den jeweiligen Recycling-Formen zugeordnet (in Anlehnung Boers/Richter 2005 [24]):

- **Produktrecycling:** Wieder- oder Weiterverwendung eines Produktes nach Reinigung, Wartung und Instandsetzung,
- **Bauteilrecycling:** Wieder- oder Weiterverwendung von Komponenten oder Bauteilen nach Prüfung oder Bearbeitung,
- **Materialrecycling:** Wiederverwertung als Werkstoff nach physikalischer Umformung in Grundstoffe durch Zerkleinern, Schmelzen, Granulieren,
- **Rohstoffrecycling:** Weiter- oder Wiederverwendung als Rohstoff nach chemischer Umwandlung in die Grundstoffe,
- **Energierecycling:** Thermische Verwertung, wie z.B. Müllverwertungssysteme.

## 4.4 Abgrenzung der Recycling-Behandlungsprozesse

Vor der erneuten Verwendung oder Verwertung müssen die in einem Recyclingkreislauf zugeführten Produkte oder Stoffe in der Regel noch einen Behandlungsprozess durchlaufen (vgl. Schmiemann 1989-1994, S. 8 [113]). Die Recycling-Behandlungsprozesse lassen sich wie folgt untergliedern in (vgl. Spengler 1994, S. 12 [124]):

- **Aufbereitung:** Eine Vorstufe der eigentlichen metallurgischen oder sonstigen Verwertung. In dieser Vorstufe werden Altstoffe im Rahmen verfahrenstechnischer Prozesse, wie z.B. Zerkleinerung, Sortierung oder chemischer Zersetzung, aufbereitet.
- **Aufarbeitung bzw. Überholung:** Dient der Erhaltung oder Wiederherstellung der Produktgestalt bzw. der Produkteigenschaften. Hierbei werden die gebrauchten Produkte mit Hilfe fertigungstechnischer Prozesse aufgearbeitet bzw. überholt. In Kapitel 7 wird ein Aufarbeitungsprozess am Beispiel eines Kugelhahns detailliert beschrieben. Ferner wird der durchschnittliche Aufarbeitungspreis, der in Kapitel 9 für die entsprechenden Szenarien verwendet wird, anhand der bei einer Großabstellung in einem Chemieunternehmen anfallenden Kosten, für die Aufarbeitung von Industriearmaturen des Nennweitenbereiches DN 15 bis DN 500, ermittelt.
- **Instandhaltung:** Umfasst sämtliche Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustandes (Wartung), zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands (Inspektion) und zur Wiederherstellung des Sollzustands (Instandsetzung) (vgl. Schmiemann 1989-1994, S. 8 [113]). Die Instandsetzungsmaßnahmen dienen hauptsächlich der Verlängerung der Lebensdauer des Produktes.

## 4.5 Klassifizierung des Recyclings nach Anfall- und Einsatzort

Für den Begriff Recycling existiert in der betriebswirtschaftlichen Literatur eine Klassifizierung nach Anfall- und Einsatzort der zu verwertenden Stoffe (vgl. Strebler/Görg 1981 [133], Pfeiffer/Schultheiß/Staudt 1975 [96], Terhart 1986 [136], Schreiner 1988 [115]). In Anlehnung hieran wird im Folgenden unterschieden zwischen:

- innerbetrieblichem Recycling,
- intrabetrieblichem Recycling und
- extrabetrieblichem Recycling.

Das **innerbetriebliche Recycling** ist dadurch gekennzeichnet, dass die Produktionsrückstände in dem Unternehmen, in dem sie angefallen sind, verwertet werden. Der Einsatz der Produktionsrückstände in den gleichen oder auch in einen anderen Produktionsprozess ist möglich. Anlässe, die Anwendung des innerbetrieblichen Recyclings zu erwägen, können sowohl externer Natur (staatliche Maßnahmen, Rohstoffverteuerung, Entwicklung neuer Recyclingverfahren) als auch interner Natur (Streben nach weitgehender Stoff- und Energieverwertung, Herstellung neuer Produkte aus den unerwünschten Nebenprodukten) sein (in Anlehnung an Jahnke 1986, S. 27 [68]). Das **intrabetriebliche Recycling** wird charakterisiert durch Recyclingvorgänge, die ihr Ziel, nicht aber ihren Ursprung,

im Produktionsbereich des betrachteten Unternehmens haben. Bezuglich des Ursprungs werden zwei Recyclingarten unterschieden (in Anlehnung an Jahnke 1986, S. 29 [68]):

- Recycling aus einem anderen Unternehmen (auch als interbetriebliches Recycling bezeichnet) und
- Recycling aus dem Komsumsektor.

Dem **extrabetrieblichen Recycling** werden solche Recyclingaktivitäten zugeordnet, die ihren Ursprung, nicht aber ihr Ziel, im Produktionsbereich des zugrunde liegenden Unternehmens haben. Diese Ziele können wie folgt definiert werden (in Anlehnung an Jahnke 1986, S. 30 [68]):

- Recycling in den Produktionsbereich eines anderen Unternehmens (dies ist die zweite Form des interbetrieblichen Recyclings) und
- Recycling in den Komsumsektor.

## 5 Juristische Aspekte bei der Armaturenaufarbeitung

Die Schonung der Rohstoffressourcen und die Reinhaltung der Luft sind wichtige Ziele der Umweltpolitik. Gesetze, Verordnungen und Richtlinien sind Instrumente des Gesetzgebers, die dafür verantwortlich sind, dass diese Ziele erreicht werden. Die Luftverschmutzung in Europa wird im Jahre 2010 aufgrund von strengen Grenzwerten, die sowohl für die Industrie als auch für private Haushalte gelten, deutlich zurückgegangen sein, siehe Tabelle 5.1.

**Tabelle 5.1:** Emissionsreduzierung pro Land, Quelle: CEN/TC 264, WG 17

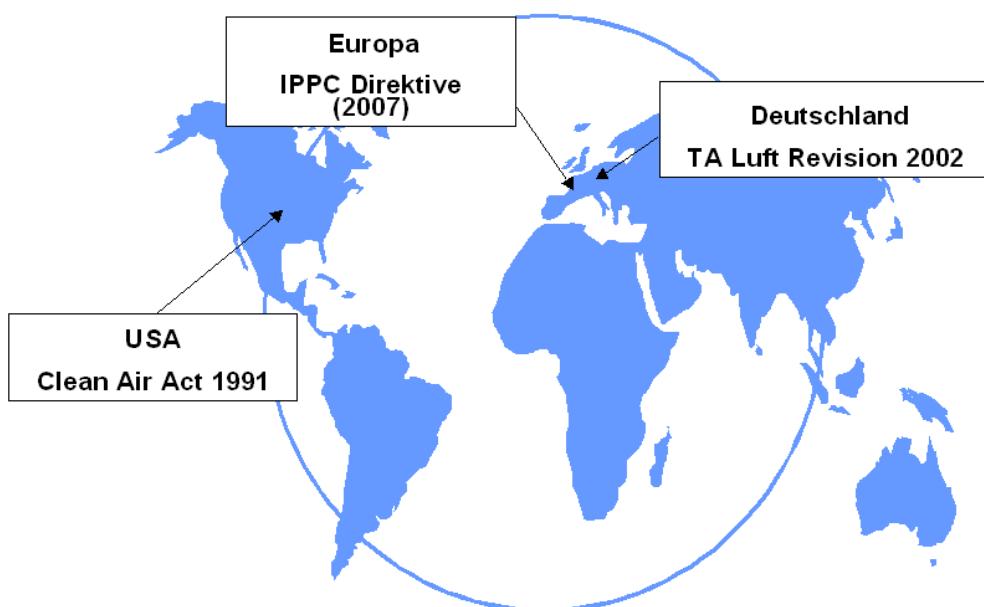
	Emissionspegel 1990	Emissionsobergrenze 2010	Emissionsreduktion 1990-2010
Österreich	351.000 t	159.000 t	55 %
Belgien	324.000 t	144.000 t	56 %
Dänemark	178.000 t	85.000 t	52 %
Finnland	209.000 t	130.000 t	38 %
Frankreich	2.957.000 t	1.100.000 t	63 %
Deutschland	3.195.000 t	995.000 t	69 %
Griechenland	373.000 t	261.000 t	30 %
Irland	197.000 t	55.000 t	72 %
Italien	2.213.000 t	1.159.000 t	48 %
Luxemburg	20.000 t	9.000 t	55 %
Niederlande	502.000 t	191.000 t	62 %
Portugal	640.000 t	202.000 t	68 %
Spanien	1.094.000 t	669.000 t	39 %
Schweden	526.000 t	241.000 t	54 %
Groß Britannien	2.555.000 t	1.200.000 t	53 %

Die Politik setzt auch bei der Luftreinhaltung auf die Strategie, wirtschaftliche Anreize zu schaffen anstatt staatliche Verbote auszusprechen. Seit dem 1. Januar 2003 sind z.B. schwefelfreie Kraftstoffe bei der Mineralölsteuer um 1,5 Cent besser gestellt, die höchstens noch 10 Milligramm Schwefel je Kilogramm Kraftstoff enthalten. Eine Studie hat ergeben, dass heute kaum noch schwefelhaltige Kraftstoffe an Deutschlands Tankstellen verkauft werden.

Im Anschluss werden die für diese Arbeit relevanten Gesetze, Verordnungen und Richtlinien der Armaturenaufarbeitung aufgezeigt und in Kapitel 7 wird deutlich, wie wichtig es ist, Ökologie und Wirtschaftlichkeit miteinander zu verbinden.

## 5.1 Allgemeiner Überblick über Gesetze, Verordnungen und Richtlinien

Weltweit werden die Auflagen für Industrieanlagen, Emissionen zu reduzieren, verschärft. Hierzu wurden verschiedene Gesetze bzw. Vorschriften verabschiedet, die die Zulassung von Industrieanlagen maßgeblich beeinflussen. In Abbildung 5.1 wird die weltweite Emissionsgesetzgebung, insbesondere im Hinblick auf dichtungsrelevante Anwendungen, dargestellt.



**Abbildung 5.1:** Emissionsgesetzgebung weltweit, Quelle: Vogel 2004, S. 6 [146]

Die Zielsetzung des im Jahr 1991 vom US Kongress verabschiedeten **Clean Air Act** war, die Emissionen bis zum Jahr 2000 um 90 % zu reduzieren. Der Clean Air Act beinhaltet:

- Title I: Air Pollution Prevention and Control,
- Title II: Emission Standards for Moving Sources,
- Title III: General,
- Title IV: Acid Deposition Control,
- Title V: Permits,
- Title VI: Stratospheric Ozone Protection.

Die US Environmental Protection Agency (EPA) leitet die nationale Umweltforschung und unterstützt den US Congress durch Informationen und Vorschläge bei der Umweltgesetzgebung. Die EPA hat eine Reihe von Regulierungen meist für petrochemische Anlagen getroffen. Die Emissionen aus undichten Industriearmaturen, Pumpen und Flanschverbindungen werden in den USA auf ca. 300.000 Tonnen pro Jahr geschätzt, das entspricht ungefähr 1/3 der gesamten organischen Emissionen aus Chemieanlagen. Für Industriearmaturen, Pumpen und Flansche wurden Emissionsgrenzen festgesetzt. Der Emissionsgrenzwert liegt bei 500 ppm, kann aber in den einzelnen Staaten variieren (z.B. Kalifornien 100 ppm). Diese Regelungen sind sowohl für Neuanlagen als auch für Altanlagen bindend.

Im September 1996 wurde in Europa die Richtlinie 96/61/EG der **IPPC Direktive** (Integrated Pollution Prevention and Control) beschlossen. Seit Oktober 1999 ist sie als Gesetz in Kraft getreten und ab 2007 für alle Industrieanlagen der EU-Mitgliedstaaten bindend. Die IPPC Direktive ist die erste Umweltgesetzgebung, die eine integrierte Lösung für Emissionen in Luft, Wasser sowie Erdreich darstellt und dabei auch andere Aspekte wie Abfallbeseitigung berücksichtigt. Jeder EU-Mitgliedstaat kann eine eigene Gesetzgebung verabschieden, die über die Anforderungen der EU-Direktive hinausgehen kann. Ein typisches Beispiel hierfür ist die TA Luft in Deutschland.

Bei der **TA Luft** handelt es sich um eine allgemeine Verwaltungsvorschrift des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG). Die TA Luft von 1986 wurde letztmalig im Jahr 2002 novelliert. Mit der novellierten TA Luft ist ein Instrument entwickelt worden, das zu mehr Rechts- und Planungssicherheit führt. Der Immissionsteil<sup>1</sup> der TA Luft enthält Vorschriften zum Schutz der Bürgerinnen und Bürger vor unvertretbar hohen Schadstoffbelastungen aus Anlagen. Der Emissionsteil<sup>2</sup> enthält Anforderungen zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und legt entsprechende Emissionswerte für alle relevanten Luftsabdstoffe aus neuen und alten Anlagen fest. Alte Anlagen müssen

---

<sup>1</sup> Immission meint die Einwirkung von Schadstoffen auf Pflanzen, Tiere und Menschen

<sup>2</sup> Emission meint hier jegliche Abgabe von Schadstoffen in die Luft

nach einer angemessenen Übergangsfrist ebenfalls auf den neuesten Stand der Technik gebracht werden. Es wurden ebenfalls neue und existierende EU-Richtlinien (z.B. Luftqualitätsrahmen-Richtlinie 96/62/EG) in die Revision der TA Luft übernommen. Unter Punkt 5.2.6 werden die Anforderungen an Pumpen, Verdichter, Flanschverbindungen, Absperrorgane, Probenahmestellen, Umfüllung und Lagerung definiert. In Punkt 5.2.6.4 Absperrorgane ist die Abdichtung von Spindeldurchführungen an Absperr- und Regelorganen definiert. Zur Abdichtung werden hochwertig abdichtende, metallische Faltenbälge mit nachgeschalteter Sicherheitsstopfbuchse oder gleichwertige Dichtsysteme wie in Kapitel 6.3 aufgeführt. Dichtsysteme sind als gleichwertig anzusehen, wenn im Nachweisverfahren, entsprechend der Richtlinie VDI 2440 Emissionsminderung - Mineralölraffinerien, die temperaturspezifischen Leckageraten eingehalten werden. Generell gilt das Emissionsminimierungsgebot, d.h. Emissionen gefährlicher Stoffe sind unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit soweit wie möglich zu begrenzen. Speziell beim Verarbeiten, Fördern, Umfüllen und Lagern von flüssigen organischen Stoffen sind Stoffe zu berücksichtigen, die (vgl. Bechtel 2007, S. 4 [9]):

- leicht flüchtig sind, d.h. Dampfdruck  $\geq 0,013$  bar bei  $20^\circ\text{C}$ ,
- mehr als 1 % an bestimmten organischen Stoffen gemäß Klasse 1<sup>3</sup> der TA Luft, krebszeugenden Stoffen der Klasse 2 + 3 oder reproduktionstoxischen Stoffen enthalten,
- mehr als 0,001 % an krebserzeugenden Stoffen der Klasse 1 oder erbgutverändernden Stoffen enthalten,
- schwer abbaubare, leicht anreicherbare oder hochtoxische Stoffe<sup>4</sup> enthalten.

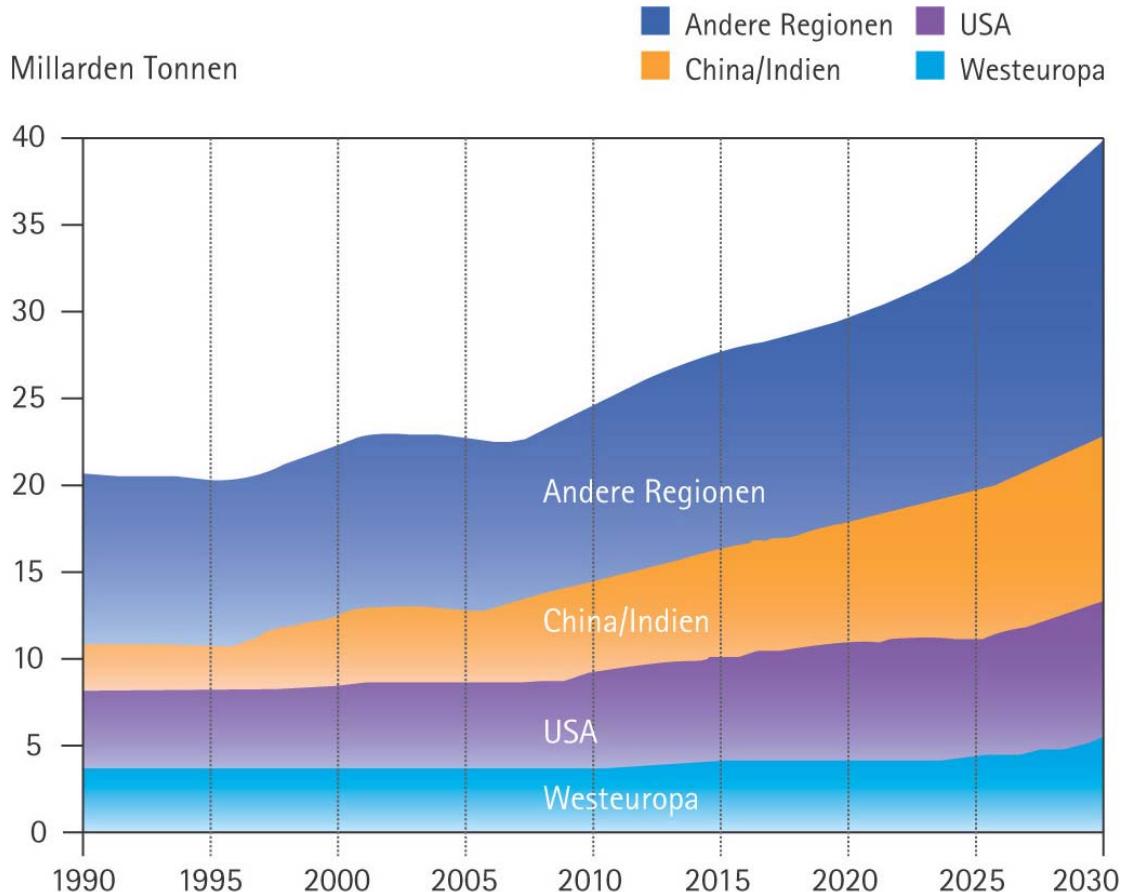
Stoffe gelten als **krebserzeugend**, **erbgutverändernd** oder **reproduktionstoxisch**, wenn sie in eine der Kategorien K1, K2, M1, M2, RE1, RE2, RF1 oder RF2 (Kennzeichnung R45, R46, R49, R60 oder R61), im Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe (TRGS 905) oder im Anhang 1 der Richtlinie 67/548/EWG eingestuft sind (siehe Kapitel 5.2.7.1 der TA Luft).

Neben der oben beschriebenen Emissionsgesetzgebung für dichtungsrelevante Anwendungen gewinnt die Reduzierung von  $\text{CO}_2$ -Emissionen (nicht Gegenstand der TA Luft) wegen der drohenden Klimaerwärmung immer mehr an Bedeutung. Die EU-Staats- und Regierungschefs einigten sich darauf, den Ausstoß von Treibhausgasen bis 2020 um ein Fünftel gegenüber 1990 zu verringern. Wenn andere große Wirtschaftsblöcke in Asien und Amerika folgen, will die EU die  $\text{CO}_2$ -Emissionen sogar um 30 % reduzieren (vgl. Weinheimer Nachrichten 2007, S. 1 [154]). In Abbildung 5.2 ist das Szenario dargestellt, wenn keine Maßnahmen zur Reduzierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen getroffen werden.

---

<sup>3</sup> Alle Stoffe in Anhang 4 der TA Luft

<sup>4</sup> Alle Stoffe gemäß Kapitel 5.2.7.2 und alle Stoffe in Anhang 5 der TA Luft

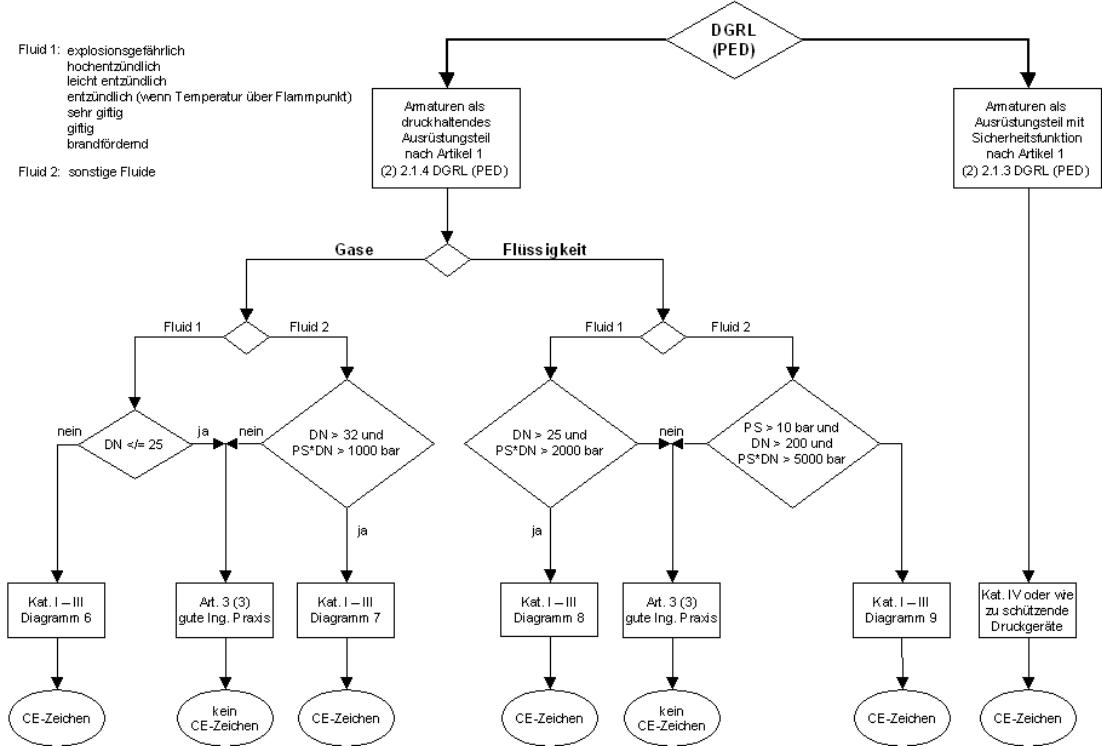


**Abbildung 5.2:** Entwicklung der weltweiten  $CO_2$ -Emissionen, Quelle: VGB POWERTECH 2005

## 5.2 Normen und Regelwerke für Industriematuren

Das Technische Komitee CEN/TC 69 „Industriematuren“ des Europäischen Komitees für Normung (CEN) erstellt die europäischen Normen für Industriematuren. Diese EN-Normen ersetzen nun als DIN EN-Normen im DIN-Normensystem die dort aufgeführten DIN-Normen. Zusätzliche Bedeutung bekommen diese EN bzw. DIN jetzt durch die Verabschiedung der „Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte“ (DGRL) (vgl. Alberti 2000, S. 434 [2]). Die in Abbildung 5.3 dargestellte europäische Druckgeräte Richtlinie regelt die Herstellung und das Inverkehrbringen von ortsfesten Druckgeräten und Baugruppen mit einem maximal zulässigen Druck von über 0,5 bar

unter Berücksichtigung druckbedingter Risiken (vgl. John 2000, S. 355 [69]). Druckgeräte



**Abbildung 5.3:** Europäische Druckgeräte Richtlinie (DRGL/PED), Quelle: VDMA-Merkblatt zur europäischen Druckgeräte Richtlinie

sind Behälter, Rohrleitungen, druckhaltende Ausstattungsteile (z.B. Kugelhähne und Ventile) und Ausstattungsteile mit Sicherheitsfunktion (z.B. Sicherheitsventile, Berstscheiben und Druck-, Temperatur- oder Fluidniveauschalter).

Vor dem Inverkehrbringen eines Druckgerätes muss der Hersteller jedes Gerät einem Konformitätsbewertungsverfahren unterziehen. Für die Auswahl der anzuwendenden Konformitätsbewertungsverfahren ist die Kategorie, in die das Gerät eingestuft ist, maßgebend. Jeder Hersteller wendet nach seiner Wahl eines der Konformitätsbewertungsverfahren auf die entsprechenden Kategorien an, denen das Druckgerät mindestens entspricht. In Tabelle 5.2 sind die unterschiedlichen Kategorien mit den dazugehörigen Konformitätsbewertungsverfahren aufgeführt.

Die CE-Kennzeichnung in Abbildung 5.3 entspricht einem Reisepass/Freibrief, der ungehinderten Zugang zu den Märkten der Einzelstaaten und des Europäischen Wirtschaftsraumes (EWR) einräumt. Ein Hersteller ist berechtigt, nachdem er die in einer Richtlinie

geregelten Verfahren erfüllt hat und sein Erzeugnis den grundlegenden Anforderungen der Richtlinie entspricht, sein Erzeugnis mit dem CE-Kennzeichen zu versehen (vgl. Höllerer 2000, S. 349-350 [61]).

Die CE-Kennzeichnung weist nur auf die Konformität mit den Anforderungen einer EU-Richtlinie und nicht auf einen bestimmten Qualitätsstandard hin. Selbst wenn die Leistungsfähigkeit eines Erzeugnisses gering sein mag, so kann es dennoch voll und ganz einer Richtlinie entsprechen.

Das CE-Kennzeichen erhalten nur Erzeugnisse, die unter EG-Richtlinien fallen, d.h. nur auf die Richtlinien, die eine CE-Kennzeichnung fordern.

**Tabelle 5.2:** Konformitätsbewertungsverfahren

Modulkategorien	Modulkombinationen	Modulbezeichnungen
Kategorie I	Modul A	interne Fertigungskontrolle
Kategorie II	Modul A 1	interne Fertigungskontrolle mit Überwachung der Abnahme
	Modul D 1	Qualitätssicherung Produktion DIN EN ISO 9002
	Modul E	Qualitätssicherung Produkte DIN EN ISO 9003
Kategorie III	Module B 1 + D	EG-Entwurfsprüfung + Qualitätssicherung Produktion DIN EN ISO 9002
	Module B 1 + F	EG-Entwurfsprüfung + Prüfung bei Produkten
	Module B + E	EG-Baumusterprüfung + Qualitätssicherung Produkte DIN EN ISO 9003
	Module B + C 1	EG-Baumusterprüfung + Konformität mit der Bauart
	Modul H	umfassende Qualitätssicherung DIN EN ISO 9001
Kategorie IV	Module B + D	EG-Baumusterprüfung + Qualitätssicherung Produktion DIN EN ISO 9002
	Module B + F	EG-Baumusterprüfung + Prüfung bei Produkten
	Modul G	Einzelprüfung am Produkt
	Modul H 1	umfassende Qualitätssicherung DIN EN ISO 9001

Das **Normensystem für Industriearmaturen** ist wie folgt untergliedert (vgl. Alberti 2000, S. 434-437 [2]):

- **Grundnormen** sind in der Regel bauart- und anwendungsunabhängige, allgemeine Normen, auf die in Bauart und/oder Gebrauchstauglichkeitsnormen Bezug genommen werden kann.
- **Bauartnormen** beschreiben eine genormte Armatur ohne Berücksichtigung besonderer Anforderungen für ein spezielles Anwendungsgebiet. Das Schwergewicht liegt dabei auf der Festlegung von „Anschlussmaßen“ der Armaturen im weitesten Sinne, z.B. der Anschlussmaße der Werkstoffe für das drucktragende Gehäuse, aber auch der zulässigen Leckrate am Sitz und deren Prüfung. Im Allgemeinen werden technische Details nicht festgelegt. Sie sollen dem Armaturenhersteller überlassen bleiben, um technische Weiterentwicklungen nicht durch die Festlegungen in einer Norm einzuschränken.
- **Gebrauchstauglichkeitsnormen** legen bauartunabhängig spezielle Anforderungen für ein bestimmtes Anwendungsgebiet fest, so z.B. im Normenentwurf DIN EN 12569 „Industriearmaturen für die chemische und petrochemische Verfahrensindustrie, Anforderungen und Prüfungen“ für die entsprechende Industrie. Mit dem Erscheinen Europäischer Richtlinien kann es vorkommen, dass nicht alle relevanten „Grundlegenden Sicherheitsanforderungen“ einer Richtlinie in einer Bauartnorm berücksichtigt werden können, bzw. besser in einer speziellen Grundnorm zusammengefasst werden sollten.

Die nachfolgenden Tabellen 5.5, 5.6 und 5.7 stellen einen Auszug der armaturenrelevanten Normen und technischen Regeln dar, die seit dem Erscheinen des letzten Fachverbandsrundschreibens im Zeitraum September 2006 bis Dezember 2006 veröffentlicht wurden. Des Weiteren werden auch diejenigen Normen und technischen Regeln aufgeführt, die zur Zeit in den entsprechenden Gremien erarbeitet bzw. überarbeitet werden. In den Tabellen 5.3 und 5.4 werden die Kennbuchstaben des jeweiligen Bearbeitungsstandes und die Ziffern der Bezugsquellen, die sich in der Statusspalte der armaturenrelevanten Normen und technischen Regeln befinden, näher erläutert.

**Tabelle 5.3:** Kennbuchstaben des Bearbeitungsstandes

AWI	=	Approved work item
E	=	Entwurf
EV	=	Entwurfsvorlage/Arbeitspapier
B	=	Beabsichtigte Zurückziehung (BV ~ einer Vornorm, BE ~ eines Entwurfs)
K	=	Kurzverfahren
V	=	Vornorm
Vh	=	Vorhaben
WI	=	Work Item
Z	=	Zurückziehen (ZV ~ einer Vornorm, ZE ~ eines Entwurfs)

**Tabelle 5.4:** Ziffern der Bezugsquellen

- 0 = z.Z. nicht als offizielles Papier zu beziehen  
 1 = Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin  
 2 = VON CEN angenommen. Bis zur Veröffentlichungen als DIN od. DIN-Vornorm als Vormanuscript beim Beuth Verlag zu beziehen  
 3 = DKE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt/M  
 4 = Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas & Wasser mbH, 53056 Bonn  
 5 = VDE-Verlag GmbH, Bismarckstr. 33, 10625 Berlin  
 6 = TÜV-Verlag GmbH, Unternehmensgruppe TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg,  
       51123 Köln  
 7 = Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Str. 449, 50939 Köln

**Tabelle 5.5:** Grundnormen

Status	Norm/Regelwerk	Titel	Normen bzw. Arbeits- ausschuss
1	DIN EN 14341:2006-10	Industriearmaturen- Rückflussverhinderer aus Stahl Industrial valves - Steel check valves	
1	DIN EN ISO 15848-2: 2006-11	Industriearmaturen - Unkontrollierte Emissionen - Mess-, Prüf- und Qualifikationsverfahren Teil 2: Fertigungsbegleitende Abnahmeprüfung von Armaturen - Baugruppen	ISO/TC 153 SC 1/WG 10 CEN/TC 69 WG 1 NAA-69/1 ISO-lead
1	ISO 15848-2:2006-08	Industriearmaturen - Mess-, Prüf- und Qualifikationsverfahren Teil 2: Fertigungsbegleitende Abnahmeprüfung von Armaturen - Baugruppen	
5	EN 60534-4:2006-09	Stellventile für die Prozessregelung; Teil 4: Abnahme und Prüfung (IEC 60534-4:2006)	IEC SC 65 B WG 5 CENELEC DKE K 963
E	IEC 60534-9 Ed. 1.0	Industrial process control valves- Part 9. Test Procedure for control valves reponse measurements from step inputs	IEC/SC 65 B WG 9 CENELEC DKE 963 IEC-Secritariat: USA

**Tabelle 5.6:** Systemnormen und Normen für besondere Anwendungsgebiete

Status	Norm/Regelwerk	Titel	Normen bzw. Arbeits- ausschuss
E, 1	DIN EN 13175/A2:2006-09	Spezifikation und Prüfung für Armaturen und Ausrüstungsteile von Flüssigbehältern	
E, 1	PrEN 13175/prA2:2006-08	Spezifikation und Prüfung für Armaturen und Ausrüstungsteile von Flüssiggasbehältern Specification and testing for Liquefied Petroleum Gas tank valves and fittings	

**Tabelle 5.7:** VdTÜV-Merkblätter

Status	Norm/Regelwerk	Titel	Normen bzw. Arbeits- ausschuss
6	VdTÜV MB Armaturen 100:2006-07	Richtlinien für die Baumusterprüfung von Armaturen im Geltungsbereich der Richtlinie 97/23/EG	VdTÜV
6	VdTÜV MB Berstsicherung 100:2006-07	Richtlinien für die Baumusterprüfung von Berstscheibeninrichtungen sowie Berstscheibeneinrichtungen und Sicherheitsventilen in Kombination im Geltungsbereich der Richtlinie 97/23/EG (Druckgeräterichtlinie)	VdTÜV
6	VdTÜV MB Sicherheitsventil 100:2006-07	Richtlinie für die Baumusterprüfung von Sicherheitsventilen im Geltungsbereich der Richtlinie 97/23/EG (Druckgeräterichtlinie)	VdTÜV
6	VdTÜV MB Druck 100:2006-07	Anforderungen für die Prüfung von Druckwächtern und Druckbegrenzern	VdTÜV
Vh	<00300221>	Armaturen - Begriffe - Teil 3: Definition von Begriffen; (Europäisches Normungsvorhaben)	NA 003-00-10AA
VH	<10900199>	Schieber, Kugel- und Rückschlagventile aus Stahl mit Nennweiten DN 100 und kleiner für die Erdöl- und Erdgasindustrie; (Europäisches Normungsvorhaben)	NA 109-00-01 AA (NÖG)

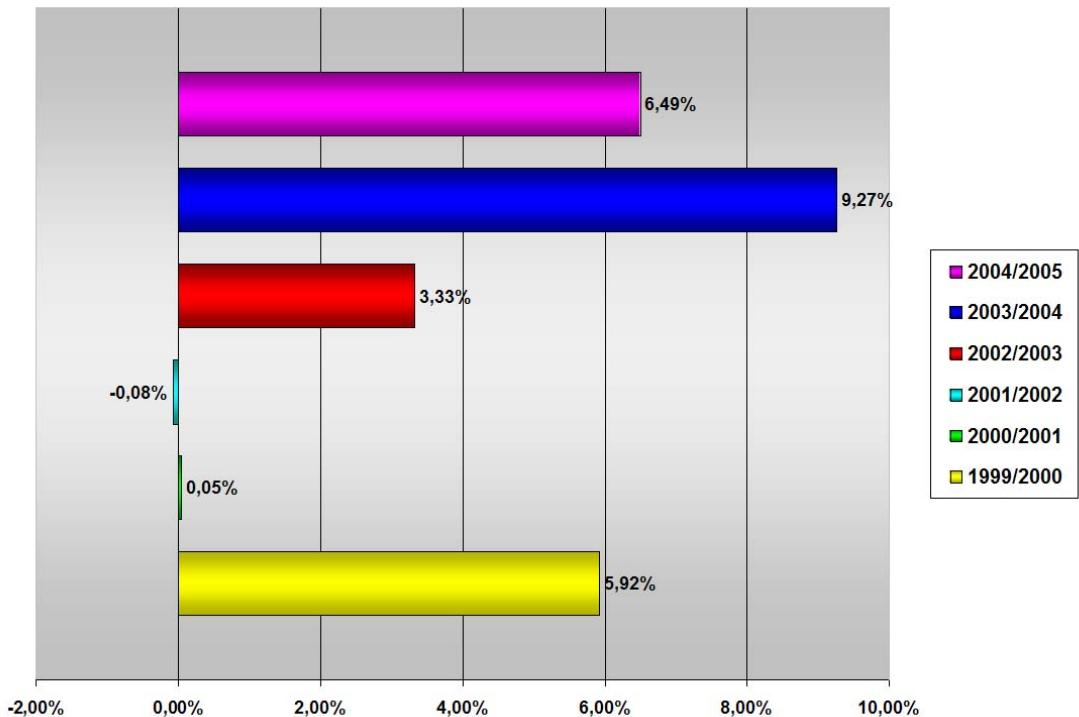
# **6 Industriematuren**

Nachdem die Segmente der Unternehmenslogistik, die Grundlagen des Netzwerk-Designs, die Begriffe, Definitionen und Grundlagen des Recyclings, der Aufarbeitung und die juristischen Aspekte der Armaturenaufarbeitung dargestellt wurden, wird nun in Kapitel 6 und 7 eine umfassende Branchen- und Marktanalyse für Industriematuren und die Armaturenaufarbeitung durchgeführt. Das daraus resultierende Datenmaterial fließt teilweise in die in Kapitel 9 untersuchten Szenarien ein. Danach werden wichtige Aspekte der Armaturenauswahl wie Leistungsanforderungen an Industriematuren, Auswahlkriterien und Vergleich von Armaturenbauarten, Armaturenselektion nach Medium und Betriebsparametern und Werkstoffe im Armaturenbau näher betrachtet. Diese Betrachtungen sind notwendig, um zu verdeutlichen welchen Einfluss die Armaturenauswahl auf die späteren Aufarbeitungskosten, die u.a. in Kapitel 7 näher erläutert werden, hat. Des Weiteren werden verschiedene Dichtungssysteme bei Industriematuren vorgestellt, die im Rahmen der Aufarbeitung eingesetzt werden. Im Anschluss wird eine Unterteilung der Industriematuren in Armaturenklassen vorgenommen. Ob und auf welche Weise eine Altarmatur noch aufarbeitbar ist oder verschrottet bzw. der metallurgischen Verwertung zugeführt werden muss, hängt vom Schadensausmaß ab. Deshalb werden die Gründe für Schäden bei Industriematuren und die Gefahrenpotentiale von Durchflussmedien sowie Präventivmaßnahmen näher betrachtet.

## **6.1 Branchen- und Marktanalyse für Industriematuren**

Es gibt wenige Industriezweige, die so eng mit der gesamten Wirtschaft verknüpft sind wie die Industriematurenbranche. Die chemische Industrie ist einer der wichtigsten Abnehmer von Industriematuren neben Kraftwerken, der Wasserversorgung, der Abwasserentsorgung, der Pharmazie, der Lebensmittelindustrie und der Gebäudetechnik, um nur einige bedeutende Branchen aufzuführen.

Das Jahr 2005 war für die Armaturenbranche mit einem Wachstum von 6,49 % ein gutes, wenn auch kein Spitzenjahr, siehe Abbildung 6.1. Nach 9,27 % im Vorjahr war die Produktion leicht rückläufig. Die Stagnation der Armaturenproduktion in den Jahren 2001 und 2002 ist u.a auf einen Investitionsrückgang im Anlagenbau zurückzuführen. Im

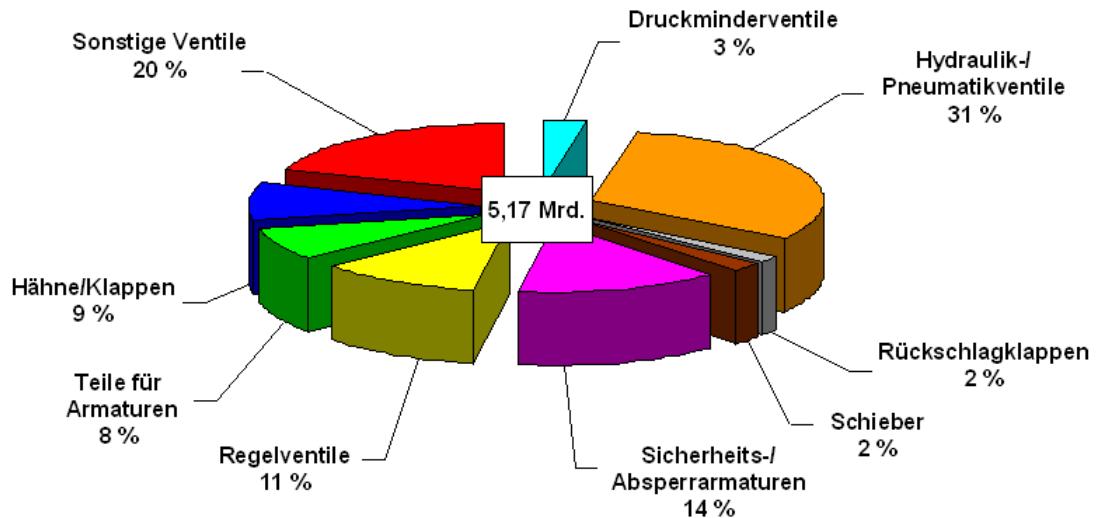


**Abbildung 6.1:** Wachstumsraten der deutschen Industriearmaturenproduktion von 1999 bis 2005, Datenquelle: Statistisches Bundesamt

Jahre 2003 nahmen die Investitionen im Anlagenbau wieder zu, dadurch kam es zu einer Erholung in der Armaturenbranche. Des Weiteren kann sich die positive Entwicklung der Armaturenaufarbeitung negativ auf die Armaturenneuproduktion auswirken. Dies ist nur ein Aspekt, der für eine Korrelation der beiden Märkte spricht. In der Regel werden bei Neuanlagen immer noch Neuarmaturen den aufgearbeiteten Armaturen vorgezogen. Bei der Instandhaltung von Prozessanlagen werden zunehmend aufbereitete Armaturen eingesetzt. Der Anteil der Armaturenaufarbeitung beläuft sich auf ca. 3 % der Gesamtarmaturenproduktion, Tendenz steigend. Eine allgemeine Betrachtung der Jahre 1999 bis 2005 zeigt jedoch, dass sich der Industriearmaturenmarkt generell positiv entwickelt. Die in Kapitel 9 angenommenen Nachfragesteigerungen nach Neuarmaturen basieren auf Durchschnittswerten der in Abbildung 6.1 dargestellten Wachstumsraten und wurden mit den Angaben und Prognosen von Armaturenherstellern abgeglichen.

Im Jahr 2005 wurden Armaturen im Wert von 5,17 Mrd. Euro hergestellt. In der Abbildung 6.2 wird die Armaturenproduktion, unterteilt in die wichtigsten Armaturengruppen,

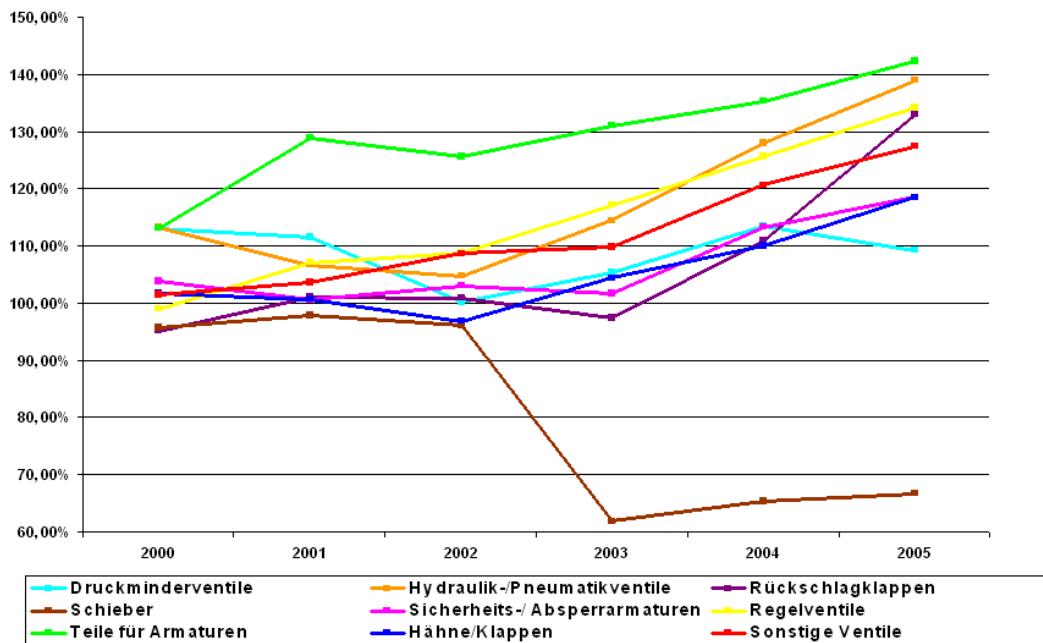
pen, dargestellt. Die größte Produktgruppe mit 31 %, also knapp einem Drittel des



**Abbildung 6.2:** Deutsche Armaturenproduktion im Jahr 2005, Datenquelle: Statistisches Bundesamt

Gesamtvolumens, sind Hydraulik- und Pneumatikventile, die u.a. im Maschinenbausektor und im Kraftfahrzeugbau verwendet werden. Mit 20 % rangieren sonstige Ventile auf dem zweiten Rang. Darunter fallen z.B. Magnetventile, Heizkreisverteiler, Ölregulierungsvorrichtungen, Ventile für Heizungsanlagen, Luftauslassventile und diverse Ventile aus Kunststoffen. Danach folgen mit 14 % Sicherheits- und Absperrarmaturen. Diese Armaturen werden branchenübergreifend installiert. Regelventile, die häufig in der Chemie, Petrochemie, Farben- und Lackindustrie und Lebensmittelindustrie eingesetzt werden, haben einen Anteil am Gesamtvolume von 11 %. Hähne und Klappen erreichen 9 %, Druckminderventile 3 %, Schieber und Rückschlagklappen je 2 %. Diese Armaturentypen finden sich wieder in vielen technischen Anlagen. Teile für Armaturen belaufen sich auf 8 % des Produktionsvolumens. Unter diese Position fallen z.B. Teile für Ventile bei der pneumatischen Energieübertragung, Verbindungselemente für Armaturen und Schläuche, Gewindeteile für Sanitärarmaturen und Verteilerstationen für Heizungssysteme. Für die in Kapitel 9 betrachteten Szenarien werden die durchschnittlichen Aufarbeitungskosten und Neupreise von Hähnen, Schiebern, Klappen, Ventilen und Filtern auf der Basis einer Großabstellung herangezogen.

Die Analyse der Abbildung 6.3 zeigt deutlich, dass die Umsatzentwicklung von 2000 bis 2002 in fast allen Armaturensegmenten stagnierte oder leicht rückläufig war. Ausgenommen davon waren die Teile für Armaturen, die im gleichen Betrachtungszeitraum einen starken Umsatzanstieg von 25,7 % zu verzeichnen hatten. Dies lässt sich darauf

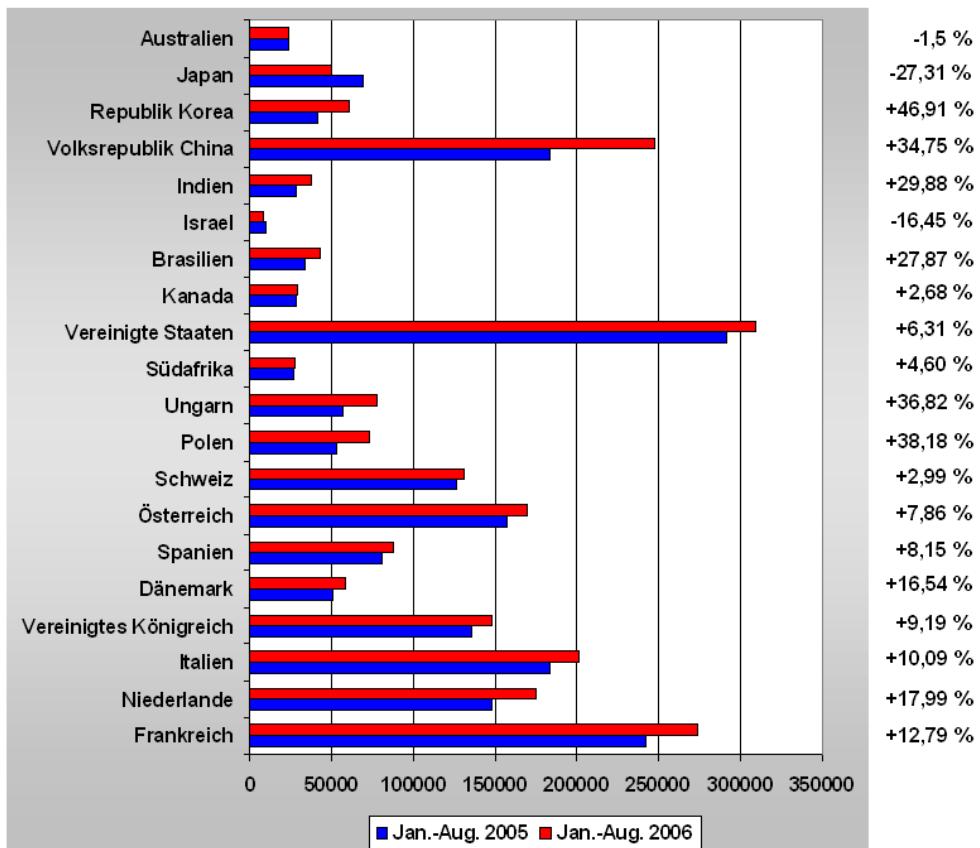


**Abbildung 6.3:** Umsatzentwicklung der Armaturensegmente auf der Basis 1999 = 100%,  
Datenquelle: Statistisches Bundesamt

zurückführen, dass in den investitionsschwachen Jahren 2000 bis 2002 das Interesse bei den Unternehmen, Armaturen aufzuarbeiten, zugenommen hat. Im Anschluss wird die Umsatzentwicklung der wichtigsten Segmente der Armaturenbranche von 2002 bis 2005 analysiert. Bei Schiebern war ein starker Umsatzeinbruch von 29,45 % zu verzeichnen. Schieber sind Industriearmaturen, die bei größeren Rohrleitungsnennweiten zum Einsatz kommen und damit hohe Investitionskosten verursachen. Der Umsatzrückgang bei den Schiebern ist darauf zurückzuführen, dass immer häufiger, wenn technisch möglich, preiswertere Alternativen wie z.B. Klappen eingesetzt werden. Ein weiteres Kriterium ist, dass die Aufarbeitung von Schiebern die kostengünstigere Variante gegenüber einer Neuanschaffung ist. Hydraulik- und Pneumatikventile sind der Spitzenreiter bei der Umsatzentwicklung mit 34,27 %, dicht gefolgt von den Rückschlagklappen mit 32,17 %. Regelventile befinden sich mit einem Wachstum von 25,28 % auf dem dritten Platz. Noch zu erwähnen sind Hähne und Klappen mit 21,68 %. Die allgemeine positive Umsatzentwicklung der Armaturenbranche ab 2002 ist letztendlich das Resultat zunehmender Investitionen im In- und Ausland.

Der Export von deutschen Industriearmaturen stieg von Januar bis August 2006 im Vergleich zum Vorjahr um ca. 13,3 % auf 2,23 Mrd. €. Zu den wichtigsten Abnehmern für die deutschen Hersteller von Industriearmaturen in 2006 zählen die USA (309 Mio. €),

Frankreich (274 Mio. €) und die Volksrepublik China mit (248 Mio. €) (siehe Abbildung 6.4). Besonders dynamisch entwickelte sich das Exportgeschäft mit der Republik Korea (46,91 %), Polen (38,18 %), Ungarn (36,82 %) und mit der Volksrepublik China (34,75 %). Festzustellen ist, dass der Export nach China seit Jahresbeginn im Vergleich zum Vorjahr um ca. 10 % zurückging. Die Armaturenbranche beurteilt die Geschäftserwartungen für 2006 unverändert positiv. Insbesondere aus der chemischen und petrochemischen Industrie, aber auch aus dem Kraftwerksbau sowie der Eisen- und Stahlindustrie erwarten die Armaturenhersteller für das 4. Quartal 2006 eine steigende Nachfrage. Abschließend kann



**Abbildung 6.4:** Export deutscher Industriearmaturen, Januar bis August 2005 und 2006; Datenquelle: Statistisches Bundesamt

festgehalten werden, dass der Export aufgrund der Komplexität im Modell in Kapitel 8 und 9 nicht berücksichtigt wird.

## 6.2 Aspekte bei der Armaturenauswahl

Im Vordergrund stehen bei der Auswahl und Dimensionierung von Industriearmaturen immer verfahrenstechnische, umweltspezifische und vor allem auch wirtschaftliche Kriterien. In der Regel unterliegen diese einer unterschiedlichen Gewichtung, da sie stark von den technischen Anforderungen, die an die Industriearmaturen gestellt werden, abhängig sind. Ferner haben diese Kriterien einen maßgeblichen Einfluss auf die Anschaffungs- und die späteren Aufarbeitungskosten. Deshalb werden im Anschluss die wichtigsten wirtschaftlichen und technischen Aspekte dargestellt.

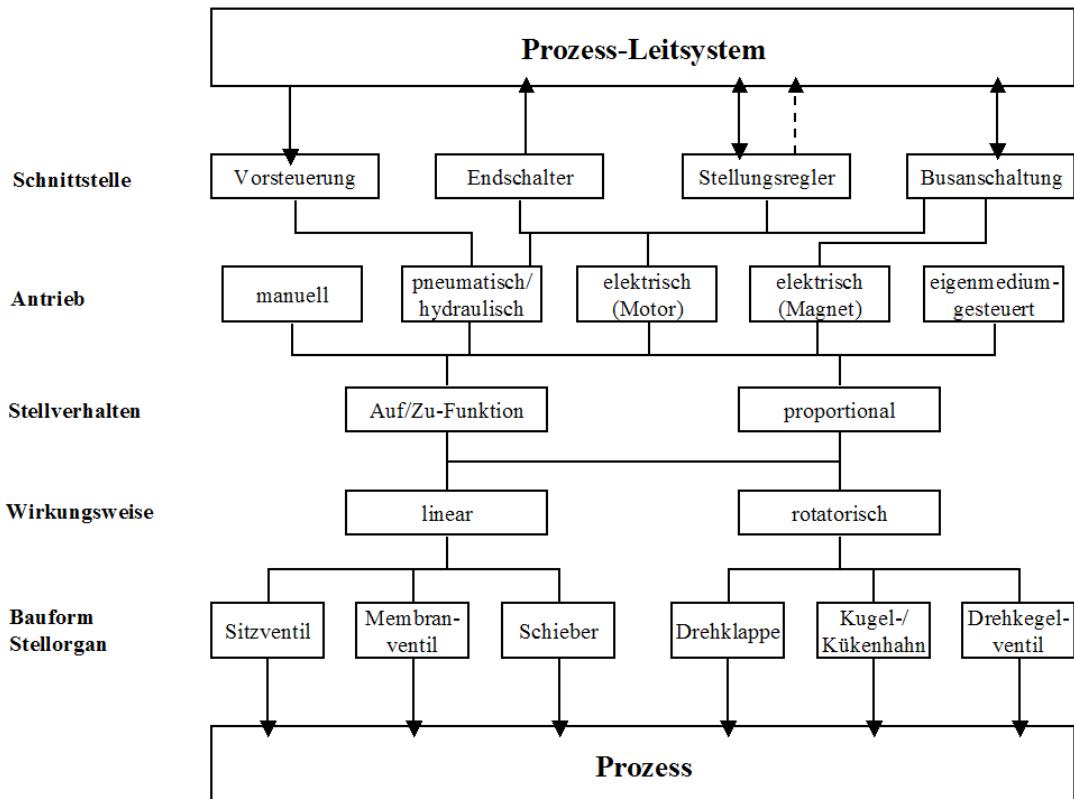
### 6.2.1 Leistungsanforderungen an Industriearmaturen

Für die Auswahl einer Armatur müssen ihre verfahrenstechnischen Aufgaben festgelegt werden. Je präziser die Aufgabenbeschreibung ist, desto besser kann die dafür geeignete Armatur festgelegt werden. Dafür ist es äußerst wichtig, die folgenden Fragestellungen gründlich zu prüfen (vgl. Mattick/Dittmer 2000, S. 2) [82]:

- Handelt es sich um eine Armatur, die von Hand betätigt wird?
- Handelt es sich bei der Industriearmatur um eine Auf/Zu-Armatur?
- Ist die gewünschte Industriearmatur sowohl eine Auf/Zu-Armatur als auch eine Armatur mit Regelfunktion?
- Soll die Armatur automatisiert werden?
- Wie dichtschließend soll die Armatur sein?
- Werden die Anforderungen der TA Luft an die Armatur gestellt?
- Ist das Medium feststoffhaltig?
- Besteht das Medium aus reinem Feststoff?
- Kann in Toträumen das Produkt polymerisieren oder verkleben?
- Besteht eine erhöhte Verschleißgefahr durch mediumbedingte Abrasion und Kavitation?
- Kann das Medium an dem Werkstoff der Armatur Korrosion verursachen?
- Produktbedingter maximal zu erwartender Druck und welche dazugehörige Temperatur werden erwartet?
- Wie häufig wird die Armatur betätigt?
- Dient die Armatur zur Probenahme eines Produktes?
- Ist die Armatur aufarbeitbar?

Um eine möglichst optimale Armaturenauswahl zu gewährleisten, ist es erforderlich, die oben gestellten Fragen vollständig und präzise zu beantworten.

In Prozess- und betriebstechnischen Anlagen werden zunehmend Armaturen automatisiert, die den Prozess über ein Prozessleitsystem steuern und regeln. In der Abbildung 6.5 wird der schematische Aufbau einer Industriearmatur strukturiert dargestellt. Eine



**Abbildung 6.5:** Schematischer Aufbau einer Industriearmatur (vgl. Lange 2003, S. 21) [77]

Industriearmatur kann manuell oder mit einem pneumatischen, hydraulischen oder elektrischen Antrieb betrieben werden. Wird der Prozess über ein Leitsystem mit Hilfe einer Industriearmatur, die mit einem Antrieb versehen ist, gesteuert, muss die Kommunikation zwischen dem Prozessleitsystem und den Aktoren<sup>1</sup> gewährleistet sein. Im Laufe der Jahre haben sich die Industriearmaturen technisch weiterentwickelt. Der größte Innovationsschub ist jedoch bei den Schnittstellenkomponenten und Ventilsteuерungen zu beobachten.

<sup>1</sup> Industriearmaturen mit Antrieben

## 6.2.2 Auswahlkriterien und Vergleich von Armaturenbauarten

Die Selektion der Armaturenart setzt eine präzise Anlagenkenntnis und deren Parameter voraus. Je nach Einsatzfeld müssen die einzelnen Komponenten darauf abgestimmt werden. Dabei können die verfahrenstechnischen Voraussetzungen die Lösungsmöglichkeiten stark einschränken.

Bei der Planung einer verfahrenstechnischen Anlage sind Industriearmaturen, die die Absperrung, Verteilung und Regelung von Durchflussmedien ermöglichen, ein wichtiges Element der zugehörigen Rohrleitungssysteme. Dabei sollte sich die Auswahl und Beschaffung auf möglichst wenige reparaturfreundliche und aufarbeitbare Armaturentypen/-bauarten beschränken, um Kosten für Lagerhaltung und Ersatzteile zu minimieren. Ein Kostenvergleich sollte in mehreren Stufen erfolgen. Nach dem Vergleich der unterschiedlichen Armaturentypen, bezüglich ihrer spezifischen bauartbedingten Vor- und Nachteile, werden die geeigneten Bauarten ausgewählt. In Tabelle 6.1 werden Ventile, Schieber, Klappen und Hähne anhand der wichtigsten Auswahlkriterien mit Noten von 1 bis 5 (sehr gut bis ungenügend) bewertet (vgl. Mattick/Dittmer 2000 S. 4) [82]). Eine Aus-

**Tabelle 6.1:** Vergleich und Bewertung der Armaturenbauarten (vgl. Mattick/Dittmer 2000 S. 4) [82])

Auswahlkriterien	Ventil	Schieber	Klappe	Hahn
DN-Bereich	3	1	2	3
PN-Bereich	1	2	4	3
Temperaturbereich	1	2	3	3
Dichtigkeit im Abschluss	2	3	1	1
geringer Druckverlust	3	1	2	1
Eignung für Regelfunktion	1	5	2	4
Eignung zur Automatisierung	3	3	1	1
Betätigungsauwand/-zeit	3	3	1	1
Eignung für feststehholtige Medien	4	1	2	3
Verschmutzungsgefahr/Toträume	3	4	1	2
Platzbedarf	3	3	1	2
Gewicht	3	4	1	3
Aufwand für Einbau	3	3	2	3
Aufwand für Beheizung/Isolation	3	3	1	2
Aufwand für Aufarbeitung	3	4	1	2

wertung dieser Tabelle unterstreicht die gleichberechtigte Existenz der unterschiedlichen Bauarten. Würde nur eine Bauart existieren, die alle Vorzüge in sich vereint, wäre ein Vergleich nicht mehr notwendig, da diese alle andere Armaturentypen vom Markt verdrängen würde. Somit steht am Ende einer Armaturenauswahl immer ein Kompromiss.

Bei einem Preisvergleich für eine Armaturenbauart ist besonders auf die Einhaltung der technischen Spezifikationen, Qualität und die Lebensdauerkosten zu achten. Die Lebensdauerkosten für eine Industriearmatur setzen sich zusammen aus den Anschaffungs- und Montagekosten, den Demontagekosten, dem Wiederaufbereitungsaufwand und den Einbaukosten.

Verfahrenstechnische Charakteristiken für die Dimensionierung sind die Nennweite, der Betriebsdruck, die Betriebstemperatur, die Beständigkeit des verwendeten Materials gegenüber dem Medium und der Druckverlust. Die Nennweite wird festgelegt durch die Durchflussmenge, den Druckverlust und die Druckdifferenz an der Armatur. Es sind jedoch weitere Aspekte bei der Größenbestimmung der Armaturen von Bedeutung. Die richtige Wahl des Werkstoffes ist eng verknüpft mit der Bestimmung der Druckstufe in Abhängigkeit der Temperatur, dies gilt für alle Industriearmaturen. In Tabelle 6.2 wird für Flansche aus dem Werkstoff 1.4401 der maximal zulässige Druck in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Bei zunehmender Temperatur nimmt die Festigkeit des Werk-

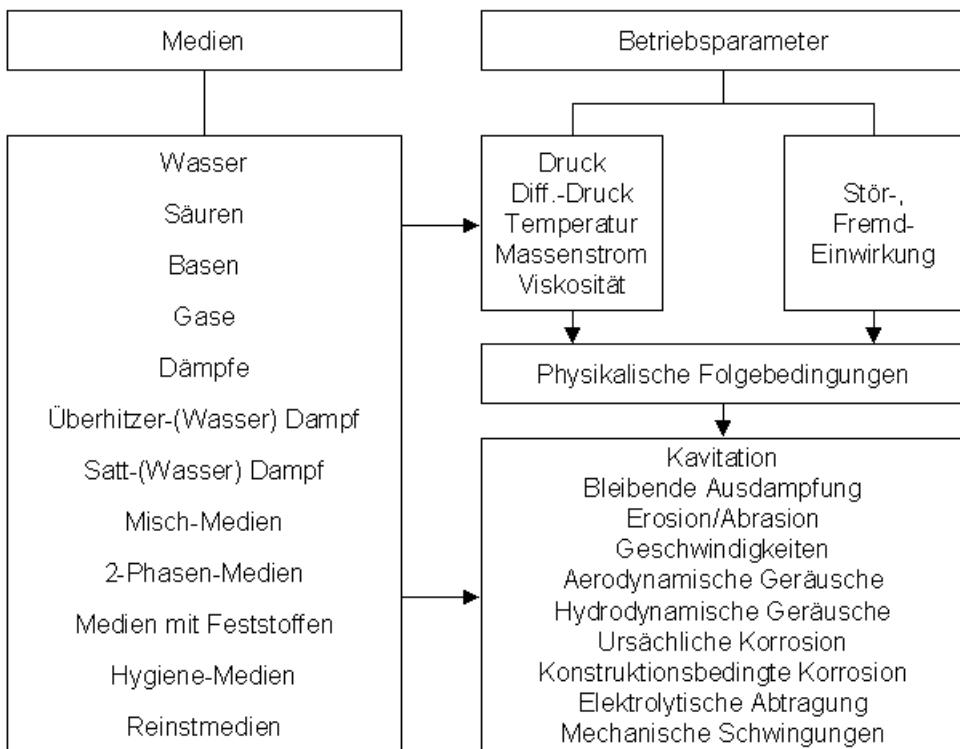
**Tabelle 6.2:** Druck-Temperatur-Abhängigkeit für Flansche aus austenitischem Stahl 1.4401 (DIN EN 1092-1)

PN	maximal zulässiger Druck [bar] bei Temperatur [°C]									
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500
<b>2,5</b>	2,5	2,5	2,2	2,1	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6
<b>6</b>	6,0	6,0	5,4	5,0	4,7	4,4	4,2	4,1	4,0	3,9
<b>10</b>	10,0	10,0	9,0	8,4	7,9	7,4	7,1	6,8	6,7	6,6
<b>16</b>	16,0	16,0	14,5	13,4	12,7	11,8	11,4	10,9	10,7	10,5
<b>25</b>	25,0	25,0	22,7	21,0	19,8	18,5	17,8	17,1	16,8	16,5
<b>40</b>	40,0	40,0	36,3	33,7	31,8	29,7	28,5	27,4	26,9	26,4
<b>63</b>	63,0	63,0	57,3	53,1	50,1	46,8	45,0	43,2	42,4	41,7
<b>100</b>	100,0	100,0	90,9	84,2	79,5	74,2	71,4	68,5	67,3	66,1
<b>160</b>	160,0	160,0	145,5	134,8	127,2	118,8	114,2	109,7	107,8	105,9
<b>250</b>	250,0	250,0	227,3	210,7	198,8	185,7	178,5	171,4	168,4	165,4
<b>320</b>	320,0	320,0	291,0	269,7	254,4	237,7	228,5	219,4	215,6	211,8
<b>400</b>	400,0	400,0	363,8	337,1	318,0	297,1	285,7	274,2	269,5	264,7

stoffes ab und führt damit zur Reduzierung des zulässigen Druckes. Dies ist bei der Projektierung einer chemischen Anlage zu berücksichtigen.

### 6.2.3 Armaturenselektion nach Medium und Betriebsparametern

Bei der Planung einer Prozessanlage sind das Medium und die Betriebsparameter die vorgegebenen Eckdaten. Es ist äußerst wichtig, dass der Anlagenplaner die exakten Betriebsparameter erhält, da fehlerhafte Betriebsparameter zu unvorhersehbaren Belastungen an der Armatur führen. Während der Produktion in einer Prozessanlage treten neben den Grundparametern, Stör- und Fremdeinwirkungen sowie physikalische Folgebedingungen auf, die ebenfalls zu beachten sind. In Abbildung 6.6 wird der Zusammenhang zwischen Medien und Betriebsparametern dargestellt. Die Auswahl einer Industriear-



**Abbildung 6.6:** Medien und Betriebsparameter (vgl. Münckel 2000, S. 13 [87])

matur muss auch nach betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen, deshalb sind die Betreiberkosten in die Betrachtung mit einzubeziehen. In Abbildung 6.7 wird die

Vernetzung zwischen den Betriebs- und Konstruktionsparametern sowie den Betreiberkosten dargestellt, die zur optimalen Armaturenauswahl führen. Der Projektingenieur ist auf korrekte Betriebsparameterangaben angewiesen, um bei der Armaturenauswahl z.B. die richtigen Werkstoffe und Nennweiten festlegen zu können. Bei fehlerhaften Informationen können unter Umständen Schallemission und Kavitation an der Armatur auftreten.

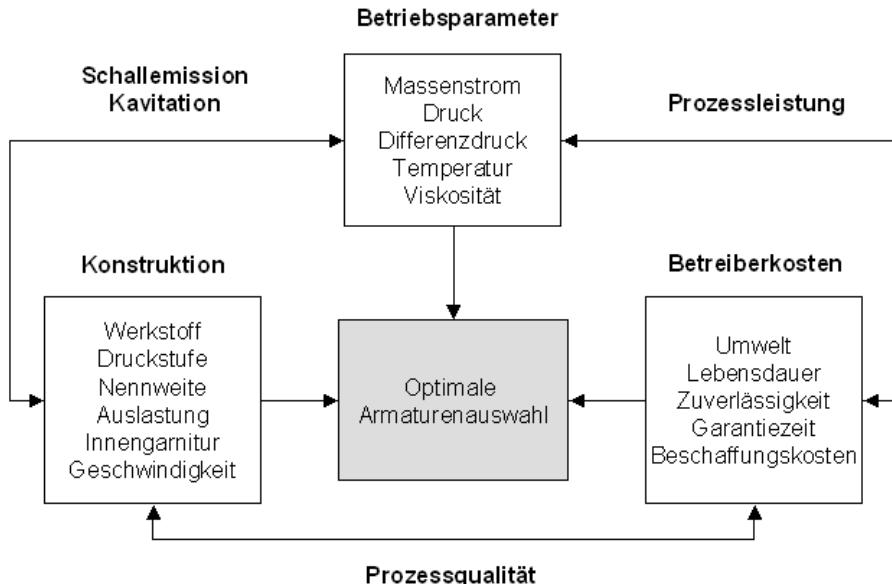


Abbildung 6.7: Optimale Armaturenauswahl (vgl. Münckel 2000, S. 14 [87])

#### 6.2.4 Werkstoffe im Armaturenbau

Die Anforderungen an die Werkstoffe sowie die drucktragenden Gehäuseteile gelten für alle Armaturen gemeinsam. Für Gehäuse, Gehäuseteile, Verbindungselemente und Armatureninnengarnituren unterliegen die Werkstoffe im Wesentlichen den jeweiligen gesetzlichen Rahmenbedingungen, den Technischen Regelwerken, den dazugehörigen Normen und den Bedingungen des Anlagenbetreibers. In den letzten Jahren konnte eine Entwicklung bei den Gehäusen der Industriearmaturen hin zu höherwertigen metallischen Werkstoffen festgestellt werden. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die klassischen Edelstähle, (siehe Tabelle 6.3), die zunehmend die Werkstoffe wie Stahlguss, Sphäroguss und Grauguss ersetzen. Diese höherwertigen Werkstoffe, wie z.B. Edelstahl, Hartmetall oder Keramik werden ebenfalls bevorzugt bei höherem Verschleiß bei den Innengarnituren einer Industriearmatur eingesetzt. Durch den Einsatz von Edelstahlguss wird die

**Tabelle 6.3:** Auswahl von Gehäusewerkstoffen nach DIN (vgl. Muschet 2003, S. 152 [88])

Werkstoffkurz-name	Gussstücke		Norm	Schmiedestücke/warmgewalzte Erzeugnisse		
	Werkstoff-nummer			Werkstoffkurz-name	Werkstoff-nummer	Norm
GP240GH	1.0619	EN 10213-2	P295GH	1.0481	prEN 10028-2	
G20Mo5	1.5419	EN 10213-2	16Mo3	1.5419	prEN 10028-2	
G17CrMo5-5	1.7357	EN 10213-2	13CrMo4-5	1.7335	prEN 10028-2	
GX5CrNi19-10	1.4308	EN 10213-4	X5CrNi18-10	1.4301	prEN 10028-5	
GX5CrNiMo19-11-2	1.4408	EN 10213-4	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	prEN 10028-5	
GX5CrNiMoNb19-11-2	1.4581	EN 10213-4	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	prEN 10028-5	

innere und äußere Korrosionsbeständigkeit gegen aggressive Medien verbessert und somit die Lebensdauer bei störungsfreierem Betrieb erhöht. Bei sehr aggressiven Medien müssen sehr hochwertige und teuere metallische Gehäusewerkstoffe wie Hastelloy, Titan, Tantal u.Ä für die drucktragenden Gehäuseteile verwendet werden.

Armaturengehäuse und -teile werden entweder gegossen, geschmiedet oder als Schweißkonstruktion gefertigt. Prioritär werden Armaturengehäuse und -teile aus Stahlguss hergestellt, da die Gießereien eine große Palette von Werkstoffen anbieten. Das preisgünstigere Gussverfahren hat gegenüber den geschmiedeten Armaturengehäusen und den Schweißkonstruktionen den Nachteil, dass Gussfehler auftreten können. In Tabelle 6.4 sind die wichtigsten Fehlerarten zusammengefasst und nach ihrer Auftrittshäufigkeit von 1 am meisten bis 8 am wenigsten aufgeführt. Diese Gussfehler führen bei einer Qualitätsprüfung dazu, dass die fehlerhaften Gehäuse und Gehäuseteile aussortiert und wieder eingeschmolzen werden. In der DIN 1690 „Technische Lieferbedingungen für Gussstücke aus metallischen Werkstoffen“ sind die Anforderungen an gegossene Armaturenkomponenten geregelt. Teil 10 in DIN 1690 beschreibt die Qualitätsanforderungen für Industriearmaturen und legt die Anfordungen in Qualitätsklassen von A-D fest. In DIN 1690 Teil 2 werden jeder Qualitätsklasse bestimmte Volumen- und Oberflächenfehler zugeordnet, die durch geeignete zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen nachzuweisen sind. Bei zerstörungsfreien Prüfverfahren wird die Qualität der Armaturengehäuse untersucht, ohne diese zu beschädigen.

Zur Feststellung von Volumenfehlern in Gussgehäusen bieten sich die akustische Ultraschallprüfung oder die Durchstrahlungsprüfung (Röntgen- und Isotopentechnik) an. Bei der Ultraschallprüfung wird die Oberfläche des Armaturengehäuses mit einem Koppelmittel (z.B. Gel oder Öl) versehen. Durch einen Prüfkopf, der Ultraschall von 0,5 bis 25 MHz sendet und empfängt, wird die zu prüfende Armaturengehäuseoberfläche abgefahrt. Lunker, Einschlüsse oder Risse führen zu Änderungen der akustischen Signale, die vom Prüfkopf empfangen werden. Mit der Zeit, die zwischen Senden und Empfangen

**Tabelle 6.4:** Auszug aus einer Ausfallstatistik für Gussfehler (vgl. Vogel 2000, S. 97) [148]

Wichtige Fehlerarten								
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Hohlräume, Lunker, Blasen</b>	Lunker, offen	Lunker geschlos- sen	Einfall- stellen	Blas- lunker	Gas- blasen	Pin- holes	Kern- luft	Gas- kanäle
<b>Einschlüsse</b>	Schlacke	Schaum- stellen	Oxyd- haut	Sand- stellen	Schlichten, Schwärze			
<b>Risse, Brüche</b>	Warm- risse		Kalt- risse		Schleif- risse		Härte- risse	Schweiß- risse
<b>Auswüchse, Schülpfen</b>	Bruch		Schülpfe		Treiben, Kern			
<b>Oberflächen- fehler Rauigkeit</b>	Form, rau	Kern, rau	Form, narbig	Kern, narbig	Form, wellig	Kern, wellig		
<b>Unvoll- ständige Gussstücke</b>	Schlacke Guss	nicht ausge- laufen	Gas- polster	Kanten, Schrift	Aus- brüche			
<b>Krümmung Verzug</b>	Verzug, Form	Durch- formung	Verzug, Glühen	Verzug, Schweißen	Eigen- spannung			
<b>Maßfehler</b>	Modelle	Kern- kasten	Versatz, Form	Versatz, Kern				
<b>Werkstoff- fehler</b>	Verwech- selung	Analyse	Seiger- ungen	Wärmebe- handlung	Festig- keit	Zähig- keit	Härte	Korros- ionsbest.

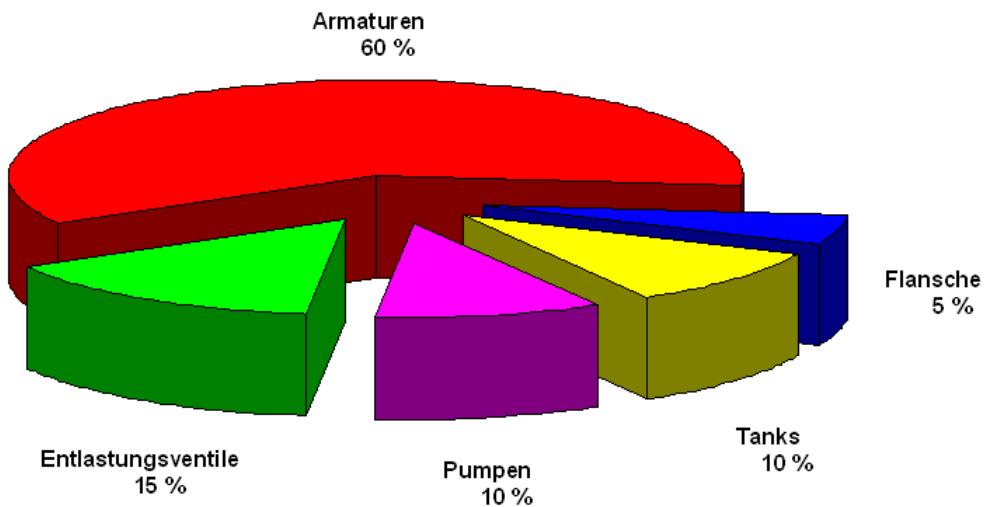
liegt, kann die Wegstrecke ermittelt und elektronisch visualisiert werden. Das dargestellte Bild auf einem Monitor zeigt die genaue Lage und die Ausmaße des Fehlers. Die Durchstrahlungsprüfung ist ein Röntgenverfahren, das die Dichte des Materials auf einem Röntgenfilm abbildet. Treten Unterschiede in der Dichte oder Materialdicke im Armaturengehäuse auf, so wird dies durch die unterschiedliche Schwärzung des Röntgenfilms sichtbar. Liegt ein Materialfehler vor, zeigt sich dies durch den Unterschied der Dichte zwischen dem Grundmaterial und der Fehlstelle, selbst kleine Risse können dabei nachgewiesen werden.

Oberflächenfehler werden durch eine Farbeindring- oder Magnetpulverprüfung nachgewiesen. Die Farbeindringprüfung nach DIN EN 571-1 nutzt Kapillarkräfte, um feine Oberflächenrisse und Poren sichtbar zu machen. Nach Reinigung des Armaturengehäuses wird das meist rote Eindringmittel aufgebracht. Nach Ablauf der Einwirkzeit wird das Gehäuse z.B. mit Wasser gereinigt, danach getrocknet und der in der Regel weiße Entwickler, ein feinkörniges Pulver (z.B. Kreide) in Wasser oder Lösemittel suspendiert, aufgetragen. Durch die Kapillarwirkung wird das Eindringmittel aus den feinen Rissen herausgezogen. Die Fehlerstellen sind durch den großen Farbkontrast einfach zu lokalisieren. Mit

der Magnetpulverprüfung können Risse in Gehäusen aus ferromagnetischen Werkstoffen nachgewiesen werden. Das Armaturengehäuse wird so magnetisiert, dass die Feldlinien senkrecht aus dem Gehäuse austreten. Fluoreszierendes eingefärbtes Eisenpulver wird auf den zu prüfenden Bereich trocken oder mit einem Nassverfahren aufgetragen. Das Eisenpulver setzt sich durch Änderungen des Magnetfeldes an Rissen fest. UV-Licht macht die Fehlstellen sichtbar.

### 6.3 Dichtungssysteme bei Industriearmaturen

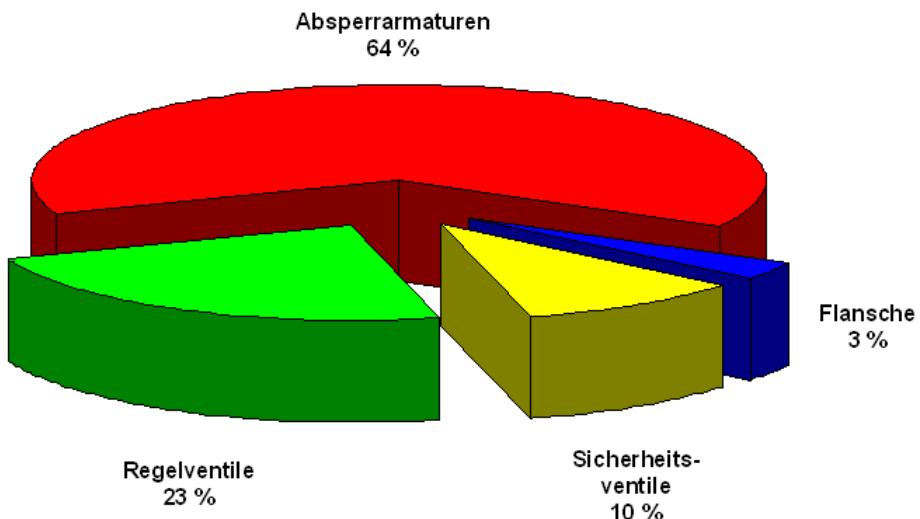
Damit z.B. bei Ventilen, Kugelhähnen und Schiebern keine unzähligen Leckagen bzw. Emissionen auftreten, müssen unterschiedliche Abdichtsysteme eingesetzt werden, die gegebenenfalls den Anforderungen der TA Luft genügen. In Abbildung 6.8 sind die wichtigsten Emissionsquellen in der chemischen Industrie dargestellt. Die am häufigsten ver-



**Abbildung 6.8:** Emissionsquellen in der europäischen Chemieindustrie, Quelle: European Sealing Association

wendeten Dichtelemente bei Industriearmaturen sind Flachdichtungen, Stopfbuchspackungen und Faltenbalgabdichtungssysteme. Flachdichtungen werden bei statischen Abdichtungen für Industriearmaturen installiert. Sie werden vor allem bei Zu- und Ablaufanschlüssen zwischen den Flanschen der Armaturen, also einer lösbarer Verbindung, eingesetzt. Darüber hinaus finden sie, je nach Bauart einer Armatur als Gehäusedeckelabbildung Verwendung. Stopfbuchspackungen kommen hauptsächlich für quasi statische Abdichtungen zum Einsatz. Bei beweglichen Teilen einer Armatur dienen die Stopfbuchspackungen der Abdichtung von Spindeln. Industriearmaturen, die in Anlagen mit

flüssigen, organischen Stoffen oder Stoffgemischen mit bestimmten giftigen und krebserregenden Substanzen eingebaut werden, unterliegen den Anforderungen der TA Luft. Um den Anforderungen an die Dichtheit von Spindeldurchführungen von Ventilen und Schiebern gerecht zu werden, müssen Armaturen mit Faltenbalg und nachgeschalteter Sicherheitsbuchse oder gleichwertigen Dichtsystemen ausgerüstet sein. Wenn nach außen abdichtende Dichtelemente an einer oder mehreren Armaturen Schäden aufweisen, die Leckagen verursachen, kann dies zu längeren, kostenintensiven Stillstandzeiten einer Anlage führen. Die Abbildung 6.9 zeigt die prozentuale Verteilung von Leckagenverursachern bei chemischen Anlagen. Die häufigsten Verursacher für Leckagen an Industriearmatu-



**Abbildung 6.9:** Leckagequellen, Quelle: Bron: ESA website

ren sind undichte Stopfbuchspackungen, weil bewegliche Teile einer Armatur deutlich schwieriger abzudichten sind. Flachdichtungen zwischen Flanschen weisen aufgrund der einfacheren technischen statischen Abdichtung eine geringere Leckageanfälligkeit auf. Im Anschluss werden die gängigsten Dichtungssysteme näher erläutert (vgl. Riedl 2000, S. 107-115 [108]):

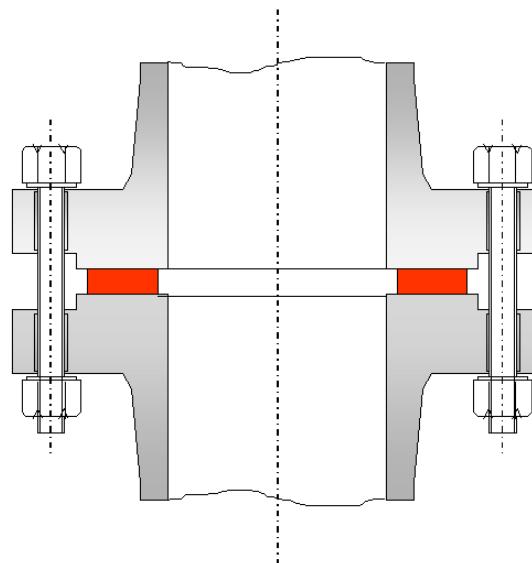
### 6.3.1 Flachdichtungen

Mit dem 1994 eingeführten Asbestverbot mussten neue Dichtungsmaterialien gefunden werden. Durchgesetzt haben sich:

- Flachdichtungen auf Faserbasis,
- Flachdichtungen auf Basis von flexilem Graphit und

- Flachdichtungen auf Basis von Polytetrafluorethylen (PTFE).

Die gesetzlichen Voraussetzungen der TA Luft sind für Flachdichtungen, die bei bestimmten giftigen und krebserregenden Medien eingebaut werden, ebenfalls zu berücksichtigen. Beispielhaft sind hier die Flachdichtungen an Anschlussflanschen und Deckeldichtungen von Armaturen zu nennen. Bei thermischer und niedriger mechanischer Beanspruchung werden Zellulosefasern eingesetzt. Mineral-, Kohle-, Glas- und Graphitfasern werden bei hoher thermischer und mechanischer Beanspruchung verwendet. Im Fire-Save-Bereich werden Dichtungen auf der Basis von flexilem Graphit eingebaut. Graphit zeichnet sich durch seine gute chemische Beständigkeit und seine geringe Neigung zum Kriechen und Fließen aus. Graphithaltige Dichtungen kommen dann nicht zum Einsatz, wenn es sich um Prozessmedien handelt, die nicht durch ausgewaschene Graphitanteile verunreinigt werden dürfen. Das Dichtungsmaterial auf der Basis PTFE wird bei Anforderung an höchste chemische Beständigkeit herangezogen. Unter bestimmten Voraussetzungen kann PTFE bis 270 °C verwendet werden. Für die Funktionsweise einer Flachdichtung muss bei allen Dichtungsarten der Einbau- und Betriebszustand analysiert werden, um das geeignete Dichtungsmaterial auswählen zu können. Die Hauptaufgabe einer Flachdichtung ist mit der zur Verfügung stehenden Dichtkraft, Unebenheiten der Dichtflächen z.B. bei Flanschen auszugleichen, um so Leckagen zu vermeiden. In Abbildung 6.10 ist der Einbau einer Flachdichtung als rot markierte Ringfläche zwischen einem Flanschenpaar dargestellt. Die Schrauben, die das Flanschenpaar miteinander verbinden, bringen die



**Abbildung 6.10:** Flachdichtung zwischen einem Flanschenpaar, Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG

erforderliche Dichtungskraft auf. Bei der dargestellten Einbausituation haben sich Dichtungen z.B. auf PTFE Basis mit einem Mineralfüller (Bariumsulfat) bewährt. Für die Auswahl des geeigneten Dichtungsmaterials sind die folgenden Kriterien zu beachten:

- Betriebsmedium (chemische Stabilität, TA Luft),
- Betriebstemperatur (Temperaturstabilität),
- Betriebsdruck,
- Montagekräfte zur Einhaltung der geforderten Leckagerate,
- Einwirkung durch externe Kräfte und Momente.

Unter Berücksichtigung aller Betriebsparameter muss sichergestellt werden, dass bei dem ausgewählten Dichtungsmaterial für Industriearmaturen während des gesamten Betriebszeitraumes keine unzulässig hohen Leckagen auftreten.

### 6.3.2 Stopfbuchspackungen

Quasi statische Bauteile, wie Ventilspindeln in Industriearmaturen, werden mit Stopfbuchspackungen (siehe Abbildung 6.11) abgedichtet. Die TA Luft stellt auch hier für



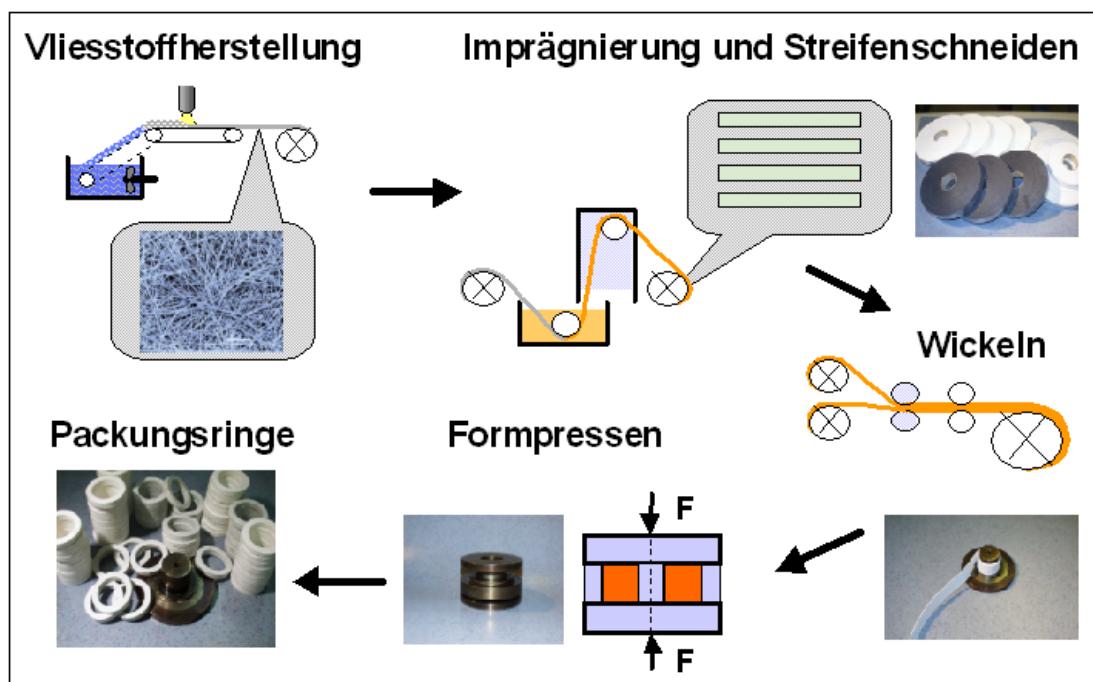
**Abbildung 6.11:** Stopfbuchspackungssatz auf der Basis von Vliesstoffringen nach TA Luft,  
Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG

die gesundheitsgefährdenden Stoffe besondere Anforderungen an die Dichtheit von Spindeldurchführungen bei Ventilen und Schiebern. Zwischen Stopfbuchsgehäuse und Spindel wird eine Weichstoffstopfbuchspackung in die Stopfbuchse gepresst (siehe Abbildung

6.14). Je nach Beschaffenheit des Packungsmaterials, Zustand der Spindel und des Stopfbuchsgehäuses können Leckagekanäle auftreten, durch die Produktionsmedien nach außen treten (vgl. Wodara/Kellermann 2003, S. 217 [158]). Die folgenden unterschiedlichen Leckagewege können bei Stopfbuchspackungen auftreten:

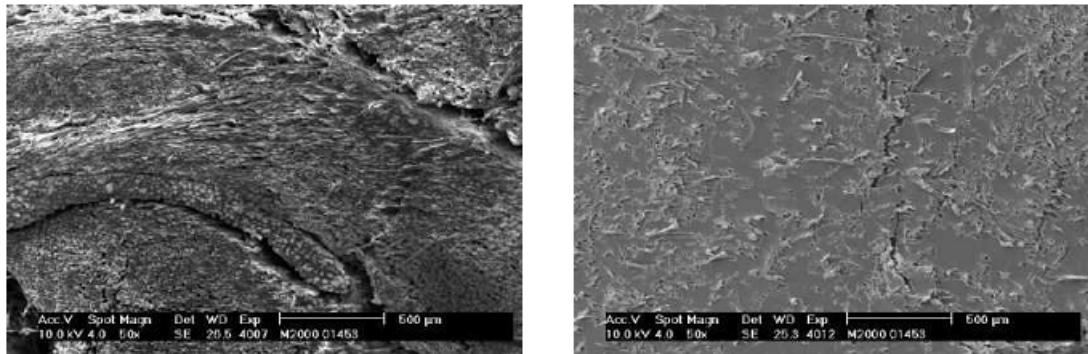
- Leckage zwischen Packung und Gehäuse,
- Leckage durch die Packung selbst,
- Leckage zwischen Packung und Spindel.

Durch die erhöhten Anforderungen der TA Luft wurden spezielle Packungssysteme entwickelt. Standardgemäß bestehen die Packungsringe aus geflochtenem Material. Der Stopfpackungssatz in Abbildung 6.11 besteht aus drei Zwischenringen aus Aramidvlies mit einer intensiven PTFE-Imprägnierung. In Abbildung 6.12 wird das Produktionsverfahren zur Herstellung von Stopfbuchspackungen aus Vliesstoffringen dargestellt. Der obere und un-



**Abbildung 6.12:** Fertigung von Vliesstoffringen, Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG

tere Ring ist hergestellt aus Kohlefaservlies mit PTFE/Graphit-Imprägnierung (vgl. Vogel/Danner 2005, S. 204 [147]). Bei geflochtenen Packungsringen ist das Lückenvolumen deutlich größer als bei einer Vliespackung, siehe Abbildung 6.13. Um das Leckagerisiko zu

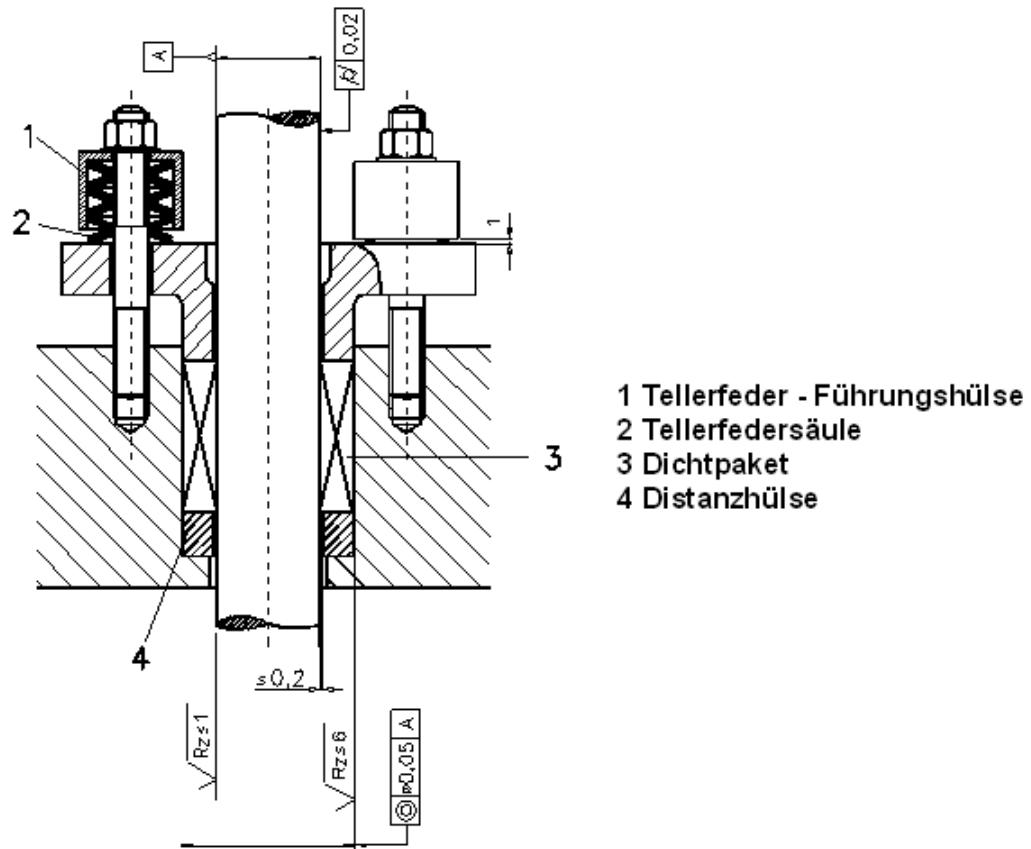


**Abbildung 6.13:** Links geflochtene Packung, rechts Vliespackung, Quelle: Dr. Liedtke Freudenberg Process Seals KG

minimieren, wird die Packung mit der vorgeschriebenen Brillenkraft bzw. Drehmoment an die Spindel und das Stopfbuchsgehäuse gepresst, dabei wird die Packung so verdichtet, dass die Leckagekanäle verschlossen werden. Die dadurch entstehende Flächenpressung an Spindel und Stopfbuchsgehäuse verursacht Reibungskräfte, die dem Drehmoment der Spindel entgegenwirken. Grundsätzlich müssen bei dem Einbau einer Stopfbuchspackung die Montageanweisungen der Hersteller beachtet werden, um Leckagen vorzubeugen.

### 6.3.3 Befederte Dichtsysteme

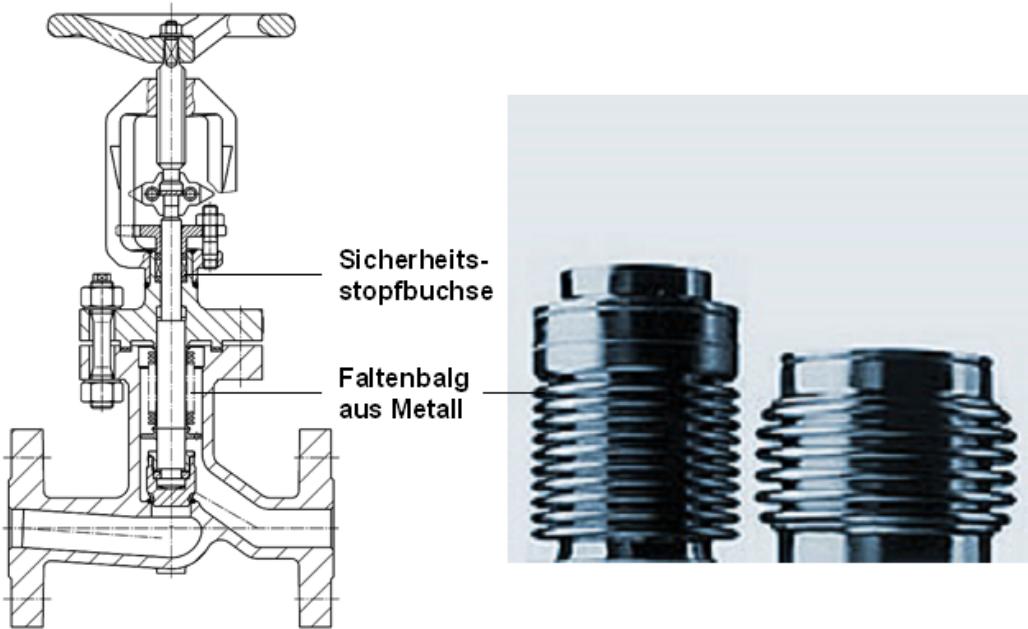
Befederte Dichtsysteme werden im Armaturenbau zur Abdichtung von Deckelflanschen und Spindeln verwendet. Hierbei kommen überwiegend befederte Stopfbuchsen an Spindeldurchführungen von Absperrarmaturen, die den Anforderungen der TA Luft entsprechen, zum Einsatz. In Abbildung 6.14 wird in einem Schnittbild eine Stopfbuchse mit Tellerbefederung veranschaulicht. Durch Schwingungen, Druckstöße sowie Temperaturwechselbeanspruchungen entstehen Lastwechsel, die bei jeder Packung Setzerscheinungen verursachen, dabei verringert sich das Volumen der Packung. Die Wirkungsweise des Dichtsystems beruht darauf, dass mehrere Federpakete diesen Volumenverlust ausgleichen. Der Einsatz von befederten Dichtsystemen nach TA Luft ist ein Sonderfall. Hierbei werden die befederten Stopfbuchsen auch als Live-Loading-Systeme bezeichnet. Die Klassifizierung Live-Loading ist ausschließlich an das Vorhandensein einer Befederung gebunden, nicht jedoch an vorgegebene Leckageraten. Deshalb ist es sinnvoll, die zulässige Leckagerate der Industriearmatur anzugeben und die Lebensdauer dieser Systeme auf mindestens 3 bis 5 Jahre auszulegen, wodurch die Aufarbeitungsintervalle der Armaturen festgelegt werden (vgl. Ernst 2003, S. 236-238 [44]).



**Abbildung 6.14:** Stopfbuchse mit Tellerbefederung und Führungshülse, (vgl. Vogel/Danner 2005, S. 207 [147])

### 6.3.4 Faltenbalgabdichtungssysteme

Bei korrekter Auslegung eines Faltenbalgs aus Metall hinsichtlich Werkstoff, Druck und Temperatur bietet er den größtmöglichen Schutz gegenüber dem Austreten von Medien. Prioritär werden Faltenbalgabdichtungssysteme, wie auch in der TA Luft beschrieben, bei flüssigen Stoffen oder Stoffgemischen mit giftigen oder krebserzeugenden Anteilen verwendet. Die Haupteinsatzgebiete für Faltenbalgabdichtungssysteme liegen bei Schiebern, Ventilen und Wechselarmaturen für Sicherheitsventile. Alternativ können gleichwertige Dichtsysteme, die im Nachweisverfahren entsprechend VDI 2440 [15] die temperaturspezifischen Leckageraten einhalten, eingesetzt werden. In Abbildung 6.15 wird ein Absperrventil mit einer Spindelabdichtung, bestehend aus einem hochwertigen metallischen Faltenbalg mit nachgeschalteter Sicherheitsstopfbuchse, dargestellt. Diese Ausführung

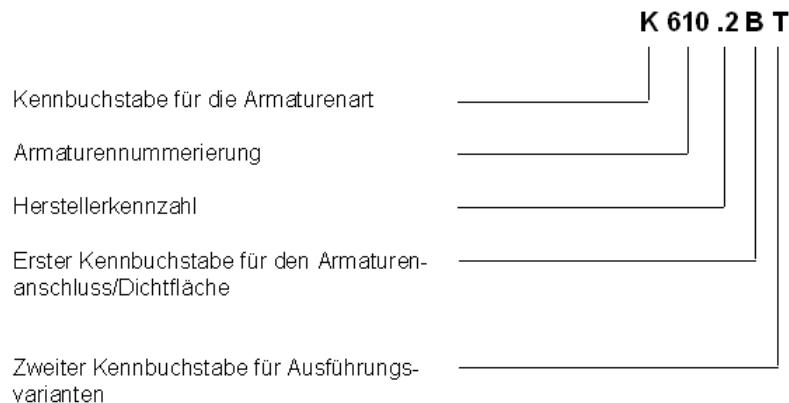


**Abbildung 6.15:** Absperrventil mit Faltenbalg und Sicherheitsstopfbuchse, Quelle: W.T. Armatur GmbH & Co. KG und Witzenmann GmbH

des Dichtsystems gewährleistet unter Berücksichtigung der folgenden Betriebsparameter wie Druck, Temperatur, Lastwechsel und Korrosion eine sichere Betriebsweise.

## 6.4 Unterteilung der Industriearmaturen in Armaturenklassen

Armaturenklassen werden den unterschiedlichsten Anforderungen der Planer und Betreiber von Chemieanlagen und Raffinerien gerecht. Sie dienen der Zuordnung von Einzelarmaturen zu Gruppen, die dann gemeinsam die an sie gestellten Aufgaben erfüllen. Die Armaturenklaasse ist ein Begriff, der für eine Gruppe von Armaturen mit ihren eigenen wesentlichen Merkmalen wie Bauart, Nenndruck, Werkstoffe, Bauform, Ausrüstung und Anschluss steht. Diese Merkmale werden durch eine Armaturenklaasse jeweils eindeutig spezifiziert. Die Einführung von Armaturenklassen ermöglicht die Vergleichbarkeit und Vereinheitlichung in der Beschaffungsphase, da einheitliche Armaturen die Dokumentation vereinfachen. Die Armaturenklaasse als Bezeichnung einer Armatur setzt sich aus Kennbuchstaben und Kennzahlen analog zu EN ISO 10628 [16] zusammen. In Abbildung 6.16 ist ein Beispiel für eine Standardarmaturenklaasse dargestellt.



**Abbildung 6.16:** Beispiel für eine Standardarmaturenklasse, Quelle: Werknorm BASF AG

In der Tabelle 6.5 werden die Kennbuchstaben für die Armaturenart und deren Benennung in Anlehnung an EN ISO 10628 [16] aufgezeigt. Die Kennbuchstaben C und P werden zur Präzisierung von Stellgeräten und Probearmaturen für die Armaturenarten Hahn, Klappe, Schieber oder Ventil als Zweitbuchstabe ergänzt, wie z.B. PV für ein Probenventil. Vor den Kennbuchstaben der Armaturenart ist in den Planungsunterlagen der Zahlenwert der Nennweite anzugeben, für den Fall, dass die Nennweiten der Armatur und Rohrleitung voneinander abweichen oder die Armatur keiner Rohrleitung zugeordnet

**Tabelle 6.5:** Kennbuchstaben für die Armaturenart, Quelle: Werknorm BASF AG

Kennbuchstabe	Benennung
A	Ableiter (Kondensatableiter)
C	Stellgerät, automatisierte Armatur
F	Filter, Sieb, Schmutzfänger
G	Durchfluss-Schauglas
H	Hahn
K	Klappe
R	Rückschlagarmatur
S	Schieber
V	Ventil
P	Probennahmearmatur
X	Sonstige Armatur

werden kann. Um die Datenerfassung und -verwaltung zu vereinfachen, wird die Armaturennummerierung bei ein- oder zweistelligen Nummern durch vorangestellte Nullen zu dreistelligen Nummern ergänzt. Sonderarmaturen und Hochdruckarmaturen werden in der Regel mit vierstelligen Nummern gekennzeichnet. Die Nummern in Tabelle 6.6 werden von der Projektierung vergeben. Die Herstellerkennzahl eins bis neun wird mit der

**Tabelle 6.6:** Armaturennummerierung, Quelle: Werknorm BASF AG

Nummern-Bereich	Verwendung
600 bis 699	BASF-Standardarmaturen
001 bis 599 800 bis 899	andere zugelassene Armaturen
900 bis 999	Sonderarmaturen, die nicht der Regelausführung entsprechen
1000 bis 6999 8000 bis 8999	Sonderarmaturen von allgemeinem Interesse
7000 bis 7999	Hochdruckarmaturen

Armaturenklaasse festgelegt und nur dann verwendet, wenn aus technischen Gründen nur die Armatur eines bestimmten Herstellers eingesetzt werden kann. Wird keine Herstellerkennzahl ausgewiesen, so liegt eine vom Hersteller unabhängige Beschreibung vor. Für Hochdruckarmaturen werden keine Herstellerkennzeichen vergeben.

Zur eindeutigen Identifizierung einer Armatur anhand der Armaturenklaasse ist unbedingt der erste Kennbuchstabe für den Armaturenanschluss/Dichtfläche und der zweite Kennbuchstabe für Armaturenanschluss/Dichtfläche und Bauform, (siehe Tabelle 6.7) auszuweisen.

Jeder Armaturenhersteller hat seine firmeneigene Bezeichnungen für die unterschiedlichen Armaturen wie z.B. der Kugelhahn der Firma Klinger Schöneberg Typ INTEC K 210 wird in der BASF AG mit H 670 .4 B1 gekennzeichnet. Die Herstellerkennzahl 4 steht hier für einen Kugelhahn der Firma Klinger Schöneberg. In Kapitel 7.5 werden anhand dieses Kugelhahns die Tätigkeiten im Rahmen der Aufarbeitung ausführlich dargestellt. Das Fließbild ist in der Verfahrenstechnik ein wichtiges Hilfsmittel in Form einer technischen Zeichnung, in dem die einzelnen Verfahrensabschnitte in schematischer Form dargestellt werden. In EN ISO 10628 [16] ist die Darstellung für das Fließbild geregelt. In dieser Norm differenziert man je nach Grad der Abstraktion folgende Fließbildtypen:

- das Grundfließbild,
- das Verfahrensfließbild und
- das Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild.

**Tabelle 6.7:** Kennbuchstaben für Armaturenanschluss, Dichtfläche, Bauform, Quelle: Auszug aus Werknorm BASF AG

1. Kennbuchstabe Armaturenanschluss Dichtfläche	2. Kennbuchstabe Armaturenanschluss Dichtfläche oder Bauformen	Bennnung
A	A	Flansch, glatte Dichtfläche nach DIN EN 1092-1 [17]
B	B	Flansch, Dichtflächeform B, Dichtleiste B1 (bis PN 40), B2 (ab PN 63) nach DIN EN 1092-1[17]
C	C	Flansch, Feder nach DIN EN 1092-1[17]
D	D	Flansch, Nut nach DIN EN 1092-1[17]
E	E	Flansch, Vorsprung nach DIN EN 1092-1 [17]
F	F	Flansch, Rücksprung nach DIN EN 1092-1[17]

Im Grundfließbild werden die Verfahrensabschnitte durch einzelne Kästchen aufgezeigt. Diese sind durch Flusspfeile, die sowohl die Rohrleitung als auch die Flussrichtung des Mediums kennzeichnen, miteinander verbunden. Das Verfahrensfließbild unterscheidet sich im Wesentlichen vom Grundfließbild durch die Angabe der ersten rohrleitungstypischen Parameter wie z.B.: Nennweite, Nenndruckstufen, für den Prozess wichtige Armaturen, Messstellen und Durchflussmengen. Im Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild, auch RI-Fließbild genannt, werden in schematischer Form die einzelnen Verfahrensabschnitte und sämtliche Apparate und Einbauten in Rohrleitungen, wie z.B. Flansche und Armaturen dargestellt. Neben den Rohrleitungsklassen werden die Armaturenklassen sowie alle einzubauenden Messstellen festgelegt. Das RI-Fließbild ist die Basis für den Bau einer verfahrenstechnischen Produktionsanlage.

## 6.5 Gründe für Schäden bei Industriearmaturen

Grundsätzlich kann man sagen, dass die unterschiedlichen Schadensursachen an einer Armatur sehr eng mit dem Einsatzort verknüpft sind. Im Folgenden werden verschiedene Begriffe wie Kavitation, Ausdampfung, Erosion und Abrasion, Strahlverschleiß, Vereisen und Einflüsse durch besondere Durchflussmedien die technische Schäden hervorrufen, näher erläutert, (vgl. Muschet 2003, S. 148-152 [88]). Das Schadensausmaß ist letztendlich

entscheidend ob eine Industriearmatur noch aufgearbeitet werden kann oder verschrottet werden muss.

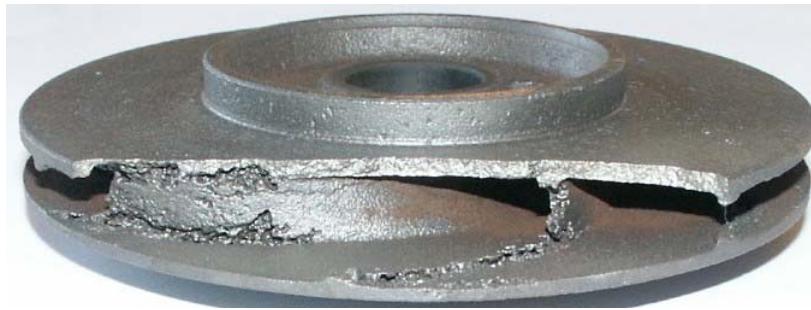
### 6.5.1 Kavitation

Als Kavitation bezeichnet man die Bildung von gas- oder dampfgefüllten Blasen in Flüssigkeiten bei niedrigem Druck. Die häufigste Ursache für Kavitation sind schnell bewegte Objekte im Wasser wie z.B. Wasserturbinen, Propeller und Laufräder von Kreiselpumpen. Meistens ist Kavitation nicht erwünscht, dennoch hat das Militär es verstanden, diese für sich zu nutzen. Bei der Marine werden Torpedos eingesetzt, die sich mit sehr hoher Geschwindigkeit unter Wasser in künstlich erzeugter Kavität bewegen. Dieses Phänomen wurde zuerst von den russischen Streitkräften entwickelt und ist unter dem Begriff Superkavitation bekannt geworden.

Nach dem Gesetz von Bernoulli ist der Druck in einer Flüssigkeit umso geringer, je höher die Geschwindigkeit ist. Wenn die Geschwindigkeit also so hoch ist, dass der Druck unter den Verdampfungsdruck der Flüssigkeit fällt, geht diese in den gasförmigen Zustand über und es entsteht Kavitation. Der Siedepunkt einer Flüssigkeit hängt also vom Druck ab. Je höher der Druck, desto höher der Siedepunkt und umgekehrt. Wasser verdampft bei einem Luftdruck von 1.013,25 hPa bei 100 °C. Bei einem Druck von 23,37 hPa verdampft Wasser bereits bei 20 °C. Wenn Wasser bei 20 °C verdampft, benötigt der Wasserdampf das 1.300-fache an Raum wie das flüssige Wasser zuvor. Sofern der Wasserdruk wieder steigt, hört der Verdampfungsvorgang wieder auf. Der in der Kavitationsblase entstandene Wasserdampf kondensiert an der Außenwand der Dampfblase und die bereits gebildeten Kavitationsblasen stürzen schlagartig zusammen, was mit heftigen, prasselnden Geräuschen verbunden ist.

Nicht nur Wasser, sondern auch technische Flüssigkeiten unterliegen dieser Gesetzmäßigkeit. Oft tritt Kavitation in Strömungen dieser Flüssigkeiten auf. Diese verursacht nicht nur Geräuschemissionen, sondern führt, bei entsprechender Kavitationsintensität, durch die dabei entstehenden extrem hohen Druckspitzen in kurzer Zeit zu mechanischen Schäden (siehe Abbildung 6.17). Armaturen, die auf der Saugseite einer Pumpe installiert sind, unterliegen besonders der Beanspruchung durch Kavitation. Die Materialabsprengungen an den Armaturengehäusen führen in der Regel dazu, dass diese verschrottet werden müssen.

Um Kavitationsschäden vorzubeugen, werden Drosselkörper oder Widerstandsstrukturen eingebaut, die das Einsetzen der Kavitation hin zu größeren Differenzdruckverhältnissen verschieben und so das Auftreten von Kavitation vermeiden oder deren Intensität verringern. Ist es nicht möglich, einen kavitationsfreien Betrieb zu gewährleisten, so ist auf niedrige Strömungsgeschwindigkeiten, große Abströmvolumen, eine stabile Führung



**Abbildung 6.17:** Kavitationsschaden an einem Pumpenlaufrad

des Drosselkörpers, härtere Werkstoffe (diese halten den Kavitationsbedingungen länger stand) und auf entsprechende Beruhigungsstrecken nach der Armatur zu achten.

### 6.5.2 Ausdampfung

Liegt der Nachdruck unter dem Dampfdruck des Durchflussmediums, dampft ein Teil des Mediums aus. Dieser Vorgang wird als Ausdampfung bezeichnet. Das Volumen und damit die abströmige Strömungsgeschwindigkeit nehmen deutlich zu. Diese hohen Strömungsgeschwindigkeiten können Schäden durch Materialabtragung in Industriearmaturen verursachen. Diese Schäden können durch konstruktive Maßnahmen, wie mehrfach eingezogene Sitzdurchmesser und Erweiterungen, vermieden werden.

### 6.5.3 Erosion und Abrasion

Erosion und Abrasion sind Oberflächenabtragungen, verursacht durch unterschiedliche äußere Einflüsse (vgl. Strohrmann 2000, S. 217 [134]). Hohe Strömungsgeschwindigkeiten, mitgeführte Flüssigkeitströpfchen in Dampfströmungen und feststoffbelastete Medien sind verantwortlich für Erosion und Abrasion. Weniger bekannt ist, dass auch das Kondensieren von Teilchen im Einlauf noch trockener Gase zu Erosion führen kann. Sogar bei austenitischen Stählen kommt es durch die permanente Zerstörung der schützenden Passivierungsschicht zu Verschleiß und Korrosion (vgl. Christen 1974, S. 318-319 [30]). Die Resistenz gegenüber Erosion und Abrasion ist bei austenitischen Stählen jedoch höher als bei unlegierten oder niedrig legierten Stählen. Die Standzeiten können durch harte, verschleißfeste Materialien wie Stellit oder Keramik erhöht werden.

#### **6.5.4 Strahlverschleiß**

Werden Differenzdrücke und Strömungsgeschwindigkeiten zu hoch, führt dies an den Innengarnituren und Gehäusen von Industriearmaturen zu starken Materialabtragungen, die soweit führen können, dass das Gehäuse derart geschwächt wird, dass es für den vorgesehenen Druckbereich nicht länger eingesetzt werden darf. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nimmt der Verschleiß zu. Wird die Strömungsgeschwindigkeit z.B. durch eingezogene Sitze reduziert, so verringert sich das Schadensausmaß. Ist aufgrund verfahrenstechnischer Bedingungen eine Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit nicht möglich, so kann die Standzeit der Industriearmatur durch harte Innengarnituren (Stellit, Keramik, Härten) verlängert werden.

#### **6.5.5 Vereisen**

Bei Entspannungsvorgängen in einer Industriearmatur sinkt die Temperatur ab, dabei kann Feuchtigkeit im Inneren der Armatur vereisen. Bei sehr hohen Entspannungsvorgängen ist die Vereisung bei hoher Luftfeuchtigkeit auch äußerlich am Armaturengehäuse zu erkennen. Bei solchen Vereisungsvorgängen kann es bei Automatikventilen durchaus zum Blockieren im Sitzbereich, der Kegelführung oder dem Stopfbuchsenbereich der Armatur kommen. Auch bei Handarmaturen besteht die Möglichkeit, dass diese durch Vereisung nicht mehr bedient werden können. Mit Armaturen in Eckform und in Schließrichtung angeströmten Innengarnituren mit Sitzcharakteristik kann die Vereisungsgefahr vermindert werden.

### **6.6 Eigenschaften und Gefahrenpotentiale von Durchflussmedien**

In chemischen Produktionsanlagen werden unterschiedliche Durchflussmedien verwendet. Es ist daher für die Auswahl und Auslegung der Industriearmaturen unerlässlich, die Stoff- und chemischen Eigenschaften zu kennen. Der Verschmutzungsgrad, die Aggressivität des Mediums und die Werkstoffe der medienberührten Teile haben einen großen Einfluss auf die Abnutzung und somit auf die Nutzungsdauer der Armatur. Der Umgang mit aggressiven Medien erfordert einiges Wissen und Erfahrung, um eine funktionierende Produktion sicherzustellen. Deshalb werden nun einige aggressive Durchflussmedien vorgestellt.

### **6.6.1 Ammoniak**

Ammoniak ist bei Raumtemperatur ein stark stechend riechendes, farbloses und giftiges Gas. Sowohl in gasförmigem als auch in flüssigem Zustand ruft es starke Verätzungen der Atemwege und Augenreizungen hervor. Ammoniak zählt zu einem der wichtigsten Produkte der chemischen Industrie, aus ihm werden zahlreiche Folgeprodukte hergestellt, wie z.B. organischer und anorganischer Stickstoff, Düngemittel, Kunstharze und Anilin. Auch in der Metallverarbeitung kommt Ammoniak zum Einsatz, um Metalle zu härten. Ammoniak wird wegen seiner günstigen thermodynamischen Eigenschaften als Kältemittel verwendet. Ammoniak lässt sich sehr leicht, unabhängig vom Verhältnis, in Alkohol, Benzol, Azeton oder Wasser (Salmiakgeist, Ammoniakwasser) lösen. In der chemischen Industrie werden nichtrostende Cr- und Cr-Ni-Stähle verwendet, die gegen Ammoniaklösungen vollkommen resistent sind. Für flüssiges Ammoniak wird in der Regel unlegierter Stahl eingesetzt. Da Buntmetalle unter dem Einfluss von Ammoniak stark angegriffen werden, ist es sehr wichtig, dass Industriearmaturen buntmetallfrei sind.

### **6.6.2 Chlor**

Chlor ist ein sehr reaktionsfreudiges chemisches Element, das auch in der Natur vorkommt. Aufgrund seiner Eigenschaften wird Chlor den Halogenen zugeordnet. Chloride bilden einen wichtigen Bestandteil von Salzen, wie z.B. Kaliumchlorid oder Natriumchlorid (Kochsalz). Chlor wird durch das Chloralkali-Elektrolyse-Verfahren gewonnen, welches aus einer Natriumchloridlösung oder -schmelze extrahiert wird. Das gelbgrüne Gas riecht stechend und ist äußerst giftig, so dass eine Konzentration von 0,05 % schon tödlich sein kann. Chlorgas verursacht Verätzungen an Atmungsorganen und Schleimhäuten. Dennoch ist Chlor ein sehr wichtiges Ausgangsprodukt für die chemische Industrie. Zur Herstellung von Chlorkalk, Chlorwasserstoff, Polyvinylchlorid, Salzsäure oder Tetrachlorkohlenstoff wird Chlor benötigt. Des Weiteren wird Chlor zum Bleichen von Papier und Textilien und zum Entkeimen von Trinkwasser verwendet. Bei der Herstellung von Chlor sind strenge Sicherheits- und Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen. Diesen Anforderungen müssen auch die Industriearmaturen, die in solchen Produktionsanlagen zum Einsatz kommen, genügen. Diese Besonderheiten und Forderungen sind im „Code for Vertical Globe Valves for Use with Liquid Chlorine“ hinterlegt. Die Armaturen werden einer Erstmusterprüfung unterzogen und der Hersteller benötigt eine Genehmigung von B.I.T Brüssel, bevor sie in den Anlagen verbaut werden können. Die Auswahl der geeigneten Armaturenwerkstoffe ist von sehr großer Bedeutung. Bei flüssigem Chlorgas bis 100 °C in trockenem Zustand reichen unlegierte Stähle aus. Nichtrostende Stähle können bis zu einer Temperatur von 300 °C eingesetzt werden, darüber kommen Werkstoffe, die auf Nickel basieren, zur Anwendung. Kommt jedoch Wasser hinzu, können weder unlegierte noch rostfreie Stähle verwendet werden, da Chlorgas schon bei normaler Luftfeuchtigkeit

sehr aggressiv reagiert. Geeignete Werkstoffe sind hochkorrosionsbeständige Nickelbasiswerkstoffe wie Hastelloy B. Nicht nur das Gehäuse einer Armatur muss den hohen Anforderungen standhalten, sondern auch die eingebauten Dichtungen. Zur Spindelabdichtung kommt bevorzugt der Faltenbalg zum Einsatz, weil dieser höchste Dichtheit nach außen gewährleistet. Durch die zusätzliche Sicherheitsstopfbuchse ist sichergestellt, dass auch nach einer Beschädigung des Balges kein Medium nach außen dringt. Armaturen, die aus einer Chlorproduktion kommen, müssen vor einer Reparatur einer besonderen Reinigungsprozedur unterworfen werden.

### **6.6.3 Harnstoff**

Harnstoff (lat. Urea) ist die erste organische Verbindung, die 1773 von Hilaire Rouelle entdeckt und 1828 künstlich synthetisiert wurde. Harnstoff ist ein weißer, kristalliner, geruchloser und ungiftiger Feststoff, der auch ein Zwischenprodukt bei der Herstellung von Kunstdünger ist. Des Weiteren wird Harnstoff zur Produktion von Melamin benötigt. UF-Harze (Leime) werden aus wässrigem Formaldehyd, Harnstoff und/oder Melamin, unter Hinzugabe von Säuren und Laugen hergestellt. Leime werden bevorzugt bei der Spanplattenproduktion eingesetzt. Die meisten Metalle sind sehr beständig gegenüber der neutralen Harnstoff-Lösung. Bei der herkömmlichen Gewinnung von Harnstoff aus Ammoniak und Kohlendioxid werden aufgrund der aggressiven Zwischenprodukte und der oft sehr hohen statischen Druckbelastung besondere Ansprüche an die Armaturenwerkstoffe gestellt. Es werden nichtrostende Stähle mit erhöhtem Ni- und Mo-Anteil und einem niedrigem C-Gehalt eingesetzt. Damit die Armaturengehäuse den Druckbelastungen standhalten können, werden Schmiedeblöcke verwendet, die eine Korrosionsrate von 1,0 mm pro Jahr nicht überschreiten. Zusätzlich werden den Medien Inhibitoren beigefügt, um die Korrosionsrate zu verringern.

### **6.6.4 Kesselspeisewasser**

Kesselspeisewasser ist entsalztes und entgastes Wasser, das z.B. in einer Dampfmaschinenanlage kontinuierlich dem Dampferzeuger zugegeben wird. Außerdem wird dem Speisewasser Ammoniak hinzugefügt, um die Anlagen vor Korrosion und Kesselstein zu schützen. Zu diesem Zweck hat die Technische Vereinigung der Großkraftwerks-Betreiber (VGB) Richtwerte für Kesselspeisewasser festgelegt. Auch wenn diese Richtwerte eingehalten werden, können Probleme auftreten, weil unterschiedliche Einflussfaktoren eine sehr große Rolle spielen. Der Betrieb solcher Anlagen setzt einige Erfahrung der Betreiber voraus. Bei normalen Betriebsverhältnissen können unlegierte oder niedrig legierte Armaturenwerkstoffe verwendet werden, solange eine geschlossene und festhaftende Schicht aus

Magnetit garantiert wird. Ist dies nicht gewährleistet, sollten rostfreie Stähle eingesetzt werden.

### 6.6.5 Rohöl

Rohöl bzw. Erdöl ist ein in der Erdkruste eingelagertes, hauptsächlich aus Kohlenwasserstoff bestehendes lipophiles Stoffgemisch. Konsistenz und Farbe des kostbarsten Rohstoffs der modernen Industrienationen variieren von transparent und dünnflüssig bis tiefschwarz und dickflüssig. Auf Grund der Schwefelverbindungen hat Rohöl einen charakteristischen Geruch. Rohöl wird in petrochemischen Anlagen zu einer Reihe wichtiger Produkte wie Butan, Alkohole, Ethylen, Acetylen, Benzol, Toluol, Schwefel, Polyamide, Wachse oder Wasserstoff weiterverarbeitet. Korrosionsschäden bei Industriearmaturen werden meistens durch freien Schwefel verursacht. Weitere Gefahren für Industriearmaturen gehen von organischen Säuren, anorganischen Salzen, Wasser oder im Erdöl gelöstem Sauerstoff aus. Bei normaler Temperatur greift trockenes Rohöl Armaturengehäuse aus unlegiertem Stahl nicht an. Schon geringe Wassermengen führen zu Korrosion bei unlegierten Stählen durch Kohlensäure, Schwefelverbindungen, Sauerstoff und Salze. Da in der Erdölindustrie häufig größere Nennweiten für die Industriearmaturen eingesetzt werden, gibt man aus Kostengründen unlegierten Stählen den Vorzug und nimmt die eventuell daraus resultierende geringere Lebensdauer in Kauf.

### 6.6.6 Seewasser

Meerwasser oder Seewasser ist Salzwasser, genauer eine wässrige Lösung verschiedener Salze mit einem durchschnittlichen Salzgehalt von 3,5 %. Der Gesamtsalzgehalt schwankt je nach Meer von 0,2 % bis 28 %. Die im Meerwasser gelösten Salze bestehen hauptsächlich aus Chloriden, wobei Natriumchlorid die wichtigste Rolle spielt. Industriearmaturen in Chemie- oder Petrochemieanlagen, küstennahen Kraftwerken, Meerwasserentsalzungsanlagen und Öl- und Gasplattformen sind der hohen Aggressivität des Meerwassers und der daraus resultierenden Korrosionsbelastung ausgesetzt. Deshalb können Armaturengehäuse aus unlegiertem Stahl, wegen der starken Korrosionsgefahr, nicht eingesetzt werden. Auch ferritischer und nichtrostender Stahl können nicht verwendet werden, weil deren Lochfraßbeständigkeit zu gering ist. Bei austenitischen Stählen führt das Vorhandensein von Chlorionen zur Störung der Passivität. Wassertemperaturen über 60 °C verursachen Schäden wie Lochfraß oder Spannungsrißkorrosion an austenitischen Stählen. Industriearmaturen, die durch Spannungsrißkorrosion geschädigt sind, können nicht mehr aufgearbeitet werden. Um solche Schäden zu vermeiden, werden Sonderwerkstoffe, wie z.B. hochmolybdänhaltige Stähle, Nickelbasiswerkstoffe oder Nickel-Kupfer-Legierungen bei Herstellung von Armaturen verarbeitet. Häufig wird in Meerwasserentsalzungsanlagen

mit dem Werkstoff Titan gearbeitet, da Titan eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und geringe Neigung zur Spannungsrißkorrosion hat.

### **6.6.7 Salpetersäure**

Salpetersäure wird seit 1908 technisch mit Hilfe des Ostwaldverfahrens, hergestellt. Sie ist in reinem Zustand farblos. Die konzentrierte Salpetersäure zersetzt sich leicht und hat einen gelblichen oder rötlichen Farbton. Sie zählt neben der Perchlorsäure und der Salzsäure zu den aggressivsten organischen Säuren. Die Salpetersäure ist einer der wichtigsten Grundstoffe der chemischen Industrie und wird unter anderem in der Galvanik, bei der Produktion von Düngemitteln, in der Metallurgie oder bei der Herstellung von Explosivstoffen benötigt. Salpetersäure löst die meisten Metalle auf. Nur die Edelmetalle Gold, Platin und Iridium sind eine Ausnahme. Des Weiteren widerstehen Zirkonium, Hafnium, Tantal, Wolfram, Titan und Niob aufgrund ihrer Passivität der Salpetersäure. Aluminium und Eisen sind durch ihre Passivierung resistent gegenüber kalter Salpetersäure. Um die Armaturengehäuse vor Lochfraßkorrosion zu schützen, müssen die Teile, die mit dem Medium in Berührung kommen, aus molybdänfreien Werkstoffen sein. Bei hochkonzentrierter Salpetersäure haben Werkstoffe mit reduziertem Molybdängehalt eine ausreichende Beständigkeit.

### **6.6.8 Sauerstoff**

Der Sauerstoff, unter normalen Bedingungen ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, wurde im Jahr 1772 vom schwedischen Apotheker Carl Wilhelm Scheele entdeckt. Er ist mit ungefähr 21 Volumenprozent ein Bestandteil unserer Luft. In der modernen Industrie wird Sauerstoff unter anderem für die Herstellung von Alkoholen, Aldehyden, Ketonen und Carbonsäuren, Stahlerzeugung, Salpetersäureproduktion, Herstellung von Synthesegasen, Vergasung von Kohle oder Bleich- und Desinfektionsvorgänge benötigt. Für Sauerstoffanwendungen müssen Druckbehälter und deren Ausrüstungsteile (z.B. Industriearmaturen) die Anforderungen der Druckbehälterverordnung und der Technischen Regeln Druckgase (TRG) erfüllen. Des Weiteren sind sicherheitstechnische, sauerstoffspezifische Anforderungen, die in der Unfallübersicht Sauerstoff (VBG 62) der Durchführungsanweisung zur Unfallverhütungsvorschrift und im Stahl-Eisen-Betriebsblatt (SEB) „Richtlinien für Sauerstoffarmaturen und -messgeräte“ aufgeführt sind, zu beachten. Der Nenndruck gibt für eine Industriearmatur oder Rohrleitung eine Referenzgröße an. Die Angabe erfolgt nach DIN, ISO, EN durch die Bezeichnung PN, gefolgt von einer dimensionslosen ganzen Zahl, die den Auslegungsdruck in bar bei einer Raumtemperatur von 20 °C angibt. Als Werkstoffe für Armaturengehäuse bis PN 40 werden prioritär Cr-Ni-Stähle mit einem Massenanteil von Chrom und Nickel vom mindestens 22 % verarbeitet.

Werden jedoch unlegierte oder niedriglegierte Stähle verwendet, müssen Einschränkungen hinsichtlich der Betriebstemperatur und des Betriebsdruckes berücksichtigt werden. Nichtmetallische Werkstoffe, wie Gleitmittel oder Dichtungswerkstoffe, müssen für den Sauerstoffeinsatz geeignet sein. Eine Überprüfung dieser Werkstoffe erfolgt durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Die Armaturenteile müssen öl- und fettfrei sein, um einer Selbstentzündung bzw. Brandgefahr vorzubeugen.

# **7 Armaturenaufarbeitung**

Die hohe Kapitalbindung in den Produktionsanlagen der Prozessindustrie steht oft im Fokus einer wirtschaftlichen Analyse. Produktivität und Wirtschaftlichkeit sind wichtige wettbewerbsentscheidende Kriterien. Deshalb ist die Optimierung der Betriebskosten von großer Bedeutung. Hierbei bietet die Armaturenaufarbeitung eine Möglichkeit, eine Gebrauchtarmatur nicht nur zu verschrotten, sondern sie wieder aufzuarbeiten, mit neuen Verschleißteilen, Dichtungen und perfektem Oberflächenfinish zu versehen und anschließend in Produktionsanlagen der Prozessindustrie wieder einzusetzen (vgl. Mühlthaler/Mühlthaler/Leinweber 2005, S. 115 [86]). Das bedeutet, dass bereits frühzeitig bei der Armaturenentwicklung neben ökonomischen und technologischen Aspekten auch die ökologischen Auswirkungen berücksichtigt werden müssen. Dabei bilden die Lebenszykluskosten einer Industriearmatur die Basis für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Im Anschluss wird neben den bereits oben genannten Kriterien auch die industrielle Umsetzung der Armaturenaufarbeitung beschrieben.

In diesem Kapitel wird neben der wirtschaftlichen Betrachtung der industriellen Armaturenaufarbeitung auf die Lebenszykluskosten und die Produktentwicklung einer Industriearmatur näher eingegangen. Ferner werden die unterschiedlichen Netzwerkstrukturen im Rahmen der Armaturenaufarbeitung erläutert. Abschließend werden die verschiedenen Tätigkeiten im Rahmen der Aufarbeitung und das Einsparpotential betrachtet. Für das Modell in Kapitel 9 wird das Einsparpotential als Differenz zwischen Neupreis und Aufarbeitungspreis festgelegt.

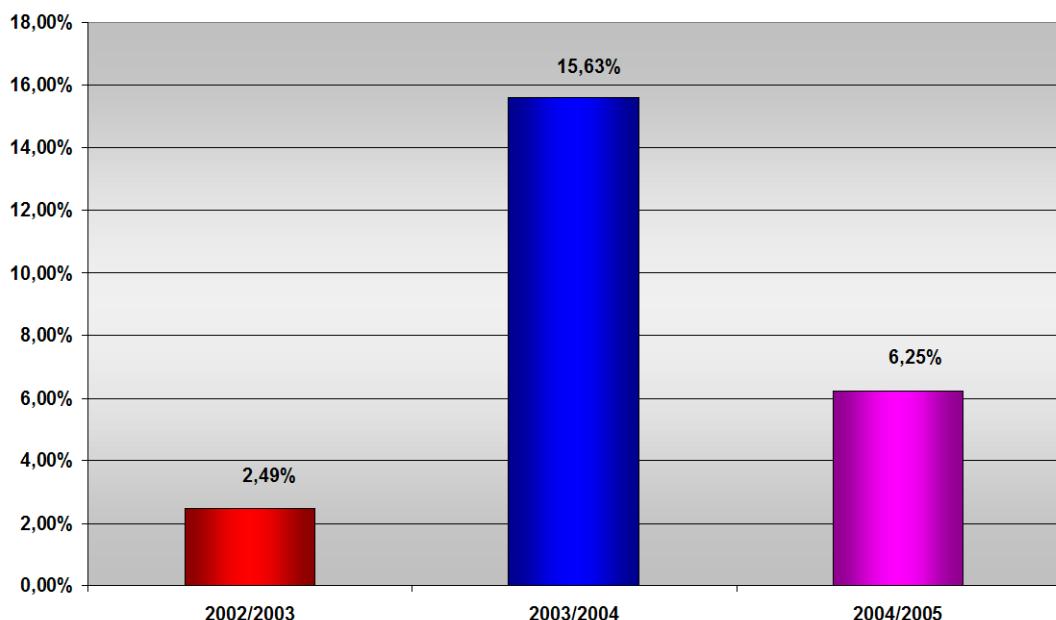
## **7.1 Wirtschaftliche Betrachtung der Armaturenaufarbeitung**

Die Armaturenaufarbeitung hat wegen des wirtschaftlichen Erfolges in den vergangenen zwei Jahren, hauptsächlich bei größeren Industrieunternehmen, deutlich an Akzeptanz gewonnen. Dennoch liegt die Auslastung der Armaturenaufarbeiter im Durchschnitt nur bei 70 %, Tendenz steigend. Auf Grund der wirtschaftlichen Wettbewerbssituation sind die Unternehmen (Kunden) gezwungen, ihre Betriebskosten zu reduzieren. Dies führt

zur Optimierung der Wartungs- und Instandhaltungsstrategien. Der Einsatz von aufgearbeiteten Industriematuren liefert somit einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Betriebskosten.

In Abbildung 7.1 werden die Wachstumsraten der Armaturenaufarbeitungsbranche von 2003 bis 2005, jeweils bezogen auf das Vorjahr, dargestellt. Ein Grund für das geringere Wachstum im Jahr 2003 war die zunächst ablehnende Grundhaltung der Großindustrie gegenüber der Aufarbeitung. Kostenvorteile bis zu 60 % bei gleicher Qualität, steigende Rohstoffpreise und die verschärfteste Umweltgesetzgebung haben zu einem Umdenken in den Unternehmen geführt und der Armaturenaufarbeitungsbranche zu einem deutlichen Wachstumsschub im Jahre 2004 von 2,49 % auf 15,63 % verholfen. Ein weiterer Aspekt für das starke Wachstum sind die zyklisch auftretenden Großabstellungen z.B. in der Chemieindustrie und den Erdölraffinerien, bei der in einem kurzen Zeitraum viele Armaturen gewartet bzw. aufgearbeitet werden müssen. Das Wachstum im Jahre 2005 ist mit 6,25 % als überdurchschnittlich für die Armaturenaufarbeitungsbranche zu bezeichnen.

Auf der Basis der in Abbildung 7.1 dargestellten Wachstumsraten werden in Kapitel 9 durchschnittliche Wachstumsraten ermittelt, wobei die prognostizierte positive Marktentwicklung berücksichtigt wird. Diese durchschnittlichen Wachstumsraten fließen dann in die zu untersuchenden Szenarien ein.



**Abbildung 7.1:** Wachstumsraten der Armaturenaufarbeitungsbranche von 2003 bis 2005,  
Datenquelle: Statistisches Bundesamt

## 7.2 Lebenszykluskosten von Industriearmaturen

In der Vergangenheit wurden bei der Planung von Projekten primär die Anschaffungskosten und weniger die Folgekosten für die Entscheidungsfindung herangezogen. Dieses Prinzip ist nicht mit der Gesamtkostenbetrachtung vereinbar (vgl. Siestrup 1999, S. 140 [120]). Die Lebenszykluskosten, die auch als Life Cycle Costs und Whole Costs bezeichnet werden (vgl. Pfohl/Wübbenhörst 1983, S. 142 [98]), umfassen die gesamten Kosten, die während der Produktlebensdauer anfallen. Bei der Product-Life-Cycle-Costing-Konzeption wird diese Idee auf Produkte projiziert (vgl. Rückle/Klein 1994, S. 355 ff. [109]).

Bei Industriarmaturen werden die Lebenszykluskosten überwiegend in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase determiniert. Schätzungen zufolge werden in der Produktentwicklungsphase bis zu 70 % der Lebenszykluskosten festgelegt. Die richtige Auslegung von Produktionsanlagen, bestehend aus Apparaten, Pumpen, Rohrleitungen, Armaturen und Steuer- und Regelsystemen, ist eine Grundvoraussetzung für niedrige Lebenszykluskosten. In der Literatur setzt sich der Begriff Lebenszykluskosten aus den Komponenten

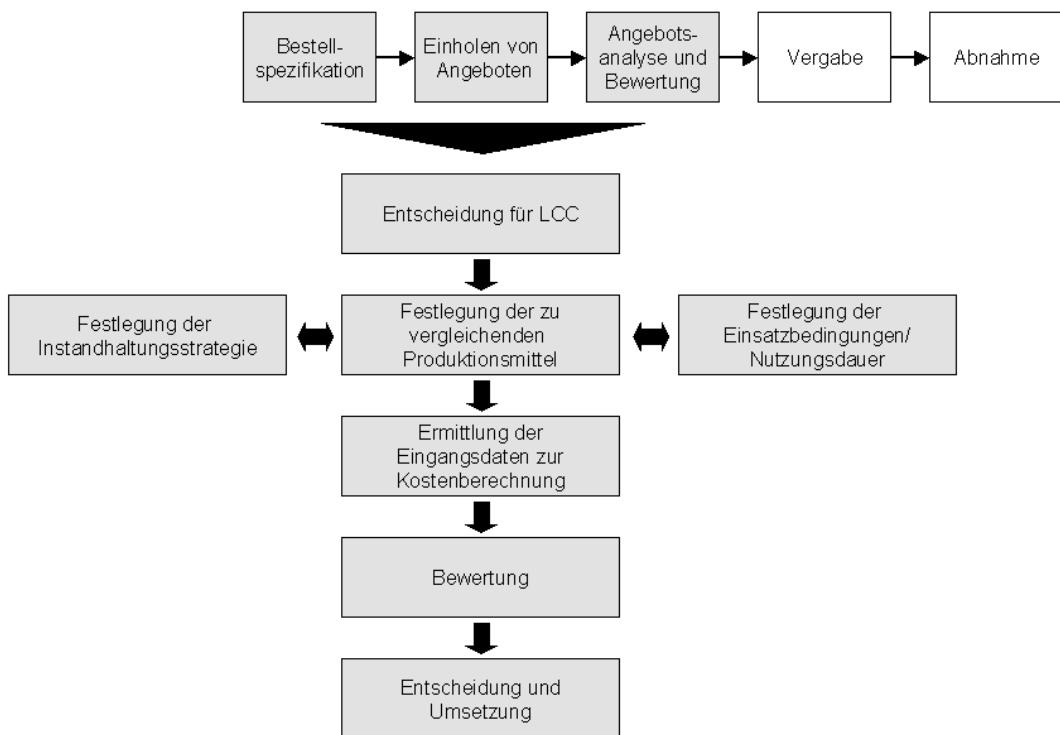
- Forschungs-, Entwicklungs- und Konstruktionskosten,
- Produktionskosten,
- Distributionskosten sowie
- Gewährleistungskosten während der Nutzungsphase.

zusammen (vgl. Vahrenkamp 2005, S. 14ff [142]; Zäpfel 1989b, S. 11,25 [161]). Technische Anlagensysteme verursachen über ihren gesamten Lebenszyklus Kosten, beginnend mit der Beschaffung bis hin zur Desinvestition [78]. In DIN EN 60300 wird die Lebenszykluskostenrechnung als Prozess der wirtschaftlichen Analyse zur Abschätzung der gesamten Beschaffungs-, Besitz- und Entsorgungskosten eines Produktes definiert [19]. Aus VDI Richtlinie 2884 ergeben sich für Anlagenbetreiber und Hersteller von Anlagen und Komponenten wichtige Anwendungsgebiete [18]. Für die Armaturenhersteller ist die Lebenszykluskostenrechnung ein Instrument, um die Entwicklung von neuen Armaturen in den frühen Entwurfsphasen zu optimieren. Kundenspezifische Konfigurationen und Preisvorgaben werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Die Zielsetzung beim Kunden liegt in der Optimierung der Produktionsanlagen z.B. durch gezielte Instandhaltungsstrategien, verbesserte Entscheidungshilfen für die Auswahl alternativer Betriebsmittel durch Schaffung von Kostentransparenz und Vergleichbarkeit (vgl. Aurich/Goßmann/Kipp 2006, S. 138 [4]).

Bislang werden bei der Beschaffung von Industriarmaturen Folgekosten, verursacht durch Wartung und Reparatur, nicht ausreichend einbezogen. Auf Grund mangelhafter

Methoden zur Ermittlung der Betriebskosten bei Industriearmaturen basieren Kaufentscheidungen hauptsächlich auf dem Kaufpreis, da sich Qualitätsmerkmale oft erst nach langjährigem Betrieb herausstellen. Für den Anlagenbetreiber ergibt sich aus einer allein auf kaufpreisorientierten Beschaffungsstrategie für Industriearmaturen ein erhöhtes Risiko, das die Gesamtkosten für den Lebenszyklus einer Armatur, insbesondere durch außerplanmäßige Produktionsabstellungen, deutlich ansteigen lässt.

Die Lebenszykluskostenrechnung ist ein Ansatz, der sich schon vielfach bewährt hat und auch auf Industriearmaturen angewendet werden kann. In Abbildung 7.2 wird die Lebenszykluskostenrechnung im Beschaffungsprozess nach VDI 2884 [18] dargestellt. Wichtige



**Abbildung 7.2:** LCC im Beschaffungsprozess (vgl. VDI 2884 [18])

Qualitäts- und Leistungsanforderungen müssen bereits vor Beginn der Lebenszykluskostenrechnung definiert werden. Industriearmaturen fallen unter die Druckgeräterichtlinie 97/23 EG und müssen gekennzeichnet werden. Dies wird in den Zertifikaten nach ISO 9001, DGRL und der vom Hersteller für Armaturen ausgestellten Konformitätserklärung mit Betriebsanleitung dokumentiert. Die technischen Details sind entsprechend diverser Lieferbedingungen (zum Beispiel DIN EN 12569), des AD-Regelwerks und den zur DGRL harmonisierten Normen auszuführen (vgl. Aurich/Goßmann/Kipp 2006, S. 138

[4]). Gleichzeitig zu den Leistungs- und Qualitätsanforderungen müssen die geplanten Betriebsbedingungen für die Industriearmatur betrachtet werden. Die folgenden Parameter wie Medium, Temperatur, Nennweite, Druck, Einbausituation, die Anzahl der Schaltungen pro Tag und die Laufzeit der Prozessanlage werden festgelegt und sind von großer Bedeutung. Diese Spezifikationen bilden die Grundlage für die Lebenszykluskostenrechnung und ermöglichen den Vergleich zwischen einer Einwegarmatur und einer Kreislaufarmatur zur Findung der finanziell attraktivsten Lösung.

Im Anschluss wird ein Ansatz zur Ermittlung der Lebenszykluskosten einer Einwegarmatur (EA) und einer Kreislaufarmatur (KA) vorgestellt:

$$(7.1) \quad LCC_{EA} = C_{BE} - E_S + C_{MI} + C_B + C_I + C_{SP} + C_U + C_{DE}$$

$$(7.2) \quad LCC_{KA} = C_W + C_{MI} + C_B + C_I + C_{SP} + C_U + C_{DE}$$

mit

$LCC_{EA}$	Lebenszykluskosten einer Einwegarmatur
$LCC_{KA}$	Lebenszykluskosten einer Kreislaufarmatur
$C_{BE}$	Beschaffungskosten (z.B. Einstandspreis für die Armatur, Verwaltung, Verpackung, Transport, Lagerhaltung, Eingangsprüfung)
$C_{MI}$	Montage- und Inbetriebnahmekosten (z.B Herstellen der Anschlüsse, Dokumentation der Inbetriebnahme, Emissionsschutzmaßnahmen, Schulung des Personals)
$C_B$	Betriebskosten (z.B. manueller Antrieb: Personalkosten, pneumatischer Antrieb: Instrumentenluftkosten, elektrischer Antrieb: Energiekosten)
$C_I$	Instandhaltungskosten (z.B. Wartung, Inspektion, Instandsetzung, Wartungsmaterial, Reinigung)
$C_{SP}$	Stillstands- und Produktionsausfallkosten (z.B. Produktverlust)
$C_U$	Umweltkosten (Umweltschäden, z.B. durch Stopfbuchschleckage, Austreten gefährlicher Medien)
$C_{DE}$	Demontage und Entsorgungskosten (z.B. Entsorgung der Industriearmatur und giftiger, gesundheitsgefährdender Rückstände)
$C_W$	Aufarbeitungskosten (z.B. Armatur zerlegen, reinigen, mechanisch bearbeiten, Verschleißteile austauschen, Armatur zusammenbauen und prüfen)
$E_S$	Verschrottungserlös (z.B. 1,2 €/kg)

Die Kostenbestandteile der Lebenszykluskosten einer Einwegarmatur und Kreislaufarmatur sind bis auf die Beschaffungskosten  $C_{BE}$  und Aufarbeitungskosten  $C_W$  gleich. Wenn eine Einwegarmatur durch eine neue Einwegarmatur ersetzt wird, verringern sich die Beschaffungskosten um den Schrotterlös  $E_S$ . Bei einer Kreislaufarmatur fallen keine Beschaffungskosten an, sondern nur die Aufarbeitungskosten  $C_W$ . Wenn also  $C_{BE} - E_S > C_W$ , dann ist eine Kreislaufarmatur die kostengünstigere Alternative.

## 7.3 Produktentwicklung

In der Kreislaufwirtschaft kommt der Produktentwicklung eine Schlüsselrolle zu, da hier die Voraussetzungen für die Kreislauffähigkeit eines Produktes festgelegt werden. Die bisherigen Anforderungen an die Produkte, wie z.B. Funktionserfüllung, Herstellbarkeit, Verfügbarkeit und Kosten werden erweitert um die Aufarbeitbarkeit. Dies macht die Produktentwicklung um eine Facette reicher, aber auch diffiziler (vgl. Nickel 1996, S. 1 [92]).

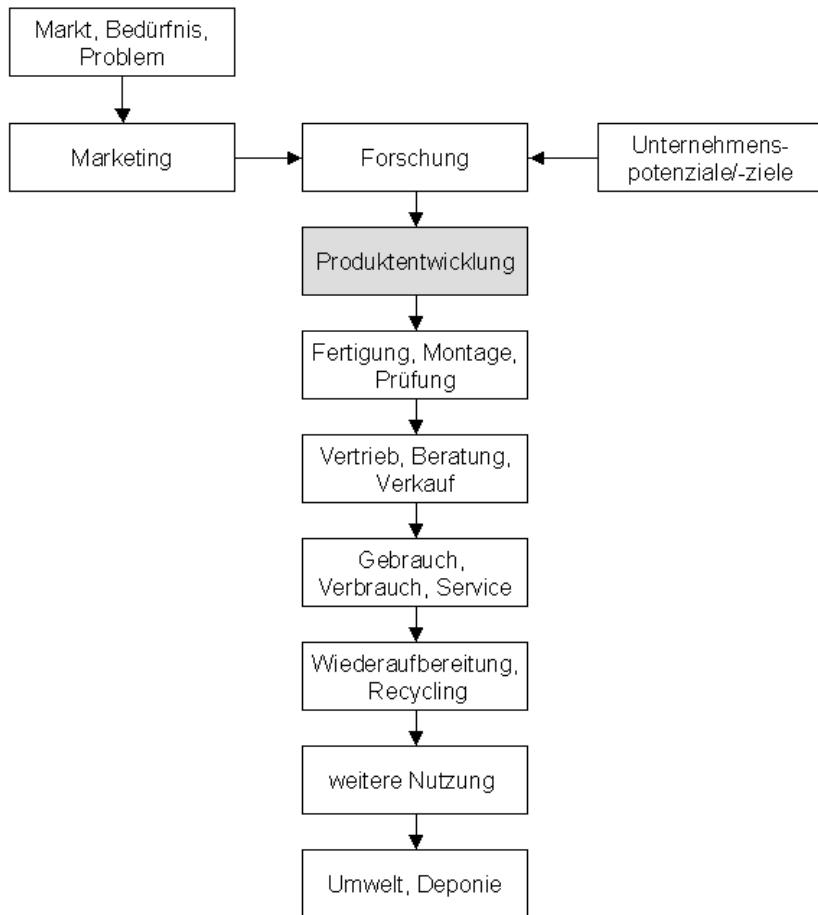
Die Produktentwicklung lässt sich als die Summe aller Aktivitäten, die zur Schaffung z.B. einer Neuentwicklung, Variantenkonstruktion oder einer Anpassungskonstruktion notwendig sind, definieren. Allerdings existiert kein einheitliches Modell zur Darstellung des Entwicklungsprozesses. In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze zur Produktentwicklung diskutiert [156], [111], [80], [42], [45].

Generelle Anforderungen an die Konstruktion von Kreislaufarmaturen, die bei der Entwicklung einbezogen werden müssen, sind z.B.:

- zuverlässige Erfüllung der geforderten Funktionen,
- kosten- und zeitgünstige sowie qualitätssichernde Fertigungs- und Montageverfahren,
- Wartungsfreundlichkeit,
- verbesserte Aufarbeitungsmöglichkeit,
- Recyclingfähigkeit der Gehäuse und Verschleißteile,
- Reduzierung von Abfällen,
- Erhöhung der Lebensdauer,
- Einsparung von Ressourcen,
- optimierte Verpackungs- und Transportmöglichkeiten,
- Berücksichtigung von Richtlinien und gesetzlichen Auflagen,
- Berücksichtigung der Sicherheitsauflagen für Mensch und Umwelt.

Hierbei spielen u.a. die Auswahl der Verbindungselemente und Werkstoffe sowie die Nachrüstbarkeit eine wichtige Rolle. Des Weiteren sind organisatorische Gesichtspunkte wie innerbetrieblicher Informationsaustausch zwischen Marketing, Forschung, Entwicklern, Konstrukteuren, Fertigung, Montage, Prüfung und Vertrieb von großer Bedeutung.

In Abbildung 7.3 wird der Produktentwicklungsprozess und die Verknüpfungen der einzelnen Ressorts dargestellt.



**Abbildung 7.3:** Produktentwicklungsprozess (vgl. Warnecke [151])

Bei der Armaturenentwicklung existieren derzeit eine Reihe von Problemen für das Wirtschaften in Kreisläufen (in Anlehnung an Schubert/Ziegahn/Hirth 1997, S. 17 [116]):

- Gestalterische Maßnahmen des Entwicklungsprozesses erschweren häufig die Umset-

zung wirtschaftlicher und ökologischer Recyclingprozesse, da den Entwicklern häufig die Nähe zu diesen Prozessen fehlt.

- Sinkende Fertigungstiefe (Fertigungstiefe = Anteil Eigenfertigung / (Anteil Eigenfertigung + Anteil Fremdbezug)) und Globalisierung der Produktion erschweren die Kooperation zwischen den beteiligten Akteuren in der Produktentwicklung. Die Verfügbarkeit von Informationen über die Kreislauffähigkeit der Materialien und Bauteile ist oft stark eingeschränkt, da die Motivation bei internationaler Zusammenarbeit höchst unterschiedlich ist.
- Innovative Ansätze für kreislaufgerechte Industriearmaturen haben oft einen erschwerteren Marktzugang, weil sie die traditionellen Armaturen mit gleicher Leistungsfähigkeit, die in Prozessanlagen eingesetzt sind, ersetzen sollen.
- Richtlinien zur kreislauf- und recyclinggerechten Konstruktion sind bisher noch nicht überall in Unternehmen akzeptiert bzw. umgesetzt. Nicht immer wird eine aufgearbeitete Armatur als neuwertige Armatur anerkannt.
- Bei der Armaturenaufarbeitung kommen die Vorteile der kreislaufgerecht konstruierten Armatur nur dann zum Tragen, wenn dadurch deutliche Kostenvorteile zu erzielen sind.
- Da es sich bei den meisten Armaturenentwicklungen um Anpassungsentwicklungen und nicht um Neuentwicklungen handelt, setzen sich innovative Lösungen nur langsam durch. Jüngstes Beispiel ist die Anpassung der Armaturen an die Anforderungen der TA Luft.

Daneben treten bei der Armaturenentwicklung u.a. die folgenden Zielkonflikte auf (in Anlehnung an Schubert/Ziegahn/Hirth 1997, S. 17-18 [116]):

- Lebensdauererhöhung versus Produktinnovation
- Reparaturfreundlichkeit versus Miniaturisierung
- Reduktion der Materialvielfalt versus Minimierung des Materialeinsatzes
- Recyclateinsatz versus Qualitätsanforderung

Zielkonflikte stellen eine Herausforderung dar, weil häufig kaum Erfahrungen und Informationen zu ihrer Bewältigung zur Verfügung stehen. Während des Konstruktionsprozesses sollten frühzeitig angepasste Lösungen für die unterschiedlichen Probleme entwickelt werden.

Die Einhaltung der VDI-Richtlinie 2221 bei der Entwicklung von Industriearmaturen ist eine wichtige Voraussetzung für die spätere wirtschaftliche Aufarbeitung. In der VDI-Richtlinie 2221 [13] „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ wird der Konstruktionsprozess in folgende Schritte (vgl. Pahl/Beitz 1986

[94]) Planung, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung unterteilt, die teilweise in mehreren Iterationsschritten durchlaufen werden. Die Planung setzt sich aus der Aufgabenauswahl und der Festlegung des Entwicklungsauftrages, die Konzeption aus der Präzisierung der Aufgabe, einem Pflichtenheft, Lösungsprinzipien, Teifunktionen und der Bewertung und Entscheidung, der Entwurf aus einem maßstäblichen Entwurf, der Optimierung, der Bewertung und Entscheidung, die Ausarbeitung aus einer Detailausarbeitung, den Fertigungsunterlagen und einem Prototyp zusammen. Die vier Teilbereiche des Konstruktionsprozesses sind teilweise miteinander verknüpft und können deshalb nicht immer eindeutig voneinander abgegrenzt werden. Weitere Informationen zur Produktplanung und Konstruktionsmethodik können der VDI-Richtlinie 2220 [12] „Produktplanung - Ablauf, Begriffe und Organisation -“ und der VDI-Richtlinie 2222 [14] „Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien -“ entnommen werden.

Abschätzungen haben ergeben, dass in der Produktentwicklungsphase bis zu 75 % der Herstellkosten und bis 80 % der Qualitätsperformance festgelegt werden. Entscheidungen, die während der Entwicklung einer Industriarmatur getroffen werden, haben einen großen Einfluss auf die nachfolgenden Lebenszykluskosten.

## 7.4 Netzwerkstrukturen bei der Armaturenaufarbeitung

Aus der Befragung verschiedener Armaturenaufarbeitungsunternehmen und deren Kunden resultieren die beiden Netzwerkstrukturen für Armaturenaufarbeitungsprozesse (siehe Abbildung 7.4 und Abbildung 7.5). Hierbei wurde zwischen interner und externer Armaturenaufarbeitung differenziert. Der interne Aufarbeitungsprozess findet z.B. innerhalb eines Konzerns statt, in der Regel ohne Berücksichtigung der externen Aufarbeitungsmöglichkeiten. Der externe Aufarbeitungsprozess berücksichtigt ausschließlich externe Armaturenaufarbeitungsunternehmen.

In Abbildung 7.4 ist die Netzwerkstruktur eines internen Armaturenaufarbeitungsprozesses dargestellt. In den Produktionsstätten verschiedener Unternehmen sind Armaturen installiert, die einem Verschleiß unterliegen und deshalb innerhalb von Wartungintervallen ausgetauscht und repariert werden müssen. Die aufzuarbeitenden Armaturen durchlaufen im Rahmen des firmeninternen Aufarbeitungsprozesses die grau hinterlegten Stationen. Die z.B. bei einer Produktionsabstellung anfallenden, aufarbeitungswürdigen Armaturen werden an einer Sammelstelle der jeweiligen Produktionsstätte gelagert, zur Sammelstelle der verschiedenen Armaturenwerkstätten transportiert und dort aufgearbeitet. Bei Kapazitätsengpässen der Armaturenwerkstätten erhalten die nicht durchführbaren Aufträge externe Armaturenaufarbeiter. Nach der externen Aufarbeitung werden die instandgesetzten Armaturen entweder auf direktem Wege zurück in die Armaturenwerkstatt oder zur Wareneingangs- und Qualitätsprüfungsstelle und von dort an das

Zentrallager abgegeben. Die aufgearbeiteten Armaturen, die keiner Qualitätsprüfung unterzogen wurden, werden bei der Sammelstelle der Werkstatt kurzfristig zwischengelagert, bis sie entweder bei Bedarf an die Sammelstellen der Produktionsstätten, oder für den Fall einer Freigabe durch die Produktion, an das Zentrallager geliefert werden. Danach erfolgt der Einbau der Armaturen von der Sammelstelle in die Produktionsanlage. Kleinere Mengen bleiben als Sicherheitsbestand direkt bei der Produktion. Falls nicht genügend Zeit zur Aufarbeitung der defekten Armaturen vorhanden ist, müssen diese durch eine fabrikneue oder aufgearbeitete Armatur aus dem Zentrallager ersetzt werden. Die zu verschrottenden Armaturen der Sammelstellen der Produktionsstätten, des externen Armaturenaufarbeiters und der Armaturenwerkstatt werden der Sammelstelle für Schrott zugeführt. Danach wird bei der externen Schrottverwertung eine Trennung zwischen metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen vorgenommen. Die metallischen Werkstoffe werden in Gießereien recycelt, die nichtmetallischen an eine Deponie bzw. Verbrennungsanlage geliefert.

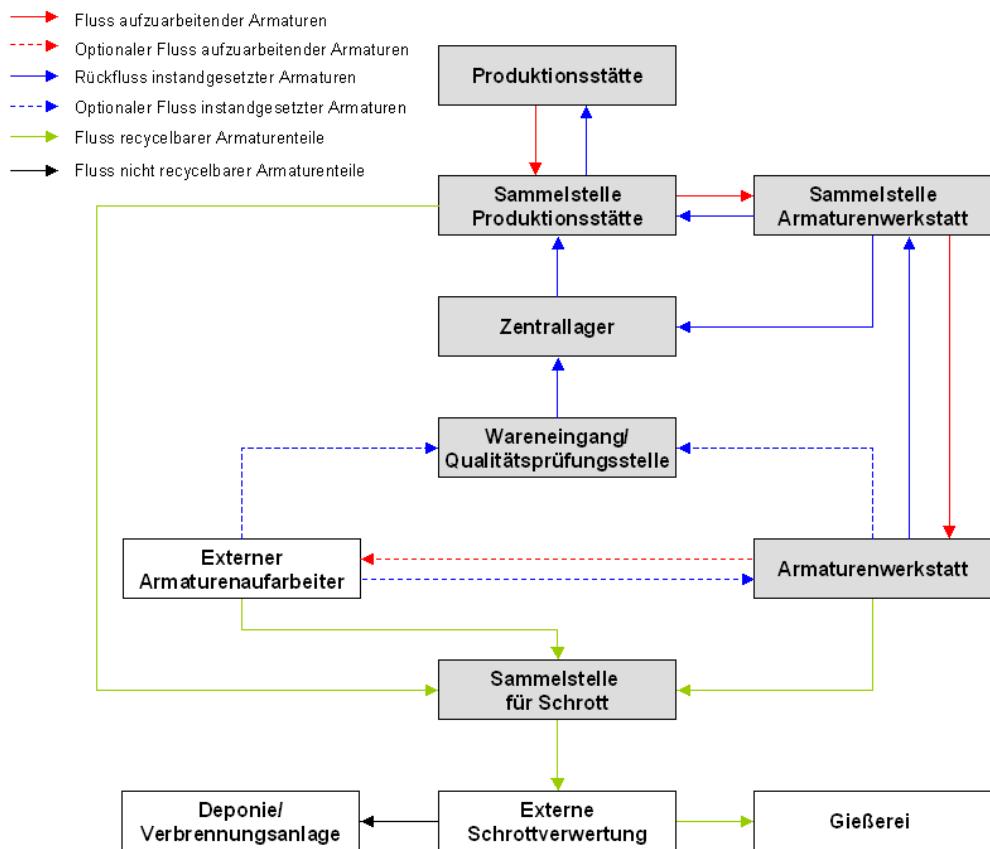
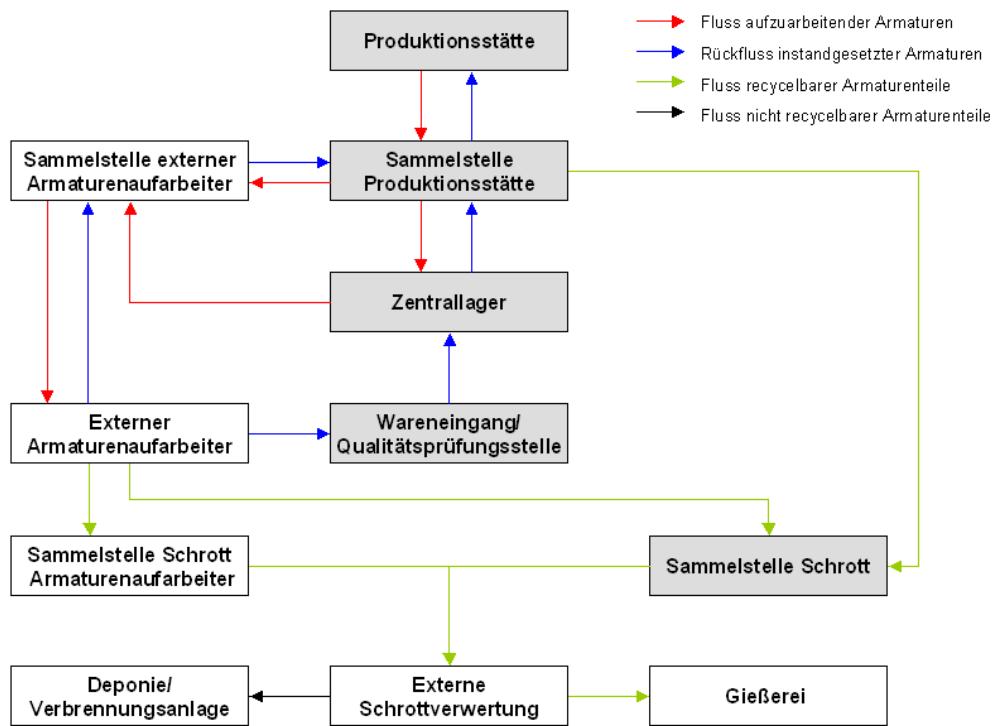


Abbildung 7.4: Netzwerkstruktur eines internen Armaturenaufarbeitungsprozesses

In Abbildung 7.5 wird die Netzwerkstruktur eines externen Aufarbeitungsprozesses veranschaulicht. Die grau gekennzeichneten Elemente stellen dabei wieder die internen Stationen dar. Der Unterschied zwischen dem internen und externen Armaturenaufarbeitungsprozess besteht im Wesentlichen darin, dass die aufzuarbeitenden Armaturen von der Sammelstelle einer Produktionsstätte über die Sammelstelle des externen Armaturenaufarbeiters direkt in dessen Werkstatt geliefert und aufgearbeitet werden. Die aufgearbeitete Armatur wird entweder über den Wareneingang und die Qualitätsprüfungsstelle an das Zentrallager oder direkt an die Sammelstelle der Produktionsstätte des Kunden geliefert. Kann eine Armatur nicht mehr aufgearbeitet werden, wird der Schrott entweder zum Kunden zurückgeführt oder verbleibt bei dem Aufarbeiter. Die Schrottverwertung bei der externen Armaturenaufarbeitung ist identisch mit dem Schrottverwertungsverfahren der internen Armaturenaufarbeitung.



**Abbildung 7.5:** Netzwerkstruktur eines externen Armaturenaufarbeitungsprozesses

## 7.5 Tätigkeiten im Rahmen der Armaturenaufarbeitung

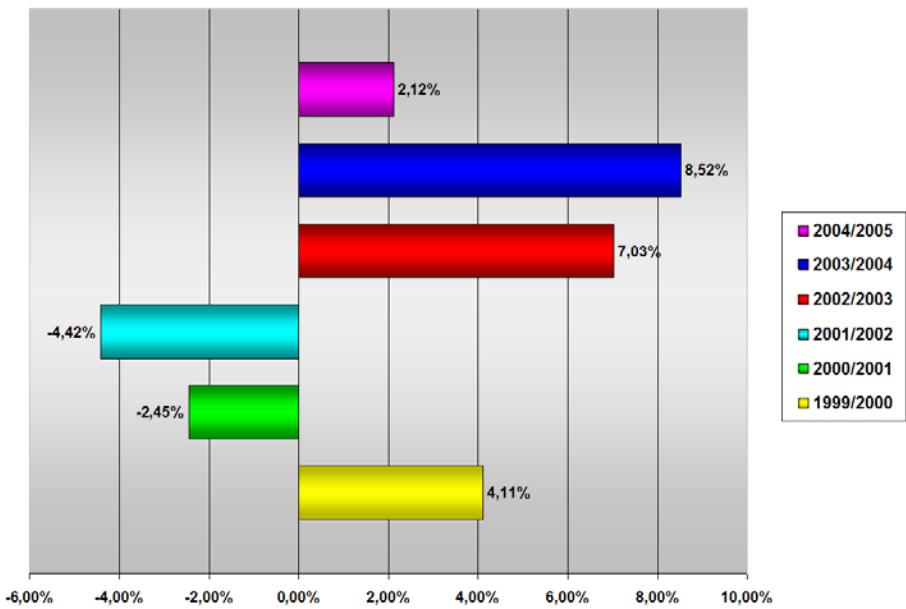
In der Armaturenbranche werden die Begriffe Armaturenaufarbeitung und Armaturenrecycling häufig synonym verwendet. Der erste Schritt im Rahmen eines internen oder externen Aufarbeitungsprozesses ist die werksübergreifende Sammlung von Altarmaturen, die meistens bei Umbaumaßnahmen, Anlagenrevisionen und Teildemontagen von Produktionsbetrieben anfallen. Darüber hinaus werden auch von einzelnen Auftraggebern fertig kommissionierte Armaturenlieferungen zur Aufarbeitung übergeben. Folgende Armaturentypen werden standardmäßig aufgearbeitet (vgl. Zahr 2003, S. 283 [160]): Kugelhähne, Kükenhähne, Faltenbalgventile, Schauglas-Armaturen, Absperrklappen, Schieber, Probenehmer-Armaturen, Hochdruck-Armaturen und Sonderarmaturen. Der Nennweitenbereich erstreckt sich dabei von DN 25 bis DN 600, darüber hinausgehende Nennweiten auf Anfrage. Außer den Standard-Materialien wie GGG 40.3, Edelstahl oder Stahl werden auch Sondermaterialien wie Titan, Hastelloy, Nickel usw. verarbeitet.

Neben dem Kegel- und Zylinderhahn hat sich auch der Kugelhahn in der chemischen oder petrochemischen Industrie mit einer wachsenden Anzahl von Verfahrenstechniken, ob in der Getränke- und Lebensmittelindustrie, ob bei tiefkalten, kalten oder warmen Durchflussmedien als sichere und zuverlässige Absperrarmatur behauptet. Die Wachstumsraten in Abbildung 7.6, die positiv korreliert mit der Investitionstätigkeit im Bereich Anlagenbau sind, belegen dies. Seine spezifischen Merkmale - freier Durchgang (d.h. Innendurchmesserübereinstimmung mit der Rohrleitung) und damit geringer Druckverlust, kurzer Schaltweg und gute Dichtheit am Absperrorgan sowie nach außen - erfüllen die Grundanforderungen, die an moderne und vielseitig eingesetzte Armaturen gestellt werden müssen (vgl. Dick 2000, S. 118 [35]).

Im Folgenden wird der komplette Aufarbeitungsprozess am Beispiel eines Kugelhahns von der Vorkontrolle der Altarmatur bis zur Entstehung der Neuwertarmatur beschrieben (in Anlehnung an Probst 2005, S. 1-11 [103]).

Tätigkeiten im Rahmen der **Vorkontrolle** (vgl. Probst 2000, S. 402-408 [102]):

- Eingangsprüfung über Stückzahl und Typ, Dokumentation im Aufnahmeprotokoll,
- Kennzeichnung der Gehäusedeckel und Unterteile an den Anschlussflanschen durch eine Hartstempelung mit fortlaufender Nummer,
- Identifizierung und Sortierung nach Nennweite und Armaturenklasse,
- Maßkontrolle der Baulängen (max. 3 mm Untermaß),
- visuelle Kontrolle auf Brenkerben, Risse, Brüche und Abplatzungen an Gehäuse und Aufbau,



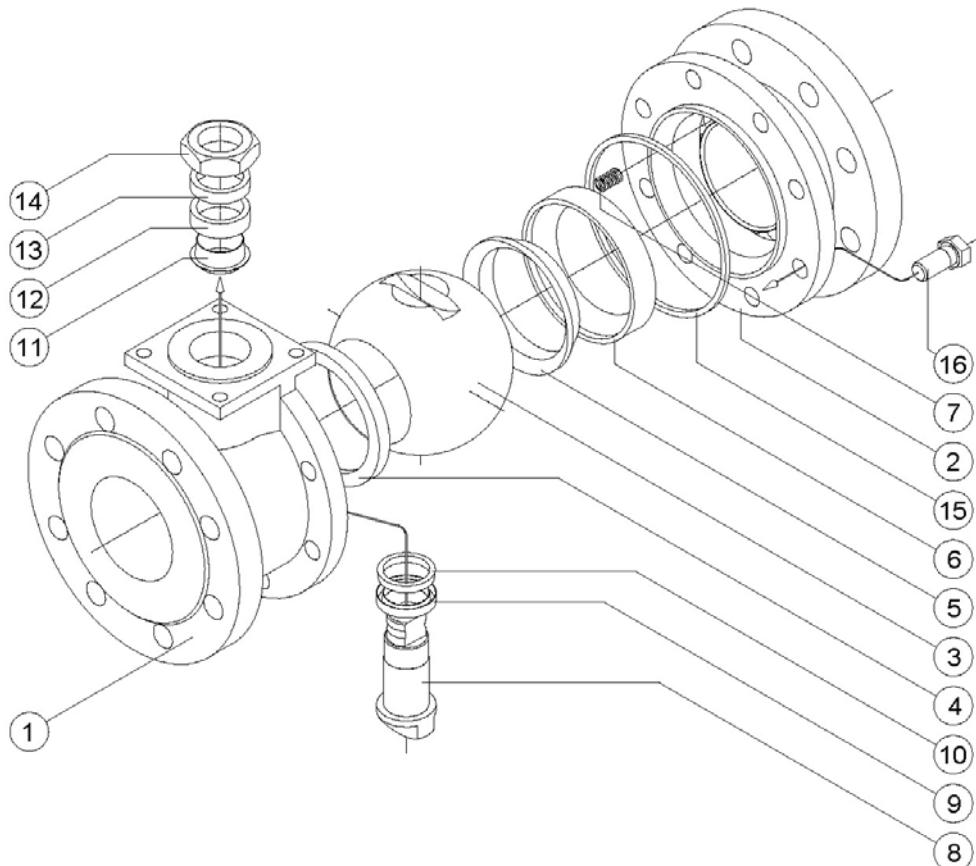
**Abbildung 7.6:** Wachstumsraten der Kugel-, Kegel- und Zylinderhähne von 1999 bis 2005,  
Datenquelle: Statistisches Bundesamt

- nach Rücksprache mit dem Kunden erfolgt die Freigabe zur Aufarbeitung oder Verschrottung.

Im Anschluss wird der Aufarbeitungsprozess exemplarisch am Kugelhahn INTEC K210 ausführlich beschrieben (in Anlehnung an Klinger Schöneberg 2005, S. 1-7 [75]):

- Der Kugelhahn (siehe Abbildung 7.7) wird zur Demontage fest und sicher in eine geeignete Vorrichtung eingespannt. Dies geschieht zweckmäßigerweise am Flansch des Gehäuses (1), um freien Zugang zu Zwischenflansch, Innenraum und Schaltwelle zu gewährleisten. Durch Lösen der Mittelflanschschrauben (19) kann nun das Gehäuseteil (2) abgenommen werden. Kugel (3) in Offenstellung bringen und danach wieder mit geeigneter Vorrichtung in das Gehäuse (1) drücken, um die Vorspannung des Kugelsitzes (4) aufzuheben. Somit kann der Lagerzapfen entfernt werden. Vorrichtung entfernen und Kugel entnehmen. Als Nächstes wird, falls vorhanden, der Handhebel abgenommen. Dazu muss die mit einem Innensechskant versehene Schraube gelöst und entfernt werden, da die Schraube formschlüssig in die Eindrehung der Schaltwelle eingreift und somit ein Abziehen des Handhebels unmöglich macht. Bei Bedarf kann auch der Handhebelanschlag mit demontiert werden. Danach wird die Schaltwelle demontiert. Zum Abschrauben der Mutter (14) muss ein geeigneter Keil in den verspannten Schlitz der Mutter getrieben werden, um ihn wieder auf seine Ausgangsbreite zu bringen. Dadurch

wird die erzeugte Eigenspannung bzw. Selbsthemmung im Schlitz der Mutter für die Zeit der Demontage aufgehoben. Mit einem Gabelschlüssel kann nun die Mutter (14) linksdrehend von der Schaltwelle (7) abgeschraubt werden. Um diesen Vorgang zu



**Abbildung 7.7:** Aufbau des Kugelhahns, Typ INTEC K210, INTEC = firmeninterne Produktbezeichnung, K = Kugelhahn, 2 = zweiteilig, 1 = gelagerte Kugel, beidseitig angefederte Kugelsitze, 0 = weichdichtender Kugelsitz

erleichtern, kann mit dem gerade demontierten Handhebel oder einem passenden Gabelschlüssel am Zweiflach gehalten werden. Nun kann die Schaltwelle vorsichtig in den Kugelraum gedrückt werden. Die Schaltwelle gegen Herunterfallen und Beschädigung sichern. Das Lager (13) kann abgenommen und die Sekundärdichtungsteile (11)(12) aus dem Dom entfernt werden. Unter Umständen kann es vorkommen, dass die Primärdichtungsteile (9)(10) im Gehäuse verbleiben und bei kleinen Nennweiten die Entnahme der Schaltwelle (7) erschweren. Es können die Dichtungen vorsichtig mit einem kleinen Schraubendreher aus ihrem Platz im Gehäuse Richtung Gehäuse

bzw. Schaltwellenbund gedrückt und dann die Schaltwelle leichter entnommen werden. Jegliche Beschädigung im Dichtungsbereich des Gehäuses (1) ist zu vermeiden. Danach können die Kugelsitzteile (4)(5)(6) ausgebaut werden. Die Kugelsitze (4) sind durch einen Hinterschnitt mit dem Kugelsitzfederring (5) verhakt. Den Kugelsitz (4) leicht zusammendrücken und in eine Richtung schieben, so dass ein Spalt entsteht. Diesen anheben und ringsum so verfahren, bis der Kugelsitz demontiert ist. Hier ist besonders darauf zu achten, dass die Auflageflächen der Dichtungen nicht beschädigt werden. Als Letztes wird die Gehäusedichtung (18) entfernt. Die in Tabelle 7.1 mit Sternchen gekennzeichneten Positionen werden bei einer Standardüberholung ausgetauscht, die nicht gekennzeichneten Bauteile werden nur erneuert, wenn eine Beschädigung erkennbar ist. Die restlichen Bauteile werden in speziellen Behältnissen mit den dazugehörigen Arbeitspapieren gelagert und mittels Hartstempelung gekennzeichnet, so dass sichergestellt werden kann, dass keine durch Produktrückstände kontaminierten Bauteile in anderen Kugelhähnen verbaut werden. Grundsätzlich werden nach der Demontage des Kugelhahns alle Dicht- sowie Verschraubungselemente in gesonderten Behältnissen sortiert und der Schrottentsorgung zugeführt. Es werden keine gebrauchten Dichtungen und Verschraubungen im weiteren Prozess wiederverwendet.

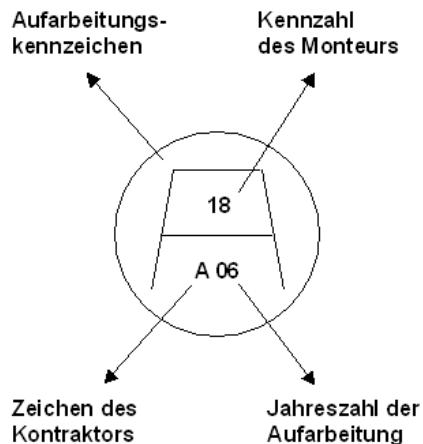
**Tabelle 7.1:** Bauteilbezeichnung INTEC K 210

Pos.	Bezeichnung	Pos.	Bezeichnung
1	Gehäuse	9	Dichtring unten
2	Gehäuseteil	10*	Keilring unten
3	Kugel	11*	Dichtring oben
4*	Kugelsitz	12*	Keilring oben
5*	Kugelsitz angefedert	13	Lager, Schaltwelle oben
6	Aufnahmerring angefedert	14	Mutter
7*	Spiralfeder	15	Gehäusedichtung
8*	Schaltwelle	16	Sechskantschraube

- Alle Metallteile des zerlegten Kugelhahns werden einem Reinigungsprozess unterzogen. Hierbei kommen das Schleuder- oder Handstrahlverfahren zum Einsatz und auf eine Trennung zwischen Edelstahlbauteilen bzw. Sondermaterialien sowie Bauteilen aus Stahl/Stahlguss wird geachtet. Der durch das Strahlen verursachte Materialabtrag liegt im Mikrometer-Bereich und somit deutlich unterhalb der Toleranzgrenzen der einzelnen Bauteile. Kleinstteile werden einer materialschonenden Ultraschallreinigung unterzogen. Sind die zu reinigenden Teile durch giftige oder gesundheitsgefährdende

Produktrückstände kontaminiert, werden diese in einen Wirbelbettofen eingebracht und gereinigt. Die Restpartikel werden in einem Sandbett, das durch Luft- und Gaszirkulation vom Boden her in Bewegung gehalten wird, bei einer Ofentemperatur von ca. 450 °C und einer Verweildauer von 60 Minuten, entfernt. Die dabei anfallenden Abgase werden im Rahmen einer Abgasreinigung bei ca. 900 °C verbrannt.

- Die Gehäuseteile werden nach dem Reinigen einer visuellen Kontrolle unterzogen. Hierbei werden die relevanten Bauteile auf Korrosionsabtrag, Lunker und Risse und die Dichtflächen sowie Dichtelemente auf Schäden untersucht. Spindelbuchsen aus Rotguss werden generell ausgetauscht. In nicht eindeutigen Schadensfällen kann zusätzlich eine Oberflächenprüfung nach dem Farbeindringverfahren oder dem Ultraschallprüfverfahren bzw. eine Durchstrahlungsprüfung vorgenommen werden.
- Nach der visuellen Überprüfung der Kugel wird diese in geeigneten Bädern entfettet und gesäubert. Kugeln dürfen keine Beschädigungen aufweisen. Grundsätzlich wird bei Kugelhähnen die Kugeloberfläche poliert. Die Rautiefe  $R_Z$  darf nicht mehr als  $1 \mu\text{m}$  betragen. Laut Firmenangaben müssen ca. 20 % der Kugeln verschrottet bzw. ausgewechselt werden. Die Werkstoffe der Schaltwelle und Kugel werden gemäß Armaturenklasse überprüft, um Verwechslungen auszuschließen.
- Die Anschlussflansche des Kugelhahns werden auf Parallelität, Riefen, Eindrücke und chemischen Angriff untersucht. Unter Beachtung der Flanschplattendicke ist ein Nacharbeiten an den Dichtflächen möglich. Die Baulänge des Kugelhahns darf maximal 3 mm unterschritten werden.
- Nach der Aufarbeitung der einzelnen Kugelhahnbauteile erfolgt nun an separaten Arbeitsplätzen der Zusammenbau zu einem neuwertigen Kugelhahn. Bei der Remontage ist auf die korrekte Werkstoffpaarung zu achten, insbesondere bei Sonderarmaturen. Bei innen ausgekleideten Kugelhähnen ist der Einsatz von Keramikkugeln möglich. Wird der Kugelhahn in einer chemischen Anlage eingebaut, die der TA-Luft und VDI 2440 [15] entsprechen muss, so ist darauf zu achten, dass nur zugelassene Dichtungssysteme verwendet werden.
- Jeder Kugelhahn wird vor der Druck- und Dichtheitsprüfung einer Funktionsprüfung unterzogen, um Montagefehler auszuschließen. Die Druckprüfung bzw. Festigkeitsprüfung erfolgt mit Wasser als Prüfmedium in einer speziell dafür vorgesehenen Prüfeinrichtung mit dem 1,5-fachen Nenndruck über einen Zeitraum von einer Minute. Die Dichtheitsprüfung wird in einem Wasserbad durchgeführt. Dabei wird der Kugelhahn im Innenraum mit ca. 6,0 bar Luft über eine Dauer von ebenfalls einer Minute beaufschlagt. Während dieser Dichtheitsprüfung wird durch ein mehrfaches Betätigen der Stellvorrichtung eine weitere Funktionsprüfung unter Belastung durchgeführt.
- Zur eindeutigen Kennzeichnung des aufgearbeiteten Kugelhahns als Neuwertarmatur wird dieser durch eine firmenspezifische Kodierung (z.B. Bayer AG) mittels Sternstempel (siehe Abbildung 7.8) an einem Flanschblatt des Kugelhahns gekennzeichnet.



**Abbildung 7.8:** Stempel für die Dokumentation nach der Aufarbeitung an einem Flansch des Kugelhahns (vgl. Zahr 2003, S. 288 [160])

Die Kodierung beinhaltet Angaben über den Aufarbeitungskontraktor, den verantwortlichen Monteur sowie das Jahr, in dem der Kugelhahn aufgearbeitet wurde. Dadurch kann bei einer eventuellen Reklamation der Aufarbeitungsprozess eindeutig nachvollzogen werden.

- Die Neuwertarmatur aus Stahl/Stahlguss wird nach der Aufarbeitung und den durchgeführten Prüfungen zum Schutz gegen Korrosion mit einer Farbbeschichtung versehen. Anschließend sind die Anschlussflansche mit so genannten Flanschkappen zu verschließen.
- Im Rahmen des Aufarbeitungsprozesses für Industriearmaturen kommt der Qualitäts sicherung eine große Bedeutung zu. Im Folgenden werden die Regularien und Vorschriften für den Aufarbeitungsprozess auszugsweise aufgeführt (vgl. Zahr 2003, S. 288 [160]):

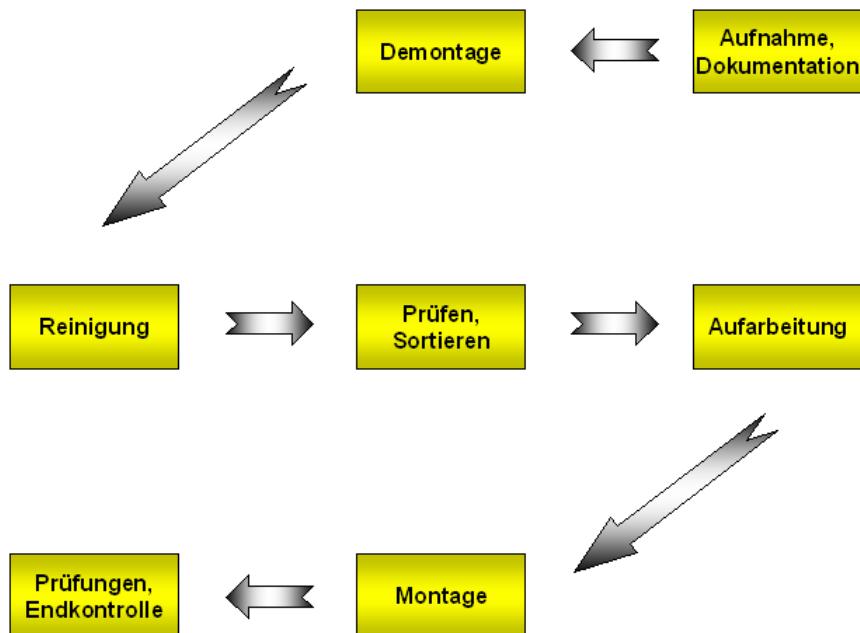
  - Zertifizierung gemäß DIN EN ISO 9002 des Aufarbeitungsbetriebes.
  - Zulassung als Fachbetrieb nach § 19 L des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG).
  - Die Durchführung der Aufarbeitung erfolgt in der Regel nach der jeweiligen Kundenwerknorm „Technische Lieferbedingungen für Altarmaturen zur Aufarbeitung“.
  - Die Durchführung der Dichtheits- und Festigkeitsprüfung erfolgt gemäß der DIN 3230/BL. 3 „Technische Lieferbedingungen für Armaturen, Zusammenstellung möglicher Prüfungen“.
  - Als zusätzliche Qualitätssicherung bei Sonderarmaturen (Sonderbauweise, z.B. Hochdruck und Sondermaterialien) erhalten diese ergänzend ein Armaturen-Datenblatt je Armatur. Hierin wird nach der Aufarbeitung die Materialpaarung aller eingesetzten

Einbauteile dokumentiert und der Armatur beigelegt.

Die EG-Konformitätserklärung für Neuwertarmaturen kann im Rahmen der Druckgeräterichtlinie (DGRL), die sich auf das erstmalige Inverkehrbringen und die Inbetriebnahme bezieht, erteilt werden. Die Leitlinie 1/3, Druckgeräterichtlinie 97/23/EG, Kommissionsarbeitsgruppe „Druck“, Artikel 1, sagt aus, dass Reparaturen an Armaturen nicht unter die DGRL fallen, sofern keine erheblichen Änderungen vorgenommen werden. Nur beim erstmaligen Inverkehrbringen einer Neuarmatur darf der Armaturenhersteller eine EG-Konformitätserklärung ausstellen.

Reparaturen, die betriebsbedingt an eingebauten Kugelhähnen oder sonstigen Industriearmaturen innerhalb des laufenden Betriebes erfolgen müssen, sind auch durchführbar. Insbesondere bei eingeschweißten Armaturen und Ventilen mit großer Nennweite ist dies der Fall. Der Aufarbeitungsprozess beschränkt sich hierbei auf eine Reparatur bzw. den Austausch von Bauteilen je nach Schadensfall.

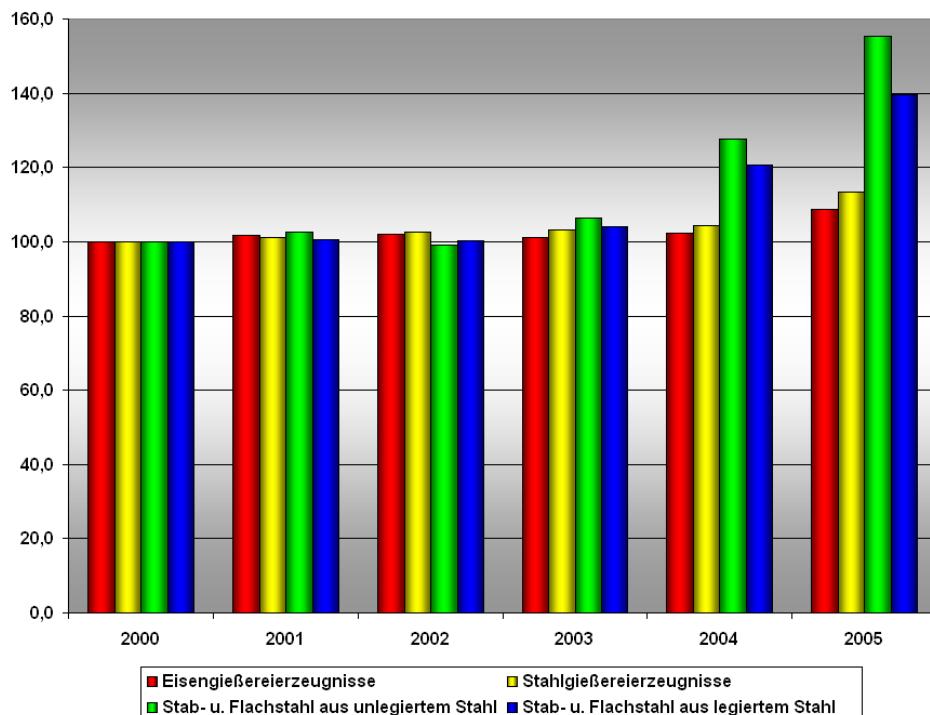
Abschließend wird in Abbildung 7.9 der zuvor ausführlich erläuterte Armaturenaufarbeitungsprozess am Beispiel eines Kugelhahns vereinfacht dargestellt.



**Abbildung 7.9:** Vereinfachte Darstellung eines Armaturenaufarbeitungsprozesses

## 7.6 Einsparpotential bei der Aufarbeitung von Industriearmaturen

Durch die Armaturenaufarbeitung werden sowohl Ressourcen geschont als auch Kosten reduziert. Die teuerste Komponente einer Armatur ist in der Regel das Gehäuse. Dieses kann, sofern es keine Mängel aufweist, wieder verwendet werden. Steigende Stahl- und Edelstahlpreise (siehe Abbildung 7.10) sind Einflussfaktoren, die die Wirtschaftlichkeit der Armaturenaufarbeitung im Vergleich zu einer Einwegarmatur erhöhen. Für die Ermittlung der Indexzahlen der Stahl- und Edelstahlpreise in Abbildung 7.10 wurden die Werte des Jahres 2000 als Basis zugrunde gelegt.



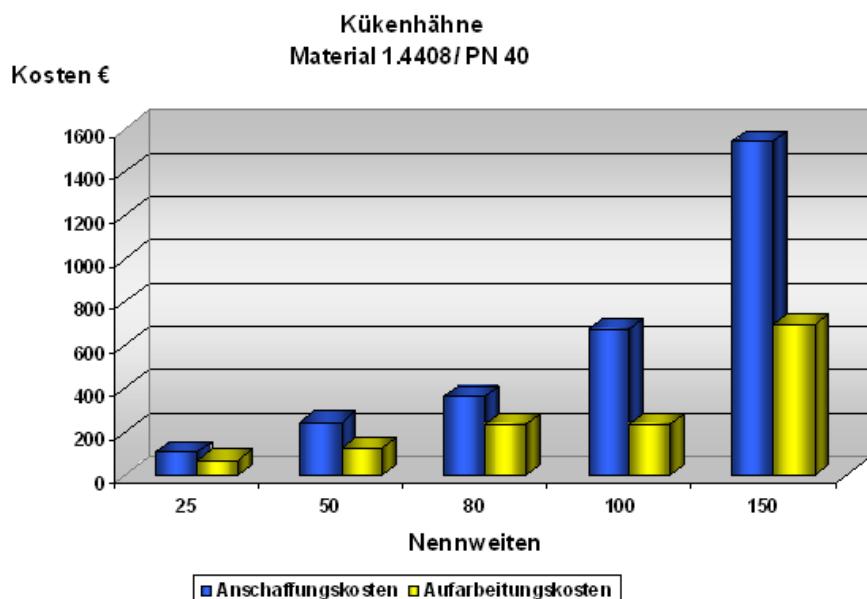
**Abbildung 7.10:** Indexzahlen von Stahl- und Edelstahlpreisen und Gießereierzeugnissen,  
Datenquelle: Statistisches Bundesamt

Die Daten zur Erstellung der Abbildungen 7.11, 7.12 und 7.13 wurden durch Befragungen von Armaturenherstellern, Armaturenaufarbeitern und Armaturenfachstellen der Großchemie ermittelt. Aus Wettbewerbsgründen können die Namen der Firmen hier nicht genannt werden. In Abbildung 7.11, 7.12 und 7.13 wird das Einsparpotential am Beispiel von Kükenhähnen, Schiebern und Klappen dargestellt. Bei den Anschaffungskosten für die betrachteten Armaturenbauarten sind bereits Rabatte für Großabnehmer berück-

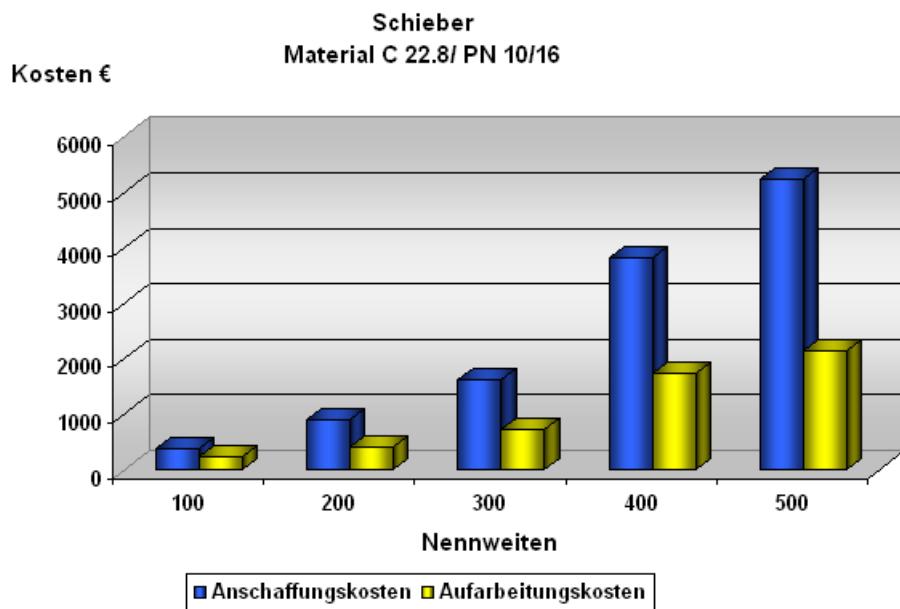
sichtigt. Die Ersparnis einer Standardaufarbeitung gegenüber einer Neuarmatur liegt bei Kükenhähnen zwischen ca. 33 % und 65 %, bei Schiebern zwischen ca. 39 % und 59 % und bei Klappen zwischen ca. 22 % und 50 % je nach Bauart, Werkstoff und Nennweite. Festzustellen ist, dass bei größeren Nennweiten die Aufarbeitungskosten im Verhältnis zu den Anschaffungskosten einer Einwegarmatur sinken. Deshalb werden kleine Nennweiten z.B. bei Kükenhähnen DN 25 und DN 50, bei Schiebern DN 100 und bei Klappen DN 80 in zunehmendem Maße, in Abhängigkeit vom Material, nicht mehr aufgearbeitet. Die Aufarbeitung lohnt sich insbesondere bei Sonderarmaturen, deren Gehäuse aus Hastelloy, Titan, Tantal u.a. bestehen.

Bei der Auswertung einer Großabstellung in einem Chemiekonzern wurden ca. 355 Armaturen von DN 15 bis DN 500 aufgearbeitet. Die Anschaffungskosten für neue Armaturen hätten 204.000 € betragen. Die Aufarbeitungskosten betrugen nur 84.000 €, somit wurde eine Kostenersparnis von 58 % erzielt. Diese Daten bilden die Basis für die Ermittlung des durchschnittlichen Neu- und Aufarbeitungspreises in Kapitel 9.11 und 9.12.

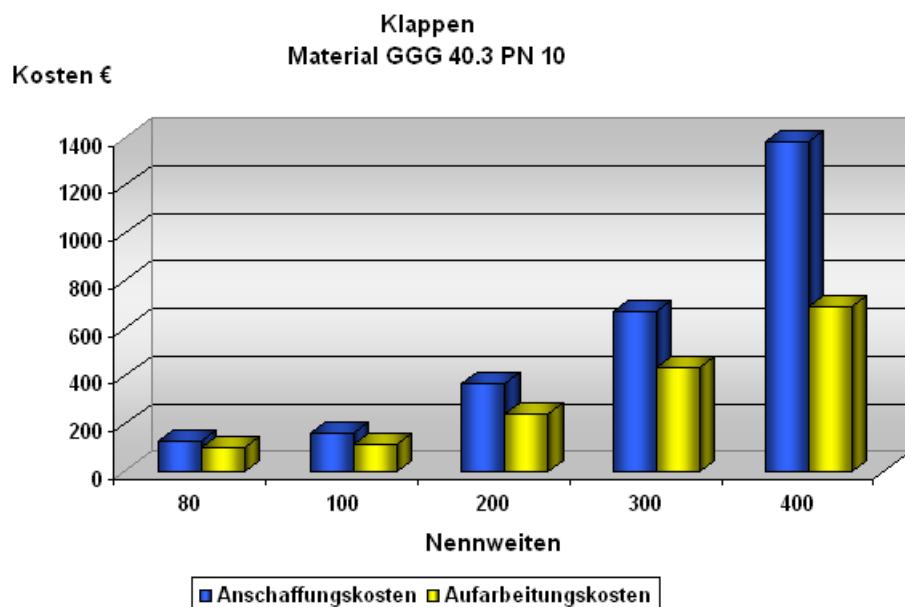
Eine Analyse bei verschiedenen Armaturenaufarbeitern hat ergeben, dass ca. 95 % der angelieferten Armaturen trotz unterschiedlicher Einsatzbedingungen (Einbausituation, Druck, Medium, Temperatur, Schaltungsintensität etc.) bis zu fünfmal aufgearbeitet werden konnten. Die Aufarbeitungskosten für Armaturen, die nach den Anforderungen der TA-Luft umgerüstet werden müssen, steigen um ca. 55 %.



**Abbildung 7.11:** Kostengegenüberstellung bei Kükenhähnen, Anschaffungskosten versus Aufarbeitungskosten



**Abbildung 7.12:** Kostengegenüberstellung bei Schiebern, Anschaffungskosten versus Aufarbeitungskosten



**Abbildung 7.13:** Kostengegenüberstellung bei Klappen, Anschaffungskosten versus Aufarbeitungskosten

# **8 Konzeption eines formalen Modells zur strategischen Planung von Reverse-Logistik-Netzwerken**

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die juristischen Aspekte bei der Armaturenaufarbeitung, die Industriearmaturen sowie die industrielle Armaturenaufarbeitung dargestellt. Bewusst wurde die Industriearmaturenbranche ausgewählt, da hier strategische Standortentscheidungen sowie Kapazitätsanpassungsmaßnahmen zu treffen sind, um das bereits bestehende Reverse-Logistik-Netzwerk<sup>1</sup> an die veränderten Marktsituationen anzupassen bzw. zu optimieren.

Deshalb wird in diesem Kapitel ein formales Planungsmodell entwickelt, welches die Armaturenaufarbeiter und Armaturenhersteller bei der strategischen Standortplanung und der Kapazitierung von Aufarbeitungsanlagen, Produktionsstätten und Ersatzteilelbzw. Vertriebslager unterstützt. Ferner soll das Planungsmodell für die gesamte Branche Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung stellen. Des Weiteren soll im Rahmen von Einzelbetrachtungen näher auf die beteiligten Akteure eingegangen werden. Zu diesem Zweck werden im Rahmen einer Problemstrukturanalyse unterschiedliche Ansätze aus der Literatur zur simultanen Optimierung von Standorten und Transportwegen auf ihre Anwendbarkeit sowie Erweiterbarkeit untersucht. Diese Erkenntnisse werden zur Beantwortung der in dieser Arbeit im Mittelpunkt stehenden Fragestellungen zur strategischen Standortplanung in Reverse-Logistik-Netzwerken verwendet. Darauf aufbauend wird ein geeigneter Ansatz für die vorliegende Problemstruktur ausgewählt und systematisch modifiziert, so dass das daraus resultierende Standortplanungsmodell auf die Problemstellung der Industriearmaturenbranche angewendet werden kann.

## **8.1 Analyse der Problemstruktur**

Zur kosteneffizienten Standortplanung in Reverse-Logistik-Netzwerken oder zur Umgestaltung bereits bestehender Supply Chains, angewendet für die Industriearmaturenbranche, sind die folgenden Fragestellungen zu untersuchen:

---

<sup>1</sup> Synonym: Closed Loop Supply Chain

- Wie viele Aufbereitungsanlagen sind notwendig, um den Befarf an aufgearbeiteten Industriarmaturen zu decken?
- Wie viele Fertigungseinrichtungen und Lager werden benötigt, um die Nachfrage nach Neuarmaturen befriedigen zu können?
- Mit welchen Rückflussquoten von Altarmaturen kann gerechnet werden?
- Wie hoch ist die Aufbereitungsquote von Altarmaturen und wie oft können sie aufgearbeitet werden?
- Welche Rücknahmekosten, Prüfkosten, Demontagekosten, Transportkosten und Aufarbeitungskosten fallen an?
- An welchen Produktions- und Aufarbeitungsstandorten werden Kapazitätserweiterungsmaßnahmen durchgeführt?
- Wie viel Prozent der aufzuarbeitenden Industriarmaturen arbeiten Armaturenhersteller auf?
- Welche Kosten entstehen bei der Entsorgung von Verschleißteilen?
- Welche Erlöse sind mit den aufgearbeiteten Armaturen zu erzielen?
- Welche Vorteile und Nachteile ergeben sich aus den zu untersuchenden Szenarien für die beteiligten Akteure?

Die aufgestellten Fragen dienen der Gestaltung eines flächendeckenden Reverse-Logistik-Netzwerks für Armaturenaufarbeiter und Armaturenhersteller. Die Zielsetzung ist es, ein Modell zu entwickeln, das eine Standort-, Kapazitäts- und Transportplanung für Aufarbeitungs-, Fertigungsanlagen und Lagerstätten, unter Einbeziehung der rückwärts gerichteten Warenflüsse, zu minimalen Kosten ermöglicht.

## **8.2 Zielkriterien, Modellanforderungen und Modellabgrenzungen**

Die Modellierung eines realen, komplexen Reverse-Logistik-Netzwerks oder die Umgestaltung einer bereits bestehenden Supply Chain beinhaltet in der Regel die Schwierigkeit, dass die Realität durch das entstehende Modell nur vereinfacht dargestellt werden kann. Diese vereinfachten Annahmen sind allerdings notwendig, weil die Modellierung des Modells dadurch überhaupt erst möglich wird. Dadurch wird eventuell die Lösungsgüte eingeschränkt. Deshalb müssen auf der Basis der vorhergehenden Kapitel Zielkriterien, Anforderungen und Abgrenzungen für das zu entwickelnde Modell spezifiziert werden. Im Anschluss werden die Zielkriterien, Anforderungen und Abgrenzungen, denen das Modell genügen muss, aufgezeigt.

## **Zielkriterien:**

- Das zu entwickelnde Modell soll Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter bei der strategischen Standortplanung in Reverse-Logistik-Netzwerken unterstützen und sowohl eine branchenbezogene als auch branchen neutrale Ergebnisinterpretation zu lassen.
- Vorrangige Zielsetzung ist die Minimierung der Kosten sowie die Verbesserung der Kapazitätsauslastung der beteiligten Armaturenaufarbeiter und Armaturenhersteller. Ferner soll untersucht werden, welche Kostenreduktionen im Bereich der Lagerhaltung sowohl für die Armaturenhersteller als auch für die Kunden erzielt werden können.
- Im Rahmen der Armaturenherstellung und Armaturenaufarbeitung sollen insbesondere die Standort- und Kapazitätsplanung unter Berücksichtigung der Rückfluss- und Wiederaufbereitungsquoten betrachtet werden.
- Das Modell soll Handlungsempfehlungen für die beteiligten Akteure zur Verfügung stellen.
- Der ausgewählte Aggregationsgrad des Modells muss sowohl der Komplexität des Planungsproblems Rechnung tragen als auch für eine praktische Umsetzung bezüglich Datenbeschaffung, Lösungsaufwand und Akzeptanz geeignet sein.

## **Anforderungen und Abgrenzungen**

- Das Aufkommen an aufzuarbeitenden Industriearmaturen und die Nachfrage an Neuarmaturen ist hinsichtlich Menge pro betrachteter Zeiteinheit und Ort vorbestimmt.
- Es wird angenommen, dass Neuarmaturen und aufgearbeitete Industriearmaturen den gleichen Qualitätsstandards entsprechen und somit setzt sich die gesamte Industriearmaturennachfrage sowohl aus Neuarmaturen als auch aufgearbeiteten Industriearmaturen zusammen.
- Reststoffe und Abfälle (z.B. nichtmetallische Dichtungen), die bei der Demontage der Industriearmaturen anfallen, werden direkt Entsorgungseinrichtungen wie z.B. Depo nien, Müllverwertungs- oder Müllverbrennungsanlagen zugeführt. Die dadurch verursachten Entsorgungskosten sind so gering, dass sie nicht berücksichtigt werden.
- Die Verschrottung einer Industriearmatur stellt einen Erlös in Abhängigkeit des Materialwertes dar und ist im Aufarbeitungspreis berücksichtigt.
- Die Rückflussquoten und Wiederaufbereitungsquoten der Industriearmaturen sind abänderbar, aber im Ausgangsszenario identisch mit der Realität.
- Die Armaturenhersteller fertigen nur neue Industriearmaturen und arbeiten keine auf.
- Für das Modell wird sowohl ein durchschnittlicher Neupreis als auch ein durchschnittlicher Aufarbeitungspreis für alle berücksichtigten Industriearmaturenarten angenommen.

- Die Kapazität bestehender Fertigungseinrichtungen, Aufarbeitungsanlagen und Lager reicht nicht aus, um die Nachfrage an Neu- und Kreislaufarmaturen zu befriedigen. Deshalb müssen neue Standorte geplant und deren Kapazität, in Abhängigkeit der vorwärts und rückwärts gerichteten Warenströme, optimiert werden.
- Die fixen Errichtungskosten der zu planenden Standorte sind pro Einrichtungstyp in Abhängigkeit der Kapazität vorbestimmt.
- Die variablen Betriebskosten sind für jeden Einrichtungstyp zu berücksichtigen.
- Die potentiellen Errichtungsstandorte sind vorgegeben?
- Die Transportkosten sind abhängig von der Armaturenmenge und der Transportstrecke. Hierbei impliziert die Errichtung der verschiedenen Standorte die zu berücksichtigende Transportentfernung und somit die Transportkosten. Deshalb ist es nicht möglich, das Standort- und Transportproblem getrennt voneinander zu betrachten. In diesem Fall ist ein simultaner Lösungsweg zu wählen.
- Das verwendete Datenmaterial beruht auf realistischen Zahlen einiger wichtiger Unternehmen dieser Branche, die mittels Befragung gewonnen wurden. Auf die Nennung der Unternehmen wird aus Datenschutzgründen verzichtet. Auf die Ermittlung des Datenmaterials und die gestellten Fragen an die beteiligten Unternehmen wird in Kapitel 9 näher eingegangen.

Als Einführung in die Thematik werden die Teilbereiche der Standortplanung aufgezeigt und die Unterschiede dargestellt. Danach werden auf Basis der Modellanforderungen, Zielkriterien und der Abgrenzungen unterschiedliche Modellansätze des Operations Research auf ihre Anwendbarkeit, Modifizierbarkeit und Erweiterbarkeit für die Planung von Closed Loop Supply Chains untersucht. Da hier Fragestellungen der Standort-, Kapazitäts- und Transportplanung im Vordergrund stehen, werden die unterschiedlichen Ansätze auf die Erfüllung der formulierten Anforderungen überprüft. Sowohl die Zielkriterien als auch die Abgrenzungen sind maßgeblich für das zu wählende OR-Modell.

## 8.3 Teilbereiche der Standortplanung

In der Literatur werden die Ansätze zur Standortplanung in die volkswirtschaftliche, betriebliche und innerbetriebliche Standortplanung unterteilt. Im Folgenden werden die drei Teilbereiche voneinander abgegrenzt und einige historisch bedeutsame Arbeiten vorgestellt.

**Volkswirtschaftliche Standorttheorien** versuchen, die Ansiedlung der Unternehmen und Betriebe von Wirtschaftssektoren im Raum (innerhalb eines Wirtschaftsgebietes) zu erklären oder zu optimieren (vgl. Domschke/Drexl 1996, S. 1 [38]). Meistens sind Modelle

mit mehr oder weniger stark von der Realität abweichenden Annahmen Gegenstand der Untersuchung (analog zur betrieblichen und innerbetrieblichen Standortplanung). V. Thünen (1826) war einer der ersten, der eine Arbeit zur Standorttheorie verfasste und somit einen wesentlichen Beitrag zur volkswirtschaftlichen Standorttheorie leistete. Er befasste sich mit der Anordnung landwirtschaftlicher Produktionszweige in einem isolierten Staat mit einem Absatzort unter Berücksichtigung des Bodenwertes, der Entfernung vom Absatzort und der Produktionskosten. Sein Bestreben war es herauszufinden, warum der landwirtschaftlich nutzbare Boden um eine Stadt herum einem bestimmten Nutzen zugeführt wurde, und aus welchem Grund die verschiedenen Arten der Bodennutzung, wie Feldwirtschaft, Forstwirtschaft, Viehzucht und Milchproduktion immer in einer bestimmten Reihenfolge um die Stadt herum angeordnet waren. Das Resultat seiner Untersuchungen war, dass die Art der landwirtschaftlichen Bodennutzung nicht ausschließlich durch die natürlichen, unabänderlichen Bodenbeschränkungen bestimmt ist, sondern im Wesentlichen von ökonomischen Gesichtspunkten abhängt, nämlich von der Entfernung des Produktionsorts vom Konsumort und den sich daraus ergebenden Transportkosten.

Ansätze zur **betrieblichen Standortplanung** behandeln Fragen der Standortwahl für einzelne Produktionsstätten, Handelsfilialen, Lager und Umschlagspunkte unter Berücksichtigung bedeutsamer Kriterien, die als Standortfaktoren bezeichnet werden. Hierunter fällt auch die Standortwahl für öffentliche Einrichtungen wie z.B. Krankenhäuser und Feuerwehrstationen.

Die Standortfaktoren können hinsichtlich der monetären Bewertbarkeit in quantitative und qualitative Standortfaktoren unterteilt werden. Zu den quantitativen Standortfaktoren gehören das Lohnniveau, die anfallenden Transportkosten, die Grundstückspreise, die zu entrichtenden Steuern und Abgaben usw. Qualitative Standortfaktoren sind beispielsweise die Servicefreundlichkeit der Behörden, die Verfügbarkeit qualifizierter Arbeitskräfte oder der Freizeit- und Wohnwert einer Gegend. Räumlich kann die Standortwahl wie folgt abgegrenzt werden (vgl. Vahrenkamp 2003, S. 119 [139]):

- weltweit: in Ländern, Freihandelszonen und Kontinenten,
- landesweit: in Städten und Regionen,
- regional: in sog. Mikrostandorten.

Eine der ersten Arbeiten, die sich mit der betrieblichen Standortplanung beschäftigte, stammt von Launhardt (1882). Er befasste sich vor allem mit dem modelltheoretischen Fall der Standortbestimmung im Dreieck, indem er den transportkostenminimalen Standort zwischen zwei Rohstoffvorkommen und einem Absatzort untersuchte. Weber (1909) verallgemeinerte den quantitativen Ansatz von Launhardt in dem klassischen Werk „Über den Standort von Industrien“. Er bestimmte transportkostenminimale Standorte und Iso-

kostenlinien<sup>2</sup>, wobei jede Isokostenlinie Standorte mit denselben (nichtminimalen) Transportkosten enthielt. Der Einsatz von Isokostenlinien war und ist notwendig für die Suche des kostenminimalen Standortes unter Berücksichtigung der Standortfaktoren. Für die Modelle von beiden sind die Standortfaktoren Transport-, Arbeits- und Materialkosten von besonderer Bedeutung. Die Modelle von Launhardt (1882) und Weber (1909) unterliegen den folgenden Prämissen:

- Transportmöglichkeiten stehen überall zur Verfügung,
- sowohl die Menge als auch die Orte sind für die Produkte und Materialien bekannt,
- steigende Transportkosten proportional zu Entfernung und transportierter Menge,
- Material- und Arbeitskosten sind gegeben,
- jeder Punkt der Fläche ist potentieller Standort für einen oder mehrere Betriebe (für ein oder mehrere Lager).

Zu erwähnen sei an dieser Stelle noch das Werk „Allgemeine Standortbestimmungslehre“ von Behrens (1961).

Von der betrieblichen Standortplanung ist die **innerbetriebliche Standortplanung**, auch **Layoutplanung genannt**, zu unterscheiden. Hierunter versteht man die Planung und räumliche Anordnung von Organisationseinheiten (z.B. Anlagen) und Arbeitssystemen innerhalb der Grenzen des Betriebsgrundstückes, um die größtmögliche Effizienz zu erzielen. Das Resultat ist ein Plan der physischen Anordnung der Anlagen und Arbeitssysteme, der oft auch in der deutschsprachigen Literatur als Layout<sup>3</sup> bezeichnet wird.

Je nach Komplexität und Art der anzuordnenden Organisationseinheiten lassen sich insbesondere in Fertigungsbetrieben viele verschiedene Layoutplanungen differenzieren. Zu nennen sind hier beispielsweise die Anordnung

- der Fertigungs-, Lager-, und Verwaltungssektoren auf dem Betriebsgelände,
- von Werkstätten im Produktionsbereich,
- von Maschinen in Fabrikhallen,
- des Waren sortiments im Vorratslager.

Einzug in die wissenschaftliche Literatur erhielt der Begriff des innerbetrieblichen Standortes durch Hundhausen (1925). Er verfasste eine Reihe von Prinzipien, die bei der Festlegung innerbetrieblicher Standorte berücksichtigt werden sollten. Weitere interessante Prinzipien wurden z.B. von Koopmanns und Beckmann (1957) und von Mellerowicz (1957) hinzugefügt.

---

<sup>2</sup> von Weber als Isodapane bezeichnet

<sup>3</sup> engl. plant layout

Da sowohl im Rahmen der betrieblichen als auch der innerbetrieblichen Standortplanung zwischen deskriptiven und normativen (präskriptiven) Lösungsansätzen unterschieden wird, werden diese kurz erläutert.

Die Aufgabe der **deskriptiven Standortplanung** ist es unter anderem, ein begriffliches Instrumentarium zur allgemeingültigen Beschreibung der Annahmen und Abläufe von Standortentscheidungsprozessen zu entwickeln. Die **normative** oder **präskriptive Standortplanung** befasst sich mit der Entwicklung intersubjektiv nachprüfbarer Kriterien (Modelle, Lösungsverfahren), mit deren Hilfe in einer konkreten Planungssituation eine Standortentscheidung getroffen werden kann. Für weitere Ausführungen über deskriptive und normative Ansätze wird auf die folgenden Werke verwiesen (vgl. Bamberg/Coenenberg 1981 [6], Pfohl/Braun 1981 [99], Dinkelbach 1982 [37] und Domschke/Drexel 1996, S. 6 ff. [38]).

## 8.4 Analyse simultaner Standortplanungsprobleme

In dieser Arbeit stehen die Modelle der betrieblichen Standortplanung im Mittelpunkt der Betrachtung, da diese am besten auf die Problemstellung angewendet werden können. Zu diesem Zweck werden drei Problemtypen der Standortplanung unterschieden:

- Standortplanung in der Ebene,
- Standortplanung in Netzwerken,
- Diskrete Standortplanung.

### 8.4.1 Standortplanung in der Ebene

Bei der Standortbestimmung in der Ebene wird vorausgesetzt, dass alle Punkte einer homogenen Fläche (z.B. Ausschnitt einer Landkarte) als potentielle Standorte für neue Einrichtungen angesehen werden müssen. Die Standorte sind innerhalb der Ebene als Quellen und Senken von Produkten vorgegeben. Des Weiteren sind die Nachfrage und die daraus resultierenden Transportbeziehungen zwischen den Quellen und Senken bekannt. Die Transportkosten sind proportional zur transportierten Menge und zur zurückgelegten Entfernung aber unabhängig von dem zu transportierenden Produkt. Das Maß für die Entfernung zwischen zwei Bezugspunkten wird mit Hilfe der euklidischen Distanz ermittelt. Die dabei verwendete  $l_p$ -Metrik (8.1) für zwei Punkte i und j mit den Koordinaten  $(x_i, y_i)$  und  $(x_j, y_j)$  im  $R^2$  sieht wie folgt aus:

$$(8.1) \quad d_{ij}^p = \sqrt[p]{|x_i - x_j|^p + |y_i - y_j|^p}$$

Der  $l_1$  – Metrik (8.2), auch rechtwinklige Entfernung genannt, kommt im Rahmen der innerbetrieblichen Standortplanung, wie z.B. bei Lagerhallen, deren Bodenplan rechtwinklig ausgelegt ist, besondere Bedeutung zu. Teilweise entspricht sie auch den realen Gegebenheiten der betrieblichen Standortplanung.

$$(8.2) \quad d_{ij}^1 = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

Die  $l_2$  – Metrik (euklidische Entfernung) (8.3) wird z.B. bei der Planung von Energieversorgungsleitungen eingesetzt, da sie in der Lage ist, reale Straßenentfernungen zu approximieren.

$$(8.3) \quad d_{ij}^2 = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2}$$

Im Rahmen der quadrierten euklidischen Entfernung (8.4) kommen die Punkte stärker zum Tragen, die weiter entfernt sind. Ein Beispiel für die Anwendung ist z.B. die Planung von Feuerwehrstationen, da es hierbei nicht nur auf die Summe der gesamten zurückgelegten Entfernungen ankommt, sondern auch auf die maximale Länge einer einzelnen Fahrt.

$$(8.4) \quad (d_{ij}^2)^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$$

Das **Steiner-Weber-Problem**<sup>4</sup> basiert auf der euklidischen Entfernungsmessung (vgl. Vogel 1975, S. 1 ff. [145], Domschke/Drexel 1996, S. 167 ff. [38]) und dient der Ermittlung eines Lager- oder Betriebsstandortes. Dabei muss die Summe der mit der Kundennachfrage gewichteten Entfernungen zu den Kunden minimal sein. Eine Erweiterung dieses Ansatzes wurde von Cooper vorgenommen, um mehrere Standorte, unter Berücksichtigung der Fixkosten für die jeweiligen Standorte, bestimmen zu können (vgl. Hummeltenberg 1981, S. 54 ff. [63]). Bei dem Ansatz von Cooper können ebenfalls Mindestkapazitäten mit einbezogen werden. Einen Überblick über Lösungsverfahren für das Steiner-Weber-Problem gibt El-Shaieb 1978, S. 469-476 [43]. Eine Anwendung der  $l_p$  – Metriken auf Median-, Center- und Mehrstandortprobleme ist ebenfalls möglich (vgl. Nickel 2007, Kapitel 3 S. 10 ff [91]).

Auf eine detaillierte Darstellung der jeweiligen Ansätze kann an dieser Stelle verzichtet werden, da sie zu den einfachsten und unrealistischsten zählen. Deshalb ist eine Anwendung auf die formulierte Problemstellung nur sehr schwer vorstellbar, weil viele Anforderungen aus der Praxis nicht berücksichtigt werden können.

---

<sup>4</sup> auch bekannt als allgemeines Fermat-Problem

### **8.4.2 Standortplanung in Netzwerken**

Während bei der Standortplanung in der Ebene alle Punkte als mögliche Standorte angesehen werden können, wird bei der Standortplanung in Netzwerken die Menge der potentiellen Standorte eingeschränkt. Hierbei geht man von einem ungerichteten Netzwerk aus, das sich aus einer Menge von Knoten (potentielle Standorte) und einer Menge an Verbindungsstrecken, die als Kantenmenge bezeichnet wird, zusammensetzt (vgl. Vahrenkamp 2003, S. 6 ff. [139]). Für die Ermittlung der kürzesten Wege in Netzwerken existieren eine Reihe unterschiedlicher Algorithmen (vgl. Zimmermann 1987, S. 285 ff. [163]). Einer der bekanntesten ist der Dijkstra Algorithmus, der im Jahre 1959 entwickelt wurde. Mit dessen Hilfe ist es möglich, die kürzesten Wege von einem beliebigen Knoten eines bewerteten Netzwerks zu allen anderen Knoten zu bestimmen. Weitere interessante Modelle sind 1-Medianprobleme und 1-Centerprobleme. Im Falle des 1-Medianproblems ist eine neue Einrichtung so auf dem Netzwerk zu platzieren, dass die Summe der gewichteten Entfernungen von dem neuen Standort zu den Knoten minimal wird. Hakimi (1964) entwickelte ein Knotendominanzkriterium, um 1-Medianprobleme zu lösen (vgl. Nickel 2007, Kapitel 4 S. 25 ff. [91]). Bei dem 1-Centerproblem ist eine Einrichtung so auf dem Netzwerk zu platzieren, dass die maximale gewichtete Entfernung zu den Knoten minimal wird. Für eine ausführliche Erläuterung des 1-Centerproblems und der dazugehörigen Lösungsansätze wird auf die folgenden Werke verwiesen (vgl. Hakimi 1964, S. 450-459 [55], Hakimi/Schmeichel/Pierce 1978, S. 1-15 [57], Minieka 1981, S. 351-355 [85]). Abschließend kann festgehalten werden, dass diese Ansätze wesentlich realistischer und praxisnäher sind als die planaren Ansätze.

### **8.4.3 Diskrete Standortplanung**

Die diskrete Standortplanung befasst sich mit der kostenorientierten Allokation ein oder mehrerer neuer Einrichtungen (z.B. Werke und Lager usw.) aus einer vorgegebenen Menge von potentiellen Standorten zur Befriedigung der Kundennachfragen. Diese Standortplanungsmodelle zählen zu den realistischsten und flexibelsten, da man fast alle Vorgaben aus der Praxis implementieren kann. Allerdings werden dadurch sowohl die Modelle als auch die Lösungsmethoden komplexer. Deshalb ist es sehr wichtig, den Aufwand und die daraus resultierende Lösungsgüte für das jeweilige Standortplanungsmodell anzupassen.

Die zu betrachtenden diskreten Standortplanungsmodelle lassen sich wie folgt systematisieren:

- p-Medianprobleme,
- p-Centerprobleme,
- Warehouse Location Probleme.

## Das p-Medianproblem

Beim p-Median-Problem handelt es sich um ein Standortproblem des OR. Hierbei sind  $p$  neue Lagerstandorte zur Befriedigung der Kundennachfrage so zu platzieren, dass die Summe der Transportkosten minimiert wird. Es gilt  $1 < p < n$ , da der Spezialfall für  $p = 1$  schon behandelt wurde. Im Folgenden wird nur der Fall  $p > 1$  näher betrachtet. Es wird eine durch  $p$  beschränkte Anzahl von Lagerhäusern angenommen, um die Errichtungskosten und die laufenden Betriebskosten in Grenzen zu halten. Die Transport- und Betriebskostenverläufe sind gegenläufige Funktionen von  $p$  und neutralisieren sich. Die mittlere Entfernung zu den Kunden wird durch die Errichtung eines zusätzlichen Lagerstandortes verringert. Dadurch sinken die Transportkosten mit jedem neu errichteten Lagerhaus, während die Summe der Betriebskosten steigt. Löst man das p-Median-Problem für verschiedene Zahlen  $p$ , so kann die Summe der Transport- und Betriebskosten minimiert werden. Die Auswahl der  $p$  Lagerstandorte sowie die Zuordnung der Kunden zu den Lagern erfolgt simultan. Anknüpfend an die vorherigen Erläuterungen wird nun ein p-Medianproblem als ein Gesamtkostenmodell formuliert. In der Zielfunktion steht  $c_{ki}$  für die Kosten, die durch den Transport einer bestimmten Produktmenge von Lagerhaus  $k$  zum Kunden  $i$  verursacht werden. Die Binärvariable  $x_{ki}$  zeigt an, ob der Kunde  $i$  an Lager  $k$  angeschlossen ist ( $x_{ki} = 1$ ) oder nicht ( $x_{ki} = 0$ ). Da jeder Outletstandort auch ein potentieller Lagerstandort ist, wird sowohl  $k$  als auch  $i$  bis  $n$  aufsummiert. Die Fixkosten  $F_k$  können zum einen als monatliche Betriebskosten oder als einmalige fixe Errichtungskosten für die Lagerhäuser angesehen werden. Mit  $y_k$  wird zum Ausdruck gebracht, ob am potentiellen Standort  $k$  ein Lager errichtet wird ( $y_k = 1$ ) oder nicht ( $y_k = 0$ ). Das Modell sieht dann wie folgt aus (vgl. Vahrenkamp 2003, S. 141 [139]):

### Zielfunktion

$$\min! \sum_{k,i} c_{ki} * x_{ki} + \sum_k F_k * y_k$$

### unter den Nebenbedingungen

$$(8.5) \quad \sum_{k=1}^n y_k \leq p$$

$$(8.6) \quad \sum_{k=1}^n x_{ki} = 1, \quad i = 1 \dots n$$

$$(8.7) \quad y_k \geq x_{ki}, \quad k, i = 1 \dots n$$

$$(8.8) \quad y_k \in \{0, 1\}, \quad k = 1 \dots n$$

$$(8.9) \quad x_{ki} \in \{0, 1\}, \quad k, i = 1 \dots n$$

In der Nebenbedingung (8.1) wird festgelegt, wie viele Lagerstandorte  $p$  ausgewählt werden müssen. Die Nebenbedingungen unter Punkt (8.2) stellen sicher, dass jeder Kunde genau einem Lager zugeordnet wird. Dadurch wird ebenfalls ausgeschlossen, dass kein Lagerstandort gewählt und somit ein Kostenminimum von null als optimale Lösung ausgewiesen wird. Aus den Nebenbedingungen (8.3) geht hervor, dass die Kunden  $i$  nur Lagern zugeordnet werden können, die auch errichtet wurden, d.h. wenn  $y_k = 1$ . Die Definition der beiden Binärvariablen  $y_k$  und  $x_{ki}$  wird in den Nebenbedingungen (8.4) und (8.5) vorgenommen. Bei dieser Formulierung des  $p$ -Median-Problems wird deutlich, dass es das unkapazitierte Warehouse-Location-Problem für den Spezialfall  $p = n$  enthält. Eine geringe Abweichung im Bereich der Nebenbedingungen muss noch näher erläutert werden. Die Nebenbedingung (8.1) kann entfallen, da sie für den Fall  $p = n$  sowieso erfüllt ist. Weitere Ausprägungen des  $p$ -Medianproblems oder des unkapazitierten Warehouse-Location-Problems werden an dieser Stelle nicht untersucht, da sie den Anforderungen des Modells nicht Rechnung tragen können. Neben Hakimi (vgl. Hakimi 1964, S. 450-459 [55]; Hakimi 1965, S. 462-475 [56]) werden in der Literatur weitere interessante Werke, die sich mit Median-Problemen und deren Lösung befassen, aufgeführt (vgl. Levy 1967, S. 433-442 [66], Bloech 1970 [22], Goldman 1971, S. 212-221 [52], Christofides 1975 [31], Matula/Kolde 1976 [83], Handler/Mirchandani 1979 [58], Domschke/Drexel 1996, S. 41 ff. [38], Vahrenkamp 2003, S. 142 ff. [139]).

### **Das $p$ -Centerproblem**

Bei dem  $p$ -Centerproblem geht es darum, Standorte für zentrale Einrichtungen wie Feuerwachen oder Depots für Rettungsfahrzeuge zu bestimmen. In solchen Fällen wird nicht die Summe der entstehenden Kosten minimiert, sondern ein Standort ist so einzurichten, dass die maximale Entfernung eines Kunden zu einer Einrichtung minimal wird. An dieser Stelle ist es nicht notwendig, näher auf das  $p$ -Centerproblem einzugehen, da es in der Regel weniger für die Planung von Industriestandorten verwendet wird.

### **Das Warehouse-Location-Problem**

Im Allgemeinen basiert das Warehouse-Location-Problem (WLP) auf einer simultanen Standort- und Transportoptimierung. Hierbei werden in der Regel sowohl die variablen Transportkosten als auch die fixen Errichtungskosten berücksichtigt. Da die WLPs hinsichtlich Komplexität stark differieren können, ist es sinnvoll, diese zu systematisieren. Die wohl einfachste Ausprägung des WLP ist das unkapazitierte einstufige WLP. Bei diesem Ansatz ist festzulegen, von welchen potentiellen Standorten (z.B. Lager) die vorgegebene regionalisierte Kundennachfrage befriedigt werden kann. Hierbei gilt es, die Standorte und die daraus resultierenden Transportmengen auf den gegebenen Strecken festzulegen. Es wird ebenfalls angenommen, dass die standortabhängigen Fixkosten und die variablen Transportkosten bekannt sind. Da bei diesen Modellen keine Kapazitäten berücksichtigt werden, sind diese doch sehr realitätsfern, deshalb werden in dieser Arbeit

nur die kapazitierten WLPs genauer betrachtet.

### **Das einstufige kapazitierte Warehouse-Location-Problem**

Das einstufige kapazitierte WLP unterscheidet sich im Allgemeinen vom unkapazitierten nur durch die Beschränkung der Lagerkapazitäten an den potentiellen Errichtungsstandorten. Bei diesem Ansatz werden optimale Standorte festgelegt, an denen der Hersteller seine Lager zu errichten hat, um die Kunden kostenminimal versorgen zu können. Hierbei gilt es analog zum unkapazitierten WLP die Summe der variablen Transportkosten und der standortabhängigen Fixkosten  $F_k$  zu minimieren. Die Kosten, die beim Transport der Produkte vom Hersteller  $k$  zum Kunden  $i$  anfallen, werden als  $c_{ki}$  bezeichnet. Die Variable  $x_{ki}$  repräsentiert die Menge, die vom Hersteller  $k$  zum Kunden  $i$  transportiert wird. Die Höchstmengen der jeweiligen Kundennachfrage ( $b_i$ ) und die Angebotsmengen ( $a_k$ ) der Hersteller sind vorgegeben und stellen somit die Kapazitätsbeschränkungen dar. Während im klassischen Transportmodell das gesamte Angebot mit der gesamten Nachfrage übereinstimmt,  $\sum a_k = \sum b_i$ , geht man beim kapazitierten WLP davon aus, dass das aggregierte Angebot deutlich über der aggregierten Nachfrage liegt,  $\sum a_k \gg \sum b_i$ , da es um eine Auswahl von Lieferstandorten geht. Durch den Einbezug von binären Entscheidungsvariablen  $y_k$  lässt sich das kapazitierte Warehouse-Location-Modell als ein gemischt ganzzahliges Optimierungsproblem formulieren. Die Binärvariable  $y_k$  nimmt den Wert 1 an, wenn Standort  $k$  als Lagerstandort festgelegt wird, und sonst 0. Das einstufige kapazitierte WLP sieht dann wie folgt aus (vgl. Vahrenkamp 2003, S. 158 ff. [139]):

#### **Zielfunktion**

$$\min ! \sum_{k=1}^{n_1} \sum_{i=1}^{n_2} c_{ki} * x_{ki} + \sum_{k=1}^{n_1} F_k * y_k$$

#### **unter den Nebenbedingungen**

$$(8.10) \sum_{k=1}^{n_1} x_{ki} = b_i, \quad i = 1 \dots n_2$$

$$(8.11) \sum_{i=1}^{n_2} x_{ki} \leq a_k, \quad k = 1 \dots n_1$$

$$(8.12) \quad x_{ki} \leq \min(a_k, b_i) y_k, \quad k = 1 \dots n_1, i = 1 \dots n_2$$

$$(8.13) \quad x_{ki} \geq 0, \quad k = 1 \dots n_1, i = 1 \dots n_2$$

$$(8.14) \quad y_k \in \{0, 1\}, \quad k = 1 \dots n_1$$

Die Nebenbedingung (8.10) stellt sicher, dass die gesamte Nachfrage jedes Kunden  $i$  befriedigt wird. Hierbei wird eine Gleichgewichtsbedingung eingesetzt, die gewährleistet, dass der gesamte Warenfluss von Hersteller  $k$  zum Kunden  $i$   $x_{ki}$  der gesamten Kundennachfrage  $b_i$  entspricht. In der Nebenbedingung (8.11) werden die Kapazitätsbeschränkungen der jeweiligen Lagerstandorte dargestellt, die dafür sorgen, dass die Liefermengen nicht das Angebot des Standortes  $k$  übersteigt. Mit der Nebenbedingung (8.12) wird erreicht, dass die Liefermengen vom einem Standort null sind, wenn dieser nicht eröffnet wird. In Restriktion (8.13) werden die Nichtnegativitätsbedingungen beschrieben, die gewährleisten, dass keine negativen Produktflüsse zwischen den Herstellern und den Kunden auftreten. In der letzten Nebenbedingung (8.14) werden die binären Entscheidungsvariablen  $Y_k$  deklariert. Weitere Ansätze des einstufigen WLP werden an dieser Stelle nicht untersucht, da es sich bei der in dieser Arbeit behandelten Problemstellung um ein mehrstufiges Problem handelt. Um einstufige kapazitierte WLPs lösen zu können, wurden heuristische Verfahren (vgl. Hochbaum 1982, S. 148-162 [60], Jacobsen 1983, S. 253-261 [67], Hosage/Goodchild 1986, S. 35-46 [62], Sridharan 1991, S. 579-585 [125]) und exakte Verfahren (vgl. Hummeltenberg 1981 [63], Baker 1986, S. 48-56 [5], Beasley 1988, S. 314-325 [8], Boffey 1989, S. 347-354 [25], Schildt 1994 [112]) entwickelt.

### **Das mehrstufige kapazitierte Warehouse-Location-Problem**

Die mehrstufigen Ansätze unterscheiden sich von den einstufigen dadurch, dass mindestens zwei Transportstufen zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus werden die optimalen Standorte für ein oder mehrere Einrichtungstypen, wie z.B. Werke, Lager und Aufbereitungsanlagen, gesucht. Bei dem zu betrachtenden zweistufigen WLP wird das oben beschriebene einstufige Modell um eine Standortentscheidung bezüglich der Werke und der dazugehörigen Produktflüsse erweitert. Es gilt die Kundennachfrage  $b_1, \dots, b_n$  durch  $k$  Werke eines Unternehmens mit einer Kapazität von  $a_1^w, \dots, a_k^w$  ME pro Periode zu befriedigen. Die Zielsetzung des Unternehmens ist die Minimierung der Vertriebskosten, indem Auslieferungslager eingerichtet werden. Hierfür stehen  $m$  potentielle Standorte zur Auswahl. Die Kapazität eines Lagerstandortes  $i$  beträgt maximal  $a_i^l$  ME und die fixen Lagerhaltungskosten belaufen sich auf  $f_i$  GE. Die Kapazität eines Lagers stellt diejenige Gütermenge dar, die über das Lager pro Periode maximal ausgeliefert werden kann. Um die Warenflüsse eines mehrstufigen WLPs zu beschreiben, werden zweidimensionale Flussvariablen benötigt. Der Produktfluss vom Werk  $h$  zu einem potentiellen Lagerstandort  $i$  wird durch  $\tilde{x}_{hi}$  ausgedrückt. Für den Warenfluss von Lager  $i$  zum Kunden  $j$  führt man die Flussvariable  $x_{ij}$  ein. Die Transportkosten vom Werk  $h$  zum Lagerstandort  $i$  werden mit Hilfe der Variable  $\tilde{c}_{hi}$  definiert, wohingegen die Kosten, die bei der Belieferung des Nachfragers  $j$  durch ein potielles Lager anfallen, durch die Variable  $c_{ij}$  abgebildet werden. Im Folgenden gemischt-binären Warehouse-Location-Problem werden Direkttransporte vom Werk zum Kunden ausgeschlossen und die Gesamtkapazität der Werke mit der Gesamtnachfrage der Kunden gleichgesetzt (in Anlehnung an Domsch-

ke/Drexel 1996, S. 58 ff. [38]).

### Zielfunktion

$$\min! \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^m \tilde{c}_{hi} * \tilde{x}_{hi} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} * x_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i * y_i$$

### unter den Nebenbedingungen

$$(8.15) \quad \sum_{i=1}^m \tilde{x}_{hi} \leq a_h^w, \quad h = 1 \dots k$$

$$(8.16) \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i^l * y_i, \quad i = 1 \dots m$$

$$(8.17) \quad \sum_{h=1}^k \tilde{x}_{hi} - \sum_{j=1}^n x_{ij} = 0, \quad i = 1 \dots m$$

$$(8.18) \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1 \dots n$$

$$(8.19) \quad \tilde{x}_{hi} \geq 0, \quad h = 1 \dots k, i = 1 \dots m$$

$$(8.20) \quad x_{ij} \geq 0, \quad i = 1 \dots m, j = 1 \dots n$$

$$(8.21) \quad y_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1 \dots m$$

Die Nebenbedingungen (8.15) und (8.16) stellen Kapazitätsbeschränkungen der jeweiligen Fabrik- bzw. Lagerstandorte dar und gewährleisten, dass die Summe aller Warenflüsse das Angebot der einzelnen Standorte nicht übersteigt. In der Nebenbedingung (8.17) wird angenommen, dass sich die Lagerzugänge und -abgänge im Laufe einer Periode ausgleichen. Die vollständige Befriedigung der Kundennachfrage wird mit Nebenbedingung (8.18) sichergestellt. Bei den Nebenbedingungen (8.19) und (8.20) handelt es sich um sogenannte Nichtnegativitätsbedingungen, d.h. negative Produktflüsse werden ausgeschlossen. In der letzten Nebenbedingung (8.21) werden die binären Entscheidungsvariablen  $y_i$  definiert, die anzeigen, ob am Standort  $i$  ein Lager errichtet wird  $y_i = 1$  oder nicht  $y_i = 0$ . Für weitere interessante Ansätze und Lösungsmethoden wird auf Vahrenkamp 2003, S. 158 ff. [139] und Domschke/Drexel 1996, S. 60 ff. [38] verwiesen.

## 8.5 Bewertung der Ansätze

Unter den vorgestellten Ansätzen zur Standortplanung und Standortoptimierung sind diejenigen auszuwählen, die bezüglich einer Erweiterung für die Planung von Reverse-Logistik-Netzwerken auf der Basis der Problemstrukturanalyse in Abschnitt 8.1 in Frage kommen. Zu diesem Zweck werden die Zielkriterien, Modellanforderung und Modellabgrenzungen aus Abschnitt 8.2 mit den Optionen der diskutierten Ansätze abgeglichen.

Die Modellansätze zur Standortbestimmung in der Ebene sind für die Lösung von Reverse-Logistik-Netzwerkproblemen nicht geeignet, da die Annahme, dass alle Punkte einer homogenen Fläche potentielle Standorte für neue Einrichtungen darstellen, sehr realitätsfern ist. Hierdurch werden neben potentiellen Standorten auch unbebaubare Flächen, wie z.B. Flüsse, Seen, Naturschutzgebiete und bereits bebaute Wohn- und Industriegebiete als Standorte für neue Einrichtungen zugelassen. Die Berücksichtigung von standortabhängigen Fixkosten und variablen Transportkosten für vorwärts und rückwärts gerichtete Warenflüsse ist ebenfalls im Standardmodell nicht möglich.

Die in Abschnitt 8.4.2 diskutierten Ansätze zur Standortplanung in Netzwerken sind wesentlich realistischer. In der Regel wird aber nur ein Einrichtungstyp, wie z.B. Lager in einem Knoten oder entlang der Kante platziert. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Flexibilität, die bei der Anwendung klassischer Netzwerkalgorithmen bezüglich der Berücksichtigung von knoten- und kantenabhängigen Fixkosten sowie von Mehrgüterflüssen mit unterschiedlicher Ausrichtung nachlässt. Der Modifizierungsaufwand wäre also exorbitant. Deshalb kann festgehalten werden, dass die Modelle nicht geeignet sind, um die in Abschnitt 8.2 aufgeführte Problemstellung zu formulieren.

Die Ansätze der diskreten Standortwahl sind die flexibelsten und realistischsten, da alle Anforderungen, Restriktionen und Vorgaben aus der Praxis fast uneingeschränkt implementiert werden können. Fixe Errichtungskosten für potentielle Standorte und variable Transportkosten sind in fast allen Modellklassen bereits integriert. Die Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen für die unterschiedlichen Standorteinrichtungen ist möglich und in der Regel vorgesehen. Des Weiteren können mehrstufige Transportvorgänge innerhalb einer Supply Chain abgebildet werden. Da die meisten Modellansätze als MILP<sup>5</sup> formuliert werden, stellt dies vordergründig eine Einschränkung bezüglich der Restriktionen dar. Für die oben beschriebene Problematik reicht es allerdings aus, lineare Restriktionen zu verwenden, weil sie die Beziehungen zwischen den jeweiligen Standorten gut abbilden.

Die Modellanforderung, dass die potentiellen Standorte vorgegeben sind, stellt eine weitere Einschränkung des Modells dar. Empirische Untersuchungen haben ergeben, dass viele

---

<sup>5</sup> Mixed Integer Linear Programming

Firmen der Armaturenbranche oft konkrete Vorstellungen haben, an welchen Standorten eventuell eine neue Einrichtung zur Fertigung oder Aufarbeitung errichtet werden soll. Aufgrund dieser Tatsache ist es sinnvoll, die potentiellen Standorte vorzugeben und somit stellt diese Einschränkung keine zu starke Eingrenzung des Modells gegenüber der Realität dar. Bei den klassischen Modellansätzen werden rückwärts gerichtete Warenflüsse nicht berücksichtigt, deshalb sind diese entweder nachträglich im Rahmen einer Erweiterung zu implementieren oder es müssen bereits vorhandene Modellierungen von CLSCs so angepasst werden, dass sie auf die in Abschnitt 8.2 vorgestellte Problemstellung anwendbar sind.

## **8.6 Entwicklung eines Ansatzes zur Standortplanung von Reverse-Logistik-Netzwerken**

In diesem Abschnitt werden nach einer kurzen Literaturübersicht die generellen und die modellbezogenen Ziele der Arbeit kurz wiederholt. Im Anschluss wird ein Modellansatz entwickelt, der die Problemstellung der Armaturenbranche abbildet.

### **8.6.1 Literaturübersicht**

Die meisten quantitativen Modellansätze für Probleme im Bereich des Reverse-Logistik-Netzwerkdesigns basieren auf MILP (Mixed Integer Linear Programming). Hierbei wird differenziert zwischen Modellen, die das gesamte Netzwerk umfassen und denjenigen, die sich ausschließlich auf den rückwärts gerichteten Teil beschränken. Des Weiteren wird unterschieden, ob die Versorgung mit gebrauchten Produkten als Push- oder Pull-Prozess gestaltet wurde, d.h. ob es ein vorgegebenes Einsammelvolumen (Push-Strategie) gibt oder ob diese primär von der Nachfrage (Pull-Strategie) abhängt. Die Literaturübersicht in Tabelle 8.1 zeigt, dass der Schwerpunkt auf der Betrachtung des gesamten Netzwerks liegt und der Rückfluss von gebrauchten Produkten als Push-Strategie behandelt wird (vgl. Dekker/Fleischmann/Inderfurth/Van Wassenhove 2004, S. 71 [34]).

Zunächst werden die Ansätze betrachtet, die sich ausschließlich mit dem Warenrückfluss beschäftigen. Das Modell von Berger und Debaille (1997) [11] berücksichtigt Standortentscheidungen und behandelt das Entsorgungsvolumen wie eine untere Schranke, d.h. es existieren immer Mindestmengen, die es zu entsorgen gilt. Ein ähnlicher Ansatz wird von Krikke/van Harten/Schnur [72] im Rahmen einer Fallstudie über die Wiederaufbereitung von Kopiergeräten analysiert.

Im Folgenden werden die Modellansätze aus Tabelle 8.1, die sowohl vorwärts als auch rückwärts gerichtete Warenflüsse berücksichtigen, erläutert. Das Modell von Kroon und

**Tabelle 8.1:** Reverse-Logistik-Standortplanungsmodelle

	supply push	supply pull
gesamtes Netzwerk	Kroon Vrijens (1995) Thierry (1997) Spengeler et al. (1997) Barros et al. (1998) Marin and Pelegrin (1998) Fleischmann et al. (2001)	Realff et al. (1999) Jayaraman et al. (1999)
rückwärts gerichtetes Netzwerk	Berger and Debaillie (1997)	Krikke et al. (1999)

Vrijens (1995) [74] entspricht im Wesentlichen einem unkapazitierten WLP mit horizontalen Umschlagplätzen und wird angewendet auf die Wiederverwertungsproblematik bei Verpackungen. In dem Werk von Marin und Pelegrin (1998) [81] wird ein Sonderfall des WLPs behandelt, wobei das Angebot der Kunden an zu entsorgenden Produkten immer einem fixen Anteil ihrer Nachfrage entspricht. Die Autoren Jayaraman/Guide/Srivastava entwickelten eine Mehrproduktvariante des Modells von Marin und Pelegrin mit vorgegebenem Angebots- und Nachfragevolumen. Thierry (1997) [137] hat ein lineares Modell mit festgelegten Standorten programmiert, das im Wesentlichen der Struktur in Abbildung 3.5 entspricht. Die anfallende Schrottmenge im Bereich der Test- und Sortieranlagen hängt von der Menge der zu prüfenden Produkte ab, ist aber z.B. prozentual fixiert. Das Modell von Fleischmann/Beullens/Bloemhof-Ruuward/Van Wassenhove [49] erweitert den Ansatz von Thierry, so dass Standortentscheidungen möglich sind. Hierzu werden potentielle Standorte für Fertigungsanlagen, Lager und Test-/Sortieranlagen vorgegeben. Das von Barros/Dekker/Scholten (1998) [7] dargestellte Modell liefert eine Alternative zur betriebsfremden Abfallverwertung. Es ermöglicht Produkte oder Materialien, die während der Testphase aufgrund von Mängeln aussortiert wurden, einem Rohstoffrückgewinnungsprozess zuzuführen. Die Autoren Spengler und andere (1997) [121] und Realff und andere (1999) [105] modifizierten den Ansatz von Barros so, dass Mehrproduktflüsse abgebildet werden können. Neben den in Tabelle 8.1 aufgeführten Werken existieren noch einige sehr interessante Modellansätze zur Planung von Reverse-Logistik Netzwerken (vgl. Dekker/Fleischmann/Inderfurth/Van Wassenhove 2004, S. 73 [34], Spengler/Schröter 2005, S. 1-30 [122], Fandel/Rudolph 2005, S. 31-58 [47], Tuoma/Lebreton 2005, S. 59-75 [138]).

Da die oben aufgeführten Ansätze zur Optimierung und Planung von Reverse-Logistik-Netzwerken dem Anforderungsprofil nur teilweise entsprechen, ist das Ziel der Arbeit die Entwicklung einer Methodik zur strategischen Planung eines Reverse-Logistik-Netzwerks, insbesondere für die Armaturenaufarbeitung und Armaturenfertigung unter Zugrundele-

gung der bestehenden und zukünftigen rechtlichen Rahmenbedingungen. Die aus der Anwendung des Modells resultierenden Ergebnisse sollen eine Entscheidungsunterstützung für die Unternehmen der Armaturenbranche hinsichtlich der Standortplanung und der zukünftigen rechtlichen Anforderungen darstellen. In Hinblick auf die Entwicklung eines Ansatzes zur Standortplanung von Reverse-Logistik-Netzwerken mit den Teilaufgaben der vorwärts- und rückwärtsgerichteten Logistik bieten die WLP vielseitige und vielversprechende Einsatzmöglichkeiten. Da die meisten Reverse-Logistik-Standortplanungsmodelle auf dem herkömmlichen WLP basieren, ist es sinnvoll, im weiteren Verlauf der Arbeit auf der Basis eines mehrstufigen kapazitierten WLPs einen Ansatz zu entwickeln, so dass die diskutierten Problemstellungen hinreichend gut abgebildet werden können.

### 8.6.2 Entwicklung eines Rerverse-Logistik-Standortplanungsmodells für die Industriearmaturenbranche

Bei dem Reverse-Logistik-Standortplanungsmodell wird der Ansatz des mehrstufigen kapazitierten WLPs um Aufarbeitungseinrichtungen erweitert. Die daraus resultierende Netzwerkstruktur wird in Abbildung 8.1 vereinfacht dargestellt. Im Rahmen der fol-

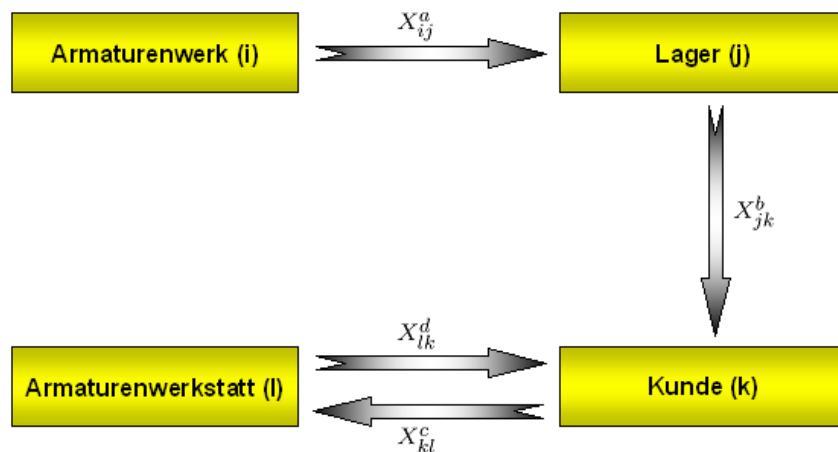


Abbildung 8.1: Netzwerkstruktur für die Armaturenbranche

genden mathematischen Formulierung des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems wird u.a. näher auf die Flussvariablen aus Abbildung 8.1 eingegangen:

#### Indizes:

- $\mathcal{I}$  Menge der potentiellen Standorte  $i$  für Armaturenwerke
- $\mathcal{J}$  Menge der potentiellen Standorte  $j$  für Lager

$\mathcal{K}$  Menge der Kundenstandorte  $k$

$\mathcal{L}$  Menge der potentiellen Standorte für  $l$  Armaturenwerkstätten

### Variablen:

$Y_i^a$  Binärvariable, die anzeigt, ob am Standort  $i$  ein Armaturenwerk errichtet wird

$Y_j^b$  Binärvariable, die anzeigt, ob am Standort  $j$  ein Lager errichtet wird

$Y_l^c$  Binärvariable, die anzeigt, ob am Standort  $l$  eine Armaturenwerkstatt errichtet wird

$E_i^a$  Binärvariable, die anzeigt, ob die Kapazität eines Armaturenwerks  $i$  erweitert wird

$E_j^b$  Binärvariable, die anzeigt, ob die Kapazität eines Lagers  $j$  erweitert wird

$E_l^c$  Binärvariable, die anzeigt, ob die Kapazität einer Armaturenwerkstatt  $l$  erweitert wird

$X_{ij}^a$  Transportmenge von Armaturenwerk  $i$  zu Lager  $j$  (neue Industriearmaturen)

$X_{jk}^b$  Transportmenge von Lager  $j$  zu Kunde  $k$  (neue Industriearmaturen)

$X_{kl}^c$  Transportmenge von Kunde  $k$  zu Armaturenwerkstatt  $l$  (gebrauchte Industriearmaturen)

$X_{lk}^d$  Transportmenge von Armaturenwerkstatt  $l$  zu Kunde  $k$  (aufbereitete Industriearmaturen)

### Kosten:

$FH_i$  Fixkosten für die Errichtung eines Armaturenwerks  $i \in \mathcal{I}$

$FL_j$  Fixkosten für die Errichtung eines Lagers  $j \in \mathcal{J}$

$FA_l$  Fixkosten für die Errichtung einer Armaturenwerkstatt  $l \in \mathcal{L}$

$FEH_i$  Fixkosten für die Kapazitätserweiterung eines Armaturenwerks  $i \in \mathcal{I}$

$FEL_j$  Fixkosten für die Kapazitätserweiterung eines Lagers  $j \in \mathcal{J}$

$FEA_l$  Fixkosten für die Kapazitätserweiterung einer Armaturenwerkstatt  $l \in \mathcal{L}$

$KH_i$  Maximalkapazität des Armaturenwerks  $i \in \mathcal{I}$

$KL_j$  Maximalkapazität des Lagers  $j \in \mathcal{J}$

$KA_l$  Maximalkapazität der Armaturenwerkstatt  $l \in \mathcal{L}$

$KEH_i$  Kapazitätserweiterung des Armaturenwerks  $i \in \mathcal{I}$

$KEL_j$  Kapazitätserweiterung des Lagers  $j \in \mathcal{J}$

$KEA_l$  Kapazitätserweiterung der Armaturenwerkstatt  $l \in \mathcal{L}$

$TK_{ij}^a$	Transportkosten pro t und km von Armaturenwerk $i$ zu Lager $j$
$TK_{jk}^b$	Transportkosten pro t und km von Lager $j$ zu Kunde $k$
$TK_{kl}^c$	Transportkosten pro t und km von Kunde $k$ zu Armaturenwerkstatt $l$
$TK_{lk}^d$	Transportkosten pro t und km von Armaturenwerkstatt $l$ zu Kunde $k$

#### Parameter:

$KN_k$	Kundennachfrage $k \in \mathcal{K}$ in Produkteinheiten
$R$	durchschnittliche prozentuale Rückflussquote
$W$	durchschnittliche prozentuale Wiederaufbereitungsrate
$UK$	Lager- und Umschlagskosten in € pro Produkteinheit
$UMNP$	variable Kosten der Armaturenwerke in % vom Umsatz
$UMAP$	variable Kosten der Armaturenwerkstätten in % vom Umsatz
$NP$	durchschnittlicher Neupreis von Industriearmaturen
$AP$	durchschnittlicher Aufarbeitungspreis von Industriearmaturen

#### Mathematische Formulierung des Modells

#### Zielfunktion:

$$\begin{aligned}
Min \quad & \sum_{i \in \mathcal{I}} FH_i * Y_i^a + \sum_{j \in \mathcal{J}} FL_j * Y_j^b + \sum_{l \in \mathcal{L}} FA_l * Y_l^c \\
& + \sum_{i \in \mathcal{I}} FEH_i * E_i^a + \sum_{j \in \mathcal{J}} FEL_j * E_j^b + \sum_{l \in \mathcal{L}} FEA_l * E_l^c \\
& + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} TK_{ij}^a * X_{ij}^a + \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{k \in \mathcal{K}} TK_{jk}^b * X_{jk}^b \\
& + \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{l \in \mathcal{L}} TK_{kl}^c * X_{kl}^c + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}} TK_{lk}^d * X_{lk}^d \\
& + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} UMNP * NP * X_{ij}^a + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}} UMAP * AP * X_{lk}^d \\
& + \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{k \in \mathcal{K}} UK * X_{jk}^b - \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}} (NP - AP) * X_{lk}^d
\end{aligned}$$

Die Zielfunktion, die es zu minimieren gilt, basiert auf den in Abschnitt 8.2 festgelegten

Anforderungen und Abgrenzungen. Im Folgenden wird die Zielfunktion in fünf Kostenblöcke unterteilt und diese näher erläutert.

Der erste Kostenblock setzt sich aus den gesamten fixen Errichtungs- und Erweiterungskosten für die Armaturenwerke, Lager und Armaturenwerkstätten zusammen. Dazu zählen u.a. die Kosten für Grundstück, Gebäude und Maschinen. Die Kosten für die Errichtung oder Erweiterung eines potentiellen Standortes fallen nur an, wenn an einem Standort eine Einrichtung gebaut ( $Y_i^a, Y_j^b$  und  $Y_l^c$  nehmen den Wert 1 an) oder erweitert ( $E_i^a, E_j^b$  und  $E_l^c$  nehmen den Wert 1 an) wird.

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} FH_i * Y_i^a + \sum_{j \in \mathcal{J}} FL_j * Y_j^b + \sum_{l \in \mathcal{L}} FA_l * Y_l^c \\ & + \sum_{i \in \mathcal{I}} FEH_i * E_i^a + \sum_{j \in \mathcal{J}} FEL_j * E_j^b + \sum_{l \in \mathcal{L}} FEA_l * E_l^c \end{aligned}$$

Dieser Teil der Zielfunktion beschreibt die variablen Transportkosten. Bei  $X_{ij}^a$  und  $X_{jk}^b$  handelt es sich um vorwärts gerichtete Produktflüsse, vom Armaturenwerk  $i$  zum Lager  $j$  und vom Lager  $j$  zum Kunden  $k$ , bewertet mit den Transportkostensätzen  $TK_{ij}^a$  und  $TK_{jk}^b$ . Die Produktflüsse  $X_{kl}^c$  bewertet mit  $TK_{kl}^c$  stellen die Menge der gebrauchten Industriearmaturen, die vom Kunden  $k$  zur Armaturenwerkstatt  $l$  transportiert werden, dar. Die Flussvariable  $X_{lk}^d$  bildet die Rückflüsse der aufgearbeiteten Armaturen von der Armaturenwerkstatt  $l$  zum Kunden  $k$  ab, wobei  $TK_{lk}^d$  die Transportkosten darstellt.

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} TK_{ij}^a * X_{ij}^a + \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{k \in \mathcal{K}} TK_{jk}^b * X_{jk}^b \\ & + \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{l \in \mathcal{L}} TK_{kl}^c * X_{kl}^c + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}} TK_{lk}^d * X_{lk}^d \end{aligned}$$

Die variablen Betriebskosten der Armaturenwerke, Lager und Armaturenwerkstätten werden in dem dritten Kostenblock berücksichtigt. Die Auswertung der empirischen Untersuchungen hat ergeben, dass sich die variablen Kosten der Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter durch einen festgelegten Prozentsatz (*UMNP* und *UMAP*) vom Umsatz ermitteln lassen. Lager- und Umschlagkostensätze (*UK*) wurden aus dem Programm EURONETZ, strategische Standortplanung für KEP-Dienste und die europaweite Distribution von Konsumgütern und Ersatzteilen (vgl. Vahrenkamp 2005), übernommen.

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} UMAP * AP * X_{ij}^a + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}} UMAP * AP * X_{lk}^d \\
+ & \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{k \in \mathcal{K}} UK * X_{jk}^b
\end{aligned}$$

Der letzte Term der Zielfunktion stellt den Erlös, der aus der Differenz zwischen Neupreis  $NP$  und Aufarbeitungspreis  $AP$  multipliziert mit der Anzahl der aufgearbeiteten Industriarmaturen  $X_{lk}^d$  resultiert, dar. Die Erlöse, die mit der Verschrottung von nicht mehr aufzuarbeitenden Armaturen erzielt werden, sind im Rahmen des Aufarbeitungspreises  $AP$  berücksichtigt. Der Term ist mit einem Minuszeichen versehen, da es sich nicht um Kosten handelt. Die Höhe des Erlöses (Ersparnis) ist abhängig von der Nennweite, dem Material und der Industriarmaturenart. Die Einsparung kann zwischen 30 % und 70 % des Neupreises betragen.

$$- \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}} (NP - AP) * X_{lk}^d$$

### **unter den Nebenbedingungen**

$$(8.22) \quad \sum_{j \in \mathcal{J}} X_{jk}^b + \sum_{l \in \mathcal{L}} X_{lk}^d = KN_k \quad \forall k \in \mathcal{K}$$

$$(8.23) \quad \sum_{i \in \mathcal{I}} X_{ij}^a = \sum_{k \in \mathcal{K}} X_{jk}^b \quad \forall j \in \mathcal{J}$$

$$(8.24) \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} X_{kl}^c = R * KN_k \quad \forall k \in \mathcal{K}$$

$$(8.25) \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} X_{lk}^d = W * R * KN_k \quad \forall k \in \mathcal{K}$$

$$(8.26) \quad \sum_{j \in \mathcal{J}} X_{ij}^a \leq KH_i * Y_i^a + KEH_i * E_i^a \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$(8.27) \quad \sum_{i \in \mathcal{I}} X_{ij}^a \leq KL_j * Y_j^b + KEL_j * E_j^b \quad \forall j \in \mathcal{J}$$

$$(8.28) \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} X_{kl}^c \leq KA_l * Y_l^c + KEA_l * E_l^c \quad \forall l \in \mathcal{L}$$

$$(8.29) \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} X_{lk}^d \leq KA_l * Y_l^c + KEA_l * E_l^c \quad \forall l \in \mathcal{L}$$

$$(8.30) \quad E_i^a \leq Y_i^a \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$(8.31) \quad E_j^b \leq Y_j^b \quad \forall j \in \mathcal{J}$$

$$(8.32) \quad E_l^c \leq Y_l^c \quad \forall l \in \mathcal{L}$$

$$(8.33) \quad Y_i^a, Y_j^b, Y_l^c, E_i^a, E_j^b, E_l^c \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J}, \forall l \in \mathcal{L}$$

$$(8.34) \quad X_{ij}^a, X_{jk}^b, X_{kl}^c, X_{lk}^d \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall l \in \mathcal{L}$$

Nach der ausführlichen Erläuterung der Zielfunktion werden nun die Nebenbedingungen thematisiert. Aus der Nebenbedingung (8.22) geht hervor, dass die gesamte Nachfrage jedes Kunden  $k$  durch neue und aufgearbeitete Industriearmaturen befriedigt werden kann, d.h. es existieren keine Qualitätsunterschiede. Die zu verschrottenden Altarmaturen werden durch Neuarmaturen von den Armaturenherstellern ersetzt. Die Nebenbedingung (8.23) regelt den Fluss von neuen Industriearmaturen von Armaturenwerk  $i$  zu Lager  $j$  und von Lager  $j$  zum Kunden  $k$ . Der in Nebenbedingung (8.24) dargestellte Fluss von instandzusetzenden Armaturen vom Kunden  $k$  zur Armaturenwerkstatt  $l$  entspricht einem prozentualen Anteil  $R$  der Kundennachfrage. Der Rückfluss der aufgearbeiteten Armaturen von Armaturenwerkstatt  $l$  zum Kunden  $k$  wird in der Nebenbedingung (8.25) beschrieben. Hierbei steht der Faktor  $W$  für die Menge der Armaturen, die aufgearbeitet werden können. Die verbleibenden  $1 - W$ , die nicht mehr instandgesetzt werden können, müssen verschrottet werden, d.h. die Armaturengehäuse werden in Gießereien eingeschmolzen. Da sehr wenig Armaturen tatsächlich verschrottet werden müssen und somit der Einfluss auf die zu treffenden Standortentscheidungen sehr gering ist, wird dieser Fluss nicht berücksichtigt. Bei den Nebenbedingungen (8.26), (8.27), (8.28) und (8.29) handelt es sich um Kapazitätsrestriktionen, die gewährleisten, dass die Warenflüsse zwischen den jeweiligen Standorten deren Kapazitäten nicht überschreiten. Durch die Ungleichungen (8.30), (8.31) und (8.32) wird sichergestellt, dass die Kapazität nur bei errichteten Armaturenwerken, Lagern und Armaturenwerkstätten erweitert werden kann. Die Nebenbedingungen (8.33) und (8.34) beschreiben die Binärvariablen und die Nichtnegativitätsrestriktionen.

### 8.6.3 Lösungsmethoden

Bei dem vorgestellten Reverse-Logistik-Standortplanungsmodell handelt es sich um ein gemischt ganzzahliges, lineares Problem, welches im engeren Sinne einem vielfältig erweiterten Warehouse-Location-Problem entspricht. Einen guten Überblick zu Lösungs-

verfahren des kapazituierten WLPs bieten Akinc und Khumawala (1977) [1], Hummeltenberg (1981) [63], Cornuejols et. al. (1991) [32], Schildt (1994) [112] und Domschke/Drexel (1996) [38].

In der Literatur werden unterschiedliche heuristische und exakte Verfahren zur Lösung von Warehouse-Location-Problemen vorgestellt.

## Heuristiken

Heuristiken sind sehr flexibel hinsichtlich der Berücksichtigung von komplexen Zusammenhängen, Planungsrestriktionen und alternativen Planungszielen. Durch softwaregestützte heuristische Verfahren lassen sich bereits nach kurzer Rechenzeit gute Lösungen ermitteln. Allerdings ist es in der Regel nicht möglich, Aussagen bezüglich der Lösungsgüte zu treffen, d.h. es ist nicht sicher, ob es sich bei der gefundenen Lösung um die optimale Lösung handelt. Deshalb werden die durch Heuristiken erzielten Lösungen oft auch als suboptimale Lösungen bezeichnet. Die heuristischen Lösungsverfahren können in Konstruktionsheuristiken<sup>6</sup> und Verbesserungsheuristiken<sup>7</sup> unterteilt werden (vgl. Schildt 1994, S. 72 ff. [112], Nickel 2007, Kapitel 5 S. 28 [91]). Die Greedy-Heuristik (Add-Heuristik) und die Stingy-Heuristik (Drop-Heuristik) sind klassische Verfahren zur Bestimmung von Anfangslösungen und zählen somit zu den Konstruktionsheuristiken. Diese Anfangslösungen können die Basis bilden für die Interchange-Heuristik (Add-Drop-Heuristik) und die Metaheuristiken (z.B. Tabu Search, Simulated Annealing und genetische Algorithmen), den sogenannten Verbesserungsheuristiken. Da zur Lösung der in Kapitel 9 vorgestellten Szenarien keine heuristischen Verfahren verwendet werden, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Erläuterung der unterschiedlichen Heuristiken verzichtet und hierfür auf Domschke/Drexel 1996, S. 60 ff. [38] und Vahrenkamp 2003, S. 146 ff. [139] verwiesen.

## Exakte Lösungsverfahren

Die exakten Verfahren unterscheiden sich von den heuristischen Verfahren vor allem dadurch, dass sie stets eine optimale Lösung finden oder feststellen, dass das Problem unlösbar oder unbeschränkt ist. Die exakten Lösungsverfahren für gemischt ganzzahlige Probleme können wie folgt differenziert werden (in Anlehnung an Salkin und Mathur 1989, S. 78 ff. [110]):

- Schnittebenenverfahren (cutting plane techniques),
- Enumerationsverfahren<sup>8</sup> (enumerative methods),
- Dekompositionsverfahren (partitioning algorithms).

<sup>6</sup> Eröffnungsverfahren zur Ermittlung einer Startlösung

<sup>7</sup> Verbesserungsverfahren, um bereits existierende Lösungen zu optimieren

<sup>8</sup> Entscheidungsbaumverfahren

Das erste allgemein einsetzbare **Schnittebenenverfahren** zur Lösung von rein ganzzahligen Problemen wurde von Gomory [53] im Jahre 1958 entwickelt. Durch die Schnittebenenverfahren wird zunächst eine Ausgangslösung unter Vernachlässigung der Relaxation<sup>9</sup> ermittelt. Diese Ausgangslösung liefert eine duale Schranke für den Optimalwert des LPs. Anschließend wird diese duale Schranke durch sukzessives Hinzufügen sogenannter Schnittebenen<sup>10</sup>, verschärft. Dieser iterative Prozess wird solange fortgesetzt, bis eine optimale Lösung (ganzzahlige Lösung) ermittelt wird oder bis keine geeigneten Schnittebenen mehr gefunden werden.

**Enumerationsverfahren** analysieren explizit oder implizit alle zulässigen Lösungen eines ganzzahligen Optimierungsproblems auf Optimalität (vgl. Spengler 1994 [123]). Da die vollständige Enumeration von komplexen Problemformulierungen oft sehr ineffizient ist, wurden Verfahren mit begrenzter Enumeration entwickelt. Bei diesen Verfahren werden die zulässigen Lösungsbereiche, die nicht zu optimalen Lösungen führen, ausgegrenzt. Das von Land und Doig [76] im Jahre 1960 entwickelte Branch-and-Bound-Verfahren ist wohl der bedeutendste Vertreter der Enumerationsverfahren.

Das Branch-and-Bound-Verfahren stellt die Basis für viele kommerzielle Solver dar, wie auch für den Solver mmxprs der Software Xpress-Ive, der in dieser Arbeit zur Implementierung und Lösung des Reverse-Logistik-Standortplanungsmodells verwendet wird. Der Einsatz von Heuristiken und die Kombination mehrerer Verfahren zur Beschleunigung des Lösungsprozesses ist ebenfalls möglich. Im Folgenden wird auf das Branch-and-Bound-Verfahren kurz eingegangen (in Anlehnung an Neumann/Morlock 1993 [90] und Schopen/Zelaß 1994, S. 7 ff. [114]):

1. Bildung von Teilproblemen, die eine Vereinfachung des ursprünglichen Problems darstellen (Branching<sup>11</sup>).
2. Bestimmung einer unteren Schranke<sup>12</sup> (Bound) durch Relaxation<sup>13</sup> des Teilproblems.
3. Erfüllt die relaxierte Lösung nicht alle Ganzzahligkeitsbedingungen, erfolgt eine Separierung in weitere Teilprobleme. Ist die Lösung des relaxierten Problems zulässig, so liegt eine obere Schranke für den Zielfunktionswert vor. Gehe zu Schritt 1.

Dieses Verfahren wird solange durchgeführt, bis eine optimale Lösung gefunden wird.

---

<sup>9</sup> Ganzzahligkeitsbedingung

<sup>10</sup> Eine Schnittebene ist eine zusätzliche Ungleichung, die von allen zulässigen Punkten des LPs erfüllt wird, aber nicht von der aktuellen Lösung des LPs.

<sup>11</sup> Es gibt verschiedene Auswahlverfahren für die Wahl des zu bearbeitenden Teilproblems, wie z.B. LIFO-Regel, FIFO-Regel und MUB-Regel (vgl. Domschke/Drexel 2004, S. 136-137 [39]).

<sup>12</sup> In neueren Verfahren wird eine untere Schranke i.d.R durch die Anwendung einer Heuristik ermittelt.

<sup>13</sup> Es existieren verschiedene Relaxationsmöglichkeiten wie z.B. LP-Relaxation, Lagrange-Relaxation, Surrogate-Relaxation und das Weglassen von Nebenbedingungen (vgl. Domschke/Drexel 2004, S. 135-136 [39]).

Im Anschluss wird das Verfahren noch etwas detaillierter betrachtet. Branch-and-Bound-Verfahren lösen für die konstruierten Teilprobleme die jeweiligen linearen Programme. Dadurch wird eine untere Schranke ermittelt, soweit eine Lösung für das relaxierte Teilproblem existiert. Für den Fall, dass die relaxierte Lösung des Teilproblems keine Verbesserung der bisher gefundenen Lösung darstellt, ist dieses ausgelotet<sup>14</sup>. Andernfalls ist eine Zerlegung des Teilproblems in weitere Teilprobleme vorzunehmen, die es dann wieder zu prüfen gilt. Ist die Lösung hinsichtlich der Ganzzahligkeitsbedingung zulässig, wird sie mit der besten zulässigen Lösung verglichen und bei Dominanz wird die bislang gefundene beste Lösung durch die neue Lösung substituiert. Alle Teilprobleme, deren Zielfunktionswert geringer ist als die neue festgestellte beste Lösung, sind ausgelotet. Mit den restlichen Teilproblemen ist iterativ zu verfahren, bis alle Teilprobleme untersucht wurden (in Anlehnung an Neumann/Morlock 1993 [90]).

Die Kombination des Schnittebenenverfahrens und des Branch-and-Bound-Verfahrens in den 1980er Jahren resultierte in dem Branch-and-Cut-Verfahren. Dadurch, dass vor dem Branch-and-Bound-Prozess Schnittebenen zur LP-Relaxierung hinzugefügt werden, lässt sich meistens sehr viel schneller eine Lösung ermitteln. In den 1990er Jahren wurde das Branch-and-Cut-Verfahren durch neue Schnittebenen für verschiedene kombinatorische Optimierungsprobleme, bessere Branchingregeln und eine geschickte Kombination beider Verfahren erweitert (vgl. Nemhauser/Wolsey 1988 [89]). Deshalb basieren heute die besten Solver für ganzzahlige lineare Programme auf diesem Prinzip und die Lösungsverfahren werden sukzessive weiterentwickelt.

Abschließend werden die Dekompositionsverfahren noch kurz beschrieben. Im Rahmen der Dekompositionsverfahren wird das Problem in Teilprobleme zerlegt und diese werden schrittweise gelöst. Die in den einzelnen Iterationen gewonnenen Informationen werden zur Konstruktion des jeweils nächsten zu lösenden Teilproblems genutzt. Nach einer endlichen Anzahl von Iterationen sollte eine Lösung gefunden werden.

#### 8.6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde auf der Basis der Problemstrukturanalyse und der daraus resultierenden Anforderungen, Abgrenzungen und Zielkriterien ein Ansatz zur strategischen Standortplanung in Reverse-Logistik-Netzwerken entwickelt. Im nächsten Abschnitt wird das entwickelte Modell auf die Problematik der Industriematurenbranche unter Zuhilfenahme der Software Xpress-Ive angewendet.

---

<sup>14</sup> Ein Teilproblem heißt ausgelotet, wenn es nicht weiter betrachtet bzw. weiter verzweigt wird.

# **9 Modellanwendung auf die Industriarmaturenbranche**

In diesem Kapitel wird das in Kapitel 8 entwickelte Reverse-Logistik-Standortplanungsmodell auf die Problematik der Industriarmaturenbranche, unter Berücksichtigung der in Kapitel 6 und 7 vorgestellten Fakten, angewendet. Hierbei wird auf die Ermittlung des Datenmaterials näher eingegangen und die daraus resultierenden Annahmen erläutert. Ausgehend von einer vereinfachten, realitätsnahen Ausgangssituation werden verschiedene Szenarien untersucht und die Ergebnisse kritisch beurteilt. Ferner werden die wichtigsten Szenarien einer Einzelbetrachtung unterzogen, um Handlungsempfehlungen für die beteiligten Akteure ableiten zu können. Diese Ergebnisse bilden die Basis für Rückschlüsse auf die zukünftige Gestaltung von Reverse-Logistik-Netzwerken für die Industriarmaturenbranche und andere Branchen.

## **9.1 Anwendung des entwickelten Standortplanungsmodells auf die Industriarmaturenbranche**

Die Optimierung des deutschlandweiten Reverse-Logistik-Netzwerkes für Neu-, Alt- und aufgearbeitete Industriarmaturen steht im Mittelpunkt der Analyse. Ausgangspunkt für die Anwendung des Modells auf die Industriarmaturenbranche ist die Ermittlung des deutschlandweiten Aufkommens von aufzuarbeitenden Industriarmaturen und der Nachfrage nach Neuarmaturen und aufgearbeiteten Armaturen. Für die Modellbetrachtung wird auf Exporte und Importe gänzlich verzichtet. Im Rahmen der Untersuchung wurden für das Modell als Kunden die größten acht Chemieunternehmen und die wichtigsten zwölf Erdölraffinerien herangezogen. Zur Deckung der Kundennachfrage wurden jeweils zehn umsatzstarke Hersteller und Aufarbeiter ausgewählt. Mittels telefonischer Befragung wurden den Armaturenherstellern, den Armaturenaufarbeitern und den Kunden folgende Fragen gestellt:

- Wie hoch waren die fixen Errichtungskosten der Fertigungs-/Aufarbeitungsanlage?
- Welche Kapazität hat die Fertigungs- bzw. Aufarbeitungsanlage?
- Wie hoch waren die fixen Errichtungskosten des Lagers?

- Welche Kapazität hat das Lager?
- Wie hoch ist die durchschnittliche Auslastung der Fertigungs-/Aufarbeitungsanlage?
- Was würden Kapazitätserweiterungsmaßnahmen für die Fertigungs- bzw. Aufarbeitungsanlage und das Lager kosten?
- Wie viele Industriearmaturen könnten durch die Kapazitätserweiterung mehr gefertigt bzw. aufgearbeitet und gelagert werden?
- Wie hoch ist der jährliche Umsatz bei 100 % Auslastung ohne Kapazitätserweiterung?
- Wie hoch sind die jährlichen laufenden Betriebskosten?

In den nächsten Abschnitten erfolgt eine detaillierte Auswertung der Befragungsergebnisse hinsichtlich der beteiligten Akteure. Allerdings muss aus Datenschutzgründen auf die namentliche Nennung der Firmen und befragten Personen verzichtet werden.

### 9.1.1 Situationsgerechte Darstellung der Armaturenwerke

Auf der Basis der in Kapitel 7.6 dargestellten Großabstaltung sowie der Befragungsergebnisse der zehn Armaturenhersteller können Industriearmaturen von Nennweite DN 25 bis DN 1800 im Modell berücksichtigt werden. Ferner wird angenommen, dass die Armaturenhersteller alle Armaturenarten unabhängig vom Material fertigen können. Des Weiteren wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Neuarmaturen im Durchschnitt 50 kg wiegen und 560 € kosten. In Tabelle 9.1 und 9.2 werden die Antworten der Ar-

**Tabelle 9.1:** Datenmaterial Armaturenhersteller Teil 1 für 2006

Armaturen- hersteller	Fixe Errichtungskosten [Mio €]	Kapazität [Stk/Jahr]	Ø Auslastung [%]	Marktanteil [%]
1	10,0	50000	95	3,75
2	6,5	25000	90	1,77
3	17,5	150000	95	11,24
4	12,0	75000	95	5,62
5	6,0	20000	85	1,34
6	8,0	30000	90	2,13
7	14,0	100000	100	7,89
8	28,5	600000	100	47,33
9	8,5	40000	100	3,16
10	19,0	200000	100	15,78

maturenhersteller detailliert dargestellt. Die durchschnittliche jährliche Auslastung der Armaturenwerke liegt zwischen 85 % und 100 %. Das bedeutet, dass bei allen befragten Armaturenherstellern Fertigungsgipässe auftraten, die dazu führten, dass Aufträge nicht angenommen werden konnten. Deshalb sind Kapazitätserweiterungsmaßnahmen in Planung. Die Kosten für die jeweilige Kapazitätserweiterung werden in Tabelle 9.2 aufgeführt. Der aktuelle Marktanteil in Tabelle 9.1 wurde auf der Basis der aktuellen Kapazität unter Berücksichtigung der Auslastung, ohne durchgeführte Kapazitätserweiterungsmaßnahmen, ermittelt. Der Umsatz beruht auf dem Stückpreis von 560 € multipliziert mit der Kapazität und der Auslastung aus Tabelle 9.1. Die jährlichen variablen Betriebskosten eines Armaturenwerkes lassen sich für die strategische Planung hinreichend gut mittels eines prozentualen Anteils vom Umsatz bestimmen. Diese belaufen sich laut Aussagen der Hersteller auf durchschnittlich 60 % des Umsatzes.

**Tabelle 9.2:** Datenmaterial Armaturenhersteller Teil 2 für 2006

Armaturen-hersteller	Fixe Erweiterungs-kosten [Mio €]	Kapazitätser-weiterung [Stk/Jahr]	Umsatz [Mio €]	Betriebskosten [Mio €]
1	3,5	20000	26,6	15,96
2	2,0	10000	12,6	7,56
3	6,0	75000	79,8	47,88
4	4,0	35000	39,9	23,94
5	2,5	10000	9,52	5,712
6	3,0	15000	15,12	9,072
7	5,0	50000	56,0	33,6
8	7,5	100000	336,0	201,6
9	3,0	20000	22,4	13,44
10	6,5	75000	112,0	67,2

### 9.1.2 Situationsgerechte Darstellung der Armaturenwerkstätten

In Kapitel 7.4 wurde sowohl der firmeninterne als auch der externe Armaturenaufarbeitungsprozess dargestellt. Da die Kunden nur selten eigene Armaturenwerkstätten besitzen, wird die interne Armaturenaufarbeitung im Modell nicht berücksichtigt. Es wird vorausgesetzt, dass in den Armaturenwerkstätten alle Armaturenarten unabhängig von Nennweite und Material aufgearbeitet werden können. Der durchschnittliche Aufarbeitungspreis von 240 € für alle Industriearmaturenarten, von Nennweite DN 25 bis DN 1800, wurde auf der Basis der in Kapitel 7.6 aufgeführten Großabstellung und den Angaben der Armaturenaufarbeiter ermittelt.

In Tabelle 9.3 und 9.4 werden die Daten der beteiligten Armaturenaufarbeiter erfasst.

**Tabelle 9.3:** Datenmaterial Armaturenaufarbeiter Teil 1 für 2006

Armaturen- aufarbeiter	Fixe Errichtungskosten [Mio €]	Kapazität [Stk/Jahr]	Ø Auslastung [%]	Marktanteil [%]
1	2,0	25000	65	15,31
2	1,4	15000	75	10,6
3	1,8	20000	90	16,96
4	0,7	5000	90	4,24
5	1,6	15000	75	10,6
6	1,0	10000	70	6,59
7	0,9	10000	65	6,12
8	2,2	30000	70	19,78
9	1,1	12000	65	7,35
10	0,6	4000	65	2,45

**Tabelle 9.4:** Datenmaterial Armaturenaufarbeiter Teil 2 für 2006

Armaturen- aufarbeiter	Fixe Erweiterungs- kosten [Mio €]	Kapazitätser- weiterung [Stk/Jahr]	Umsatz [Mio €]	Betriebskosten [Mio €]
1	0,8	12000	3,9	2,73
2	0,65	8000	2,7	1,89
3	0,7	10000	4,32	3,024
4	0,3	3000	1,08	0,756
5	0,6	7000	2,7	1,89
6	0,45	5000	1,68	1,176
7	0,4	5500	1,56	1,092
8	0,9	16000	5,04	3,528
9	0,5	6000	1,872	1,3104
10	0,25	2000	0,624	0,4368

Im Gegensatz zu den Armaturenherstellern liegt die Kapazitätsauslastung der Armaturenwerkstätten nur zwischen 65 % und 90 %. Allerdings erwarten die Armaturenaufarbeiter aufgrund verschärfter Umweltauflagen, Ressourcenverknappung und steigender Nachfrage eine erhebliche Steigerung der Kapazitätsauslastung, die sogar Kapazitätserweiterungsmaßnahmen nach sich ziehen können. Der Marktanteil des jeweiligen Armatu-

renauarbeiteis wurde ebenfalls auf der Basis der aktuellen Kapazität sowie Auslastung, ohne durchgeführte Kapazitätserweiterungsmaßnahmen, ermittelt. Der Umsatz wird bestimmt, indem der Aufarbeitungspreis von 240 € pro Industriearmatur mit der Kapazität und der Auslastung aus Tabelle 9.3 multipliziert wird. Analog zu den Armaturenwerken lassen sich die variablen Betriebskosten einer Armaturenwerkstatt auch als prozentualer Anteil vom Umsatz bestimmen. Aufgrund der personalintensiveren Aufarbeitungsprozesse umfassen die variablen Betriebskosten durchschnittlich 70 % des Umsatzes.

### 9.1.3 Transport und Lagerung

Im Modell sind die Kosten für den Transport der Neu-, Alt- und aufgearbeiteten Industriearmaturen zwischen Armaturenwerken und Lagern, Lagern und Kunden, Kunden und Armaturenwerkstätten und von dort wieder zurück zu den Kunden zu berücksichtigen. Die Transportkosten sind abhängig von der Entfernung sowie von dem Gewicht und der Größe der Industriearmatur. Da in der Industriearmaturenbranche fast ausschließlich Lastkraftwagen als Transportmittel eingesetzt werden, wird dies auch für das Modell zugrundegelegt. Die Transportentferungen zwischen den jeweiligen Standorten wurden mit Hilfe der Software Euronetz von Prof. Dr. Vahrenkamp ermittelt. Das Gewicht einer Industriearmatur wurde mit durchschnittlich 50 kg/Stk festgesetzt. Der für die Branche übliche Transportkostensatz beträgt 0,3 Cent/km/Stk.

In den Tabellen 9.5 und 9.6 sind die Befragungsergebnisse, bezüglich der Lagerhaltung beim Armaturenhersteller sowie beim Kunden, subsumiert.

**Tabelle 9.5:** Datenmaterial Lager beim Armaturenhersteller

Lager	Fixe Errichtungskosten [Mio €]	Kapazität [Stk/Jahr]	Fixe Erweiterungskosten [Mio €]	Kapazitätserweiterung [Stk/Jahr]
1	0,25	5000	0,05	1000
2	0,2	2000	0,025	500
3	1,8	20000	0,4	5000
4	0,3	6000	0,08	1500
5	0,2	1500	0,02	500
6	0,2	2500	0,03	700
7	0,9	10000	0,2	2000
8	3,6	50000	0,8	10000
9	0,3	4000	0,025	600
10	2,2	25000	0,5	6000

**Tabelle 9.6:** Datenmaterial Lager beim Kunden

Lager	Fixe Errichtungs-kosten [Mio €]	Kapazität [Stk/Jahr]	Fixe Erweiterungs-kosten [Mio €]	Kapazitätserweiterung [Stk/Jahr]
1	20,0	200000	4,0	50000
2	4,0	50000	0,6	10000
3	4,0	50000	0,6	10000
4	4,5	60000	0,9	15000
5	2,5	30000	0,3	5000
6	15,0	150000	3,2	40000
7	13,0	130000	2,4	30000
8	18,0	180000	3,6	45000
9	3,6	40000	0,24	4000
10	4,0	50000	0,3	5000
11	5,0	70000	0,42	7000
12	4,2	55000	0,36	6000
13	4,2	55000	0,36	6000
14	3,8	45000	0,3	5000
15	3,8	45000	0,24	4000
16	6,0	80000	0,48	8000
17	3,6	42000	0,24	4000
18	3,0	38000	0,21	3500
19	3,8	44000	0,27	4500
20	3,2	36000	0,21	3500

Analog zu den Armaturenwerken und Armaturenwerkstätten besteht auch hier die Option Kapazitätserweiterungsmaßnahmen durchzuführen. Da die Armaturenaufarbeiter die aufgearbeiteten Armaturen direkt zum Kunden liefern, haben sie nur sehr kleine überdachte Lagerflächen vor Ort, die für das hier untersuchte Standortplanungsproblem nicht relevant sind. Des Weiteren werden Entsorgungskosten für die Verschleißteile, wie z.B. Dichtungen, nicht berücksichtigt. Da die Anzahl der zu verschrottenden Armaturengehäuse sehr gering ist, werden die dabei anfallenden Kosten und Erlöse außer Betracht gelassen. Die Lager- und Umschlagskosten pro Stück wurden ebenfalls aus der Software Euronetz übernommen und betragen 7 €/Armatur. Hierbei sind die Kosten für die Sammlung der Altarmaturen bereits enthalten. Die Betriebs- und Lagerkosten für Sammelstellen können im Modell vernachlässigt werden, da die Industriearmaturen in den

Lagern beim Kunden gesammelt werden und in der Regel keine gesonderten Sammelstellen, wie z.B. beim Altauto- und Elektronikgeräterecycling, existieren.

#### 9.1.4 Darstellung der Ausgangssituation

Die Ausgangssituation, die in Abbildung 9.1 dargestellt ist, dient als Basis für die nachfolgenden Szenarien. Durch die Zahlen neben den jeweiligen Symbolen wie Viereck, Dreieck,

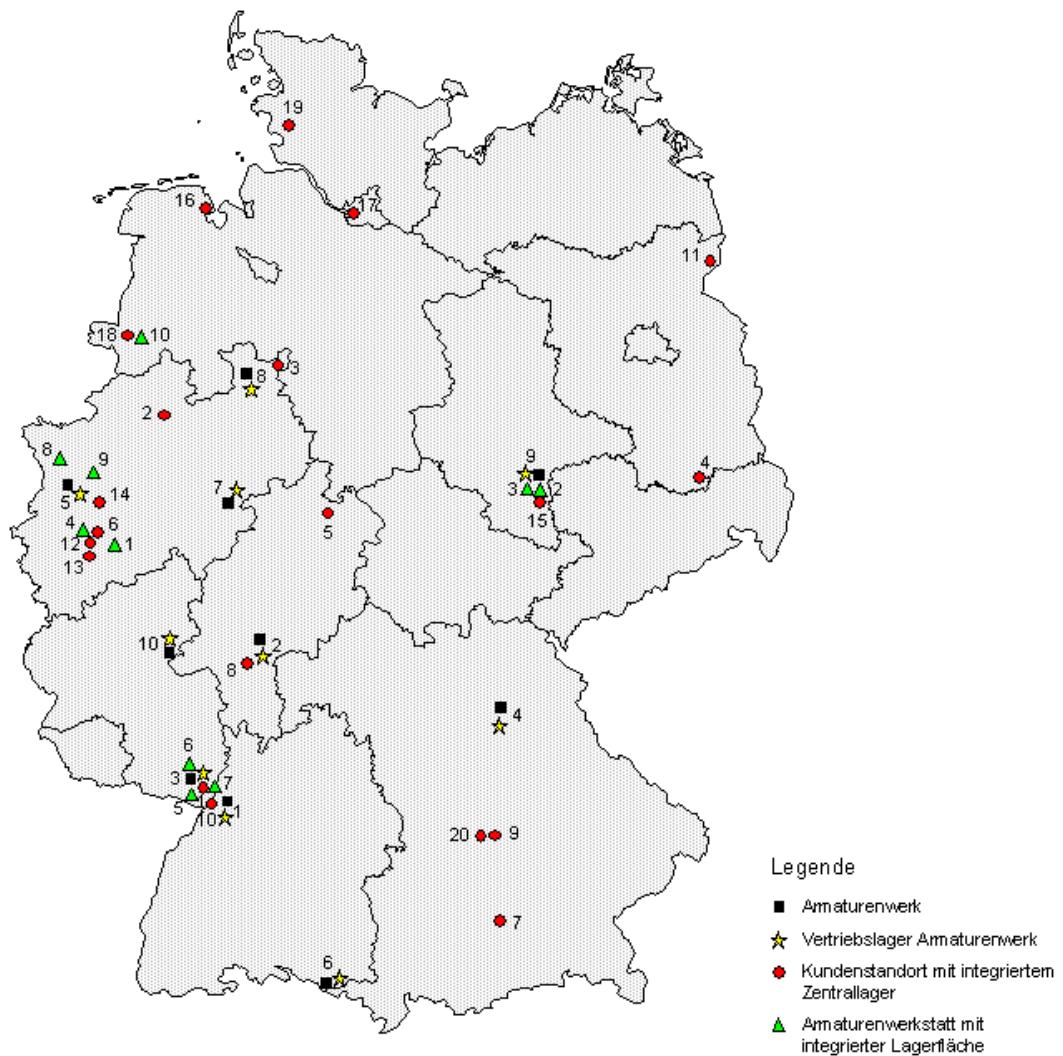


Abbildung 9.1: Ausgangssituation für das Reverse-Logistik-Standortplanungsmodell

Stern und Kreis wird der Bezug zu dem tabellarisch aufgeführten Datenmaterial hergestellt. Grundsätzlich stellt jedes Viereck aus Abbildung 9.1 einen potentiellen Standort eines Armaturenwerkes dar. Es besteht die Möglichkeit dort Armaturenwerke zu errichten und an bereits errichteten Standorten die Fertigungskapazität zu erweitern. Falls an einem potentiellen Standort kein Armaturenwerk errichtet wird, kann das wie eine Schließung eines bereits bestehenden Standortes gewertet werden, da in Abbildung 9.1 die Realität dargestellt wird. Für die Modellbetrachtung wurde auf die Einbeziehung der Kosten, die im Rahmen der Schließung eines Standortes anfallen, verzichtet, da bisher kaum Armaturenwerke geschlossen wurden und somit zu wenig Angaben vorliegen. Teilweise existieren zwischen den Herstellern Kooperationsverträge, d.h. Fertigungsaufträge für Armaturen mit großen Nennweiten und Armaturen mit kleinen Nennweiten werden an die darauf spezialisierten Hersteller weitergeleitet. Hingegen wird im Modell angenommen, dass jeder Hersteller alle Armaturenarten unabhängig von Nennweite und Material fertigen kann.

Jede potentielle Armaturenwerkstatt mit integrierter Lagerfläche wird in Abbildung 9.1 durch ein Dreieck dargestellt. Entsprechend den Armaturenwerken hat man hier die Option, neue Armaturenwerkstätten zu eröffnen und gegebenenfalls Kapazitätserweiterungen durchzuführen. Des Weiteren sind Standortschließungen möglich. Die dabei anfallenden Kosten werden ebenfalls nicht im Modell berücksichtigt.

Ferner stellt jeder Stern sowie jeder Kreis in Abbildung 9.1 einen potentiellen Lagerstandort dar. Die Sterne sind in der Regel kleinere Lager der dazugehörigen Armaturenwerke und die Kreise sind Kundenstandorte mit integrierten großen Zentrallagern<sup>1</sup>. Analog zu den Armaturenwerken und Armaturenwerkstätten können ebenfalls Lagerstandorte wegfallen bzw. falls notwendig Kapazitätserweiterungen durchgeführt werden. Die Kosten für eine Standortschließung fließen nicht ins Modell ein.

Der Planungszeitraum für das Ausgangsszenario wird auf ein Jahr festgesetzt, in dem es gilt die Kundennachfrage des in Abbildung 9.1 dargestellten Szenarios, mit Neuarmaturen und aufgearbeiteten Armaturen zu befriedigen. Die Kundennachfrage wird aktuell durch ca. 95 % Neuarmaturen und ca. 5 % aufgearbeitete Armaturen befriedigt, wobei die Nachfrage an Neuarmaturen das Angebot übersteigt, deshalb werden viele Armaturenhersteller mit der Problematik von Kapazitätsengpässen konfrontiert. Durch den Zukauf von Fertigungsmaschinen und eventueller Vergrößerung der Fertigungshallen ist es möglich, diese Engpässe zu beseitigen. Hingegen sind die Armaturenaufarbeiter nicht voll ausgelastet, siehe Tabelle 9.3. Da sowohl die aufgearbeiteten als auch die Neuarmaturen die Qualitätsanforderungen der Kunden erfüllen, ist diese Nachfrageschwankung nur durch Vorbehalte gegenüber den aufgearbeiteten Armaturen zu erklären. Studien und

---

<sup>1</sup> Hierbei handelt es sich meistens um vollautomatisierte Hochregallager, die wesentlich teurer sind als kleine nicht automatisierte Lager.

Erfahrungen aus der Praxis haben ergeben, dass aufgearbeitete Armaturen die gleiche Lebensdauer in Abhängigkeit von Einsatzort, Werkstoff, Durchflussmedium, Druck und Temperatur haben wie Neuarmaturen. Deshalb werden diese Vorbehalte in dem Modell nicht berücksichtigt. Des Weiteren wird im Ausgangsszenario eine Rückflussquote von 5 % und eine Aufbereitungsquote von 95 % angenommen.

Die strategische Standort- und Kapazitätsplanung der Armaturenwerke, Armaturenwerkstätten und Lager im Reverse-Logistik-Netzwerk der Industriearmaturenbranche steht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Ferner gilt es die vorwärts und rückwärts gerichteten Warenströme für die Neuarmaturen, Altarmaturen und die aufgearbeiteten Armaturen zu optimieren. Auf der Basis einer detaillierten Analyse der untersuchten Szenarien werden die besten Szenarien für die beteiligten Akteure und die gesamte Industriearmaturenbranche ausgewählt. Hierbei gilt es im Rahmen von Einzelbetrachtungen u.a. die folgenden Fragen zu klären:

- Welche Auswirkungen haben die Reallokationen und Kapazitätsanpassungen auf die Netzwerkstruktur und die beteiligten Akteure?
- Wie verändern sich Kapazitätsauslastung, Umsatz, Betriebskosten und Marktanteil der Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter?
- Welche Tendenzen können bei den Armaturenherstellern und Armaturenaufarbeitern festgestellt werden?
- Welche Veränderungen können im Bereich der Lagerhaltung beobachtet werden?

Auf der Grundlage der ermittelten Ergebnisse und der daraus resultierenden Erkenntnisse werden Handlungsempfehlungen für die beteiligten Akteure sowie die gesamte Branche bereitgestellt. Im Anschluss wird auf die Implementierung und die Ergebnisse der untersuchten Szenarien näher eingegangen.

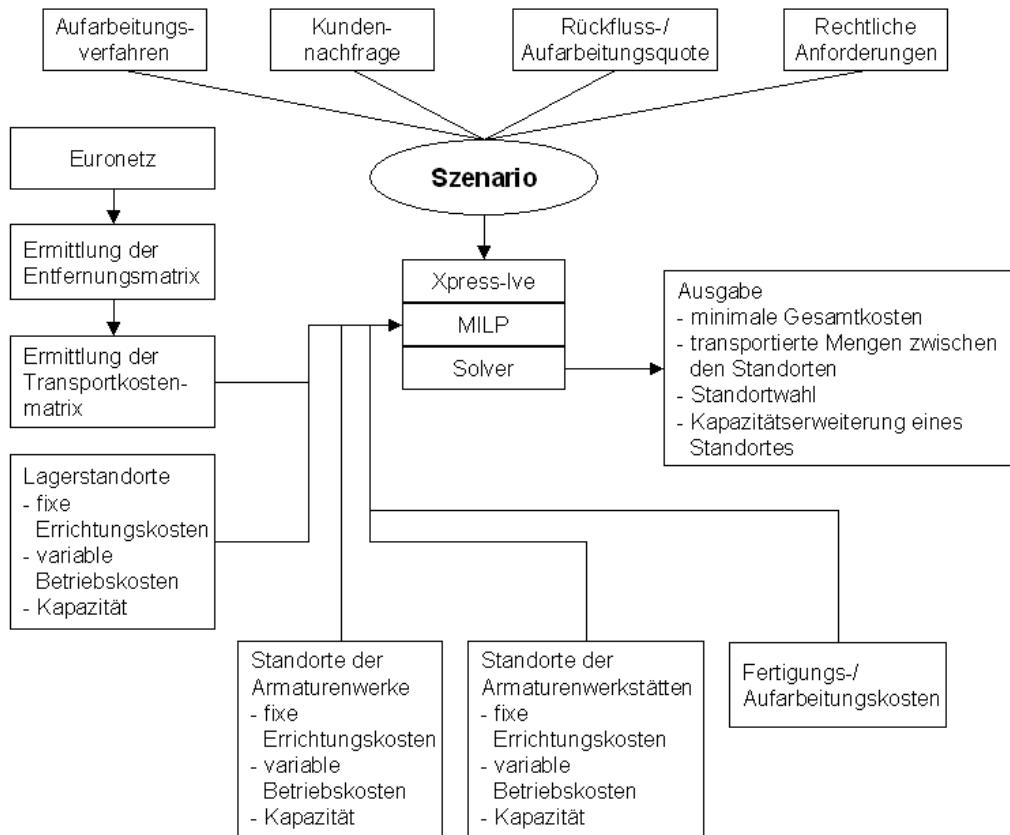
### 9.1.5 Implementation

Die Implementation erfolgte mit der kommerziellen Software Xpress-Ive der Firma Dash Optimization. In Abbildung 9.2 wird die Zusammenführung der ermittelten Daten strukturiert dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung des Quellcodes befindet sich im Anhang. Die unterschiedlichen implementierten Szenarien wurden mit dem Solver von Xpress-Ive gelöst. Die für das Ausgangsszenario aufgestellte Matrix besteht aus 200 Zeilen, 1400 Spalten und 3320 Non-Zeros. Bereits nach 0,7 Sekunden wurde mit einem handelsüblichen PC<sup>2</sup> eine optimale Lösung für das gemischt ganzzahlige Problem ermittelt. Die Lücke<sup>3</sup> zwischen dem besten Bound und der optimalen Lösung beträgt nur 0,0093 %.

<sup>2</sup> Intel Core 2 6600 mit 2,4 GHz, 2 GB RAM, 150 MB Festplatte

<sup>3</sup> In den folgenden Ergebnistabellen wird diese Lücke als Lösungsüte bezeichnet.

Somit kann festgehalten werden, dass sowohl die Rechenzeiten als auch die Lösungsgüte als ideal einzustufen sind.



**Abbildung 9.2:** Darstellung der Datenzusammenführung

## 9.2 Darstellung der zu untersuchenden Szenarien

Anhand der in Abbildung 9.2 dargestellten Implementation auf der Grundlage des in Kapitel 8 entwickelten Modells zur strategischen Standortplanung in Reverse-Logistik-Netzwerken werden verschiedene Szenarien untersucht, die im Anschluss näher erläutert werden. Diese lassen sich wie folgt untergliedern und gruppieren in:

- Ausgangsszenario mit geringer<sup>4</sup>, mittlerer und hoher Rückflussquote von 5 %, 7 % und 10 %.

<sup>4</sup> Repräsentiert den Status Quo der Industriearmaturenbranche

- Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % und einer geringen, mittleren sowie hohen Rückflussquote von 5 %, 7 %, 10 %.
- Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % und einer geringen, mittleren sowie hohen Rückflussquote von 5 %, 7 %, 10 %.
- Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % und einer geringen, mittleren sowie hohen Rückflussquote von 5 %, 7 %, 10 %.
- Neues Ausgangsszenario mit drei potentiellen Regionallagern und geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote von 5 %, 7 %, 10 %.
- Szenario mit drei potentiellen Regionallagern, einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % sowie geringen, mittleren und hohen Rückflussquoten von 5 %, 7 %, 10 %.
- Szenario mit drei potentiellen Regionallagern, einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % sowie geringen, mittleren und hohen Rückflussquoten von 5 %, 7 %, 10 %.
- Szenario mit drei potentiellen Regionallagern, einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % sowie geringen, mittleren und hohen Rückflussquoten von 5 %, 7 %, 10 %.

Hierbei wird analysiert, wie sich die Allokation der Standorte für Armaturenwerke, Lager und Armaturenwerkstätten bei steigender Nachfrage und Rückflussquote verändert. Ferner wird überprüft, was die beteiligten Akteure in ausgewählten, realitätsnahen Szenarien gewinnen bzw. verlieren und ob die Ergebnisse realisierbar sind. Die Optimierung der Kapazitätsauslastung sowie die Reduktion der Kosten der beteiligten Akteure hat bei allen untersuchten Szenarien höchste Priorität.

### **9.2.1 Szenariountersuchungen**

Anhand der in Abbildung 9.1 dargestellten Ausgangssituation für das Reverse-Logistik-Standortplanungsmodell und der in den vorherigen Abschnitten getroffenen Annahmen wurden verschiedene Szenarien untersucht. Dabei wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Rückflussquoten zwischen 5 % und 10 % sowie Erhöhungen zwischen 8 % und 24 % der Gesamtnachfrage nach Industriearmaturen auf die Standort- und Kapazitätsplanung analysiert. Die beiden letztgenannten exogenen Parameter wurden sukzessive um 1 % erhöht. Demnach galt es 170 Szenarien zu optimieren, von denen nur die aussagekräftigsten, siehe Kapitel 9.2, weiter betrachtet werden. Die Bewertung der Vorteilhaftigkeit der selektierten Szenarien wird auf der Basis von Kennzahlen durchgeführt. Neben den Kriterien Gesamtkosten, variable Betriebskosten, fixe Errichtungs- und Kapazitätserweiterungskosten, Transportkosten sowie Ersparnis durch Aufarbeitung, ist vor allem auch die Anzahl der errichteten, erweiterten und geschlossenen Standorte zur Bewertung des jeweiligen Szenarios relevant. Anhand dieser Kriterien werden die Szenarien mit den besten Ergebnissen für die beteiligten Akteure ausgewählt und im Rahmen der Einzelbetrachtungen näher erläutert.

## 9.2.2 Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien

### 1. Ergebnisse für das Ausgangsszenario bei verschiedenen Rückflussquoten

Die Kennzahlen für das Ausgangsszenario bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote sowie konstanter Gesamtnachfrage sind der Tabelle 9.7 zu entnehmen. Das Ausgangs-

**Tabelle 9.7:** Kennzahlen für das Ausgangsszenario bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen sowie konstanter Gesamtnachfrage

		Ausgangsszenario 5 % Rückfluss	Ausgangsszenario 7 % Rückfluss	Ausgangsszenario 10 % Rückfluss
Berechnungs- dauer	Sekunden	0,7	2,5	0,7
Lösungsgüte	in %	0,0093	0,0099	0,0093
Gesamtkosten	Mio €	683,88	670,62	644,98
Variable Betriebskosten	Mio €	472,50	467,70	461,66
Fixe Errichtungs- und Kapazitätser- weiterungskosten	Mio €	220,94	221,12	214,29
Transportkosten	Mio €	11,89	11,91	12,01
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	21,51	30,11	43,02
Armaturenwerke	errichtet	4/10	4/10	4/10
Armaturenwerk- stätten	erweitert	4/4	4/4	3/4
	geschlossen	6/10	6/10	6/10
Vertriebslager	errichtet	3/10	4/10	5/10
Armaturenwerk	erweitert	1/3	3/4	5/5
	geschlossen	7/10	6/10	5/10
Zentrallager	errichtet	8/10	6/10	9/10
Kunde	erweitert	6/8	5/6	7/9
	geschlossen	2/10	4/10	1/10
	errichtet	16/20	16/20	17/20
	erweitert	16/16	16/16	17/17
	geschlossen	4/20	4/20	3/20

szenario mit einer Rückflussquote von 10 % liefert hinsichtlich der Gesamtkosten, die sich aus den variablen Betriebskosten, den fixen Errichtungs- und Kapazitätserweiterungskosten, den Transportkosten sowie der Ersparnis durch Aufarbeitung zusammensetzen, das

beste Resultat. Durch die Erhöhung der Rückflussquote vergrößert sich die Menge der aufgearbeiteten Armaturen  $X^d$  und gleichzeitig geht die Menge der Neuarmaturen  $X^a$ , bei konstanter Nachfrage, um den gleichen Betrag zurück. Anhand der folgenden Formel wird der Rückgang der variablen Betriebskosten, die prozentual vom Umsatz ermittelt werden, verdeutlicht:

$$\text{Variable Betriebskosten} = X^a * 560 * 0,6 + X^d * 240 * 0,7$$

Der Rückgang der fixen Errichtungs- und Kapazitätserweiterungskosten sowie der leichte Anstieg der Transportkosten basieren auf der Reallokation der jeweiligen Standorte. Die erzielte Ersparnis durch die Aufarbeitung ist positiv korreliert mit der Rückflussquote und stellt in erster Linie eine Kostenersparnis für die Kunden dar.

Diese Gesamtbetrachtung reicht allerdings noch nicht, da keine Aussagen über die Konsequenzen für die beteiligten Akteure getroffen werden können. Deshalb gilt es das beste Szenario für alle beteiligten Akteure zu selektieren und im Rahmen der Einzelbetrachtung genauer zu analysieren. Untersucht man die Ergebnisse der Tabelle 9.7 hinsichtlich der errichteten, erweiterten und geschlossenen Standorte der Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter, so fällt auf, dass im Ausgangsszenario mit einer Rückflussquote von 10 % am wenigsten Standorte geschlossen wurden. Somit wurde dieses Szenario für die Einzelbetrachtung ausgewählt. Im Rahmen der Einzelbetrachtung werden nun die in Kapitel 9.1.4 gestellten Fragen beantwortet. Die Auswirkungen für die Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter werden in den Tabellen 9.8 und 9.9 übersichtlich dargestellt. Die Nummerierung der aufgeführten Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter entspricht der Nummerierung in den Tabellen der Kapitel 9.1.1 und 9.1.2. Die Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter, die nicht mehr in den Tabellen 9.8 und 9.9 aufgeführt werden, wurden im Rahmen der Optimierung geschlossen.

Anhand der Tabelle 9.8 kann man erkennen, dass nur die Standorte 3, 7, 8 und 10 der Armaturenhersteller errichtet wurden. Die Armaturenhersteller 3, 8 und 10, die ihre Produktionskapazität erweiterten, konnten somit ihre Marktposition zu Lasten der kleinen Armaturenhersteller ausbauen, während Armaturenhersteller 7 einen leichten Rückgang des Marktanteils zu verzeichnen hatte. Armaturenhersteller 8 konnte seinen Marktanteil um 5,82 % auf 53,15 % erhöhen und somit seine Vormachtstellung weiter festigen. Bezuglich der Kapazitätsauslastung gilt es zwischen der Veränderung der Kapazitätsauslastung ohne Kapazitätserweiterung  $\Delta[\%]$  und der absoluten Kapazitätsauslastung mit Kapazitätserweiterung zu differenzieren. Armaturenhersteller 3 und 10 haben trotz durchgeführter Kapazitätserweiterungsmaßnahmen eine Kapazitätsauslastung von 100 %, während Armaturenhersteller 8 mit 97,23 % Auslastung einen geringen Rückgang zu verzeichnen hat. Ferner kann festgehalten werden, dass die Armaturenhersteller, die ihre Kapazität erhöhten, auch ihren Umsatz steigern konnten. Daraus resultiert der Anstieg im Bereich der Betriebskosten.

**Tabelle 9.8:** Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Ausgangsszenario bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen- hersteller	Kapazität $\Delta[\%]$	Auslastung $\Delta_{alt}[\%]/[ \%]$	Betriebskosten $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Umsatz $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Marktanteil $\Delta[%]$
3	+ 50,00	+ 5/100	+ 27,72	+ 46,20	+ 6,33
7	0	0/-	0	0	- 0,08
8	+ 16,67	0/97,23	+ 27,07	+ 45,12	+ 5,82
10	+ 37,50	0/100	+ 25,20	+ 42,00	+ 5,70

Aus Tabelle 9.9 wird ersichtlich, dass die Standorte 1, 3, 6, 7 und 8 der Armaturenaufarbeiter errichtet wurden. Des Weiteren wurden an allen Standorten Kapazitätserweiterungsmaßnahmen durchgeführt. Alle aufgeführten Armaturenaufarbeiter sind in der Lage ihre Kapazitätsauslastung ohne Kapazitätserweiterung auf 100 % zu steigern, nach Kapazitätserweiterung ist nur Armaturenaufarbeiter 8 nicht zu 100 % ausgelastet. Folglich konnte jeder Armaturenaufarbeiter in Tabelle 9.9 seine Marktposition ausbauen, wobei Armaturenaufarbeiter 1 mit 12,22 % den größten Zuwachs zu verzeichnen hatte, somit verbesserte sich dieser im Ranking bezüglich der Marktanteile von Platz drei auf Platz eins. Abschließend kann festgehalten werden, dass tendenziell die größeren Aufarbeiter von den Restrukturierungsmaßnahmen profitieren.

**Tabelle 9.9:** Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Ausgangsszenario bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen- aufarbeiter	Kapazität $\Delta[\%]$	Auslastung $\Delta_{alt}[\%]/[ \%]$	Betriebskosten $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Umsatz $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Marktanteil $\Delta[%]$
1	+ 48,00	+ 35/100	+ 3,49	+ 4,98	+ 12,22
3	+ 50,00	+ 10/100	+ 2,02	+ 2,88	+ 5,36
6	+ 50,00	+ 30/100	+ 1,34	+ 1,92	+ 4,56
7	+ 55,00	+ 35/100	+ 1,51	+ 2,16	+ 5,41
8	+ 53,33	+ 30/80,27	+ 2,68	+ 3,82	+ 7,69

Im Bereich der Lagerhaltung ist das betrachtete Szenario nicht das Beste, da am meisten Lagerstandorte errichtet und erweitert werden. Durch die Kapazitätserweiterungen von Lägern kommt es zur Schließung von suboptimalen Standorten. Dadurch können Kosten reduziert werden.

In Abbildung 9.3 wird die optimale Lösung für das Ausgangsszenario bei 10 % Rückfluss grafisch dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der jeweiligen Transportverbindungen verzichtet. Die Reallokationen der Standorte haben zur

Folge, dass im Bereich der Armaturenhersteller eine eher zentralisierte Netzwerkstruktur vorliegt. Die Standorte befinden sich nun nur noch in drei Bundesländern anstatt, wie in der Ausgangssituation dargestellt, in fünf Bundesländern. Die verbleibenden Armaturenauarbeiter befinden sich nach wie vor in den Industrieballungsgebieten. Im Bereich der Lagerstandorte sind auch keine signifikanten Änderungen im Bereich der Netzwerkstruktur erkennbar.



**Abbildung 9.3:** Optimale Lösung für das Ausgangsszenario bei 10 % Rückfluss

## 2. Ergebnisse für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten

Im Vergleich zu den vorherigen Szenarien fällt bei diesen Szenarien auf, dass die Ge-

samtkosten erheblich gestiegen sind, siehe Tabelle 9.10. Dies liegt an der Steigerung der Nachfrage um 8 % und den daraus resultierenden erhöhten fixen Errichtungs- und Erweiterungskosten sowie den Betriebskosten. Auffällig ist außerdem, dass die Transportkosten sich nur geringfügig verändert haben. Die Erhöhung der Ersparnis durch Aufarbeitung lässt sich durch die größere Anzahl aufzuarbeitender Industriearmaturen erklären.

**Tabelle 9.10:** Kennzahlen für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen

		Szenario 5 % Rückfluss	Szenario 7 % Rückfluss	Szenario 10 % Rückfluss
Berechnungs- dauer	Sekunden	0,5	0,8	0,9
Lösungsgüte	in %	0,0078	0,0073	0,0085
Gesamtkosten	Mio €	747,32	731,79	702,94
Variable Betriebskosten	Mio €	510,81	506,21	497,98
Fixe Errichtungs- und Kapazitäts- erweiterungskosten	Mio €	247,28	246,46	239,27
Transportkosten	Mio €	12,47	11,64	12,15
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	23,23	32,52	46,46
	errichtet	5/10	5/10	5/10
Armaturenwerke	erweitert	5/5	5/5	4/5
	geschlossen	5/10	5/10	5/10
	errichtet	3/10	4/10	6/10
Armaturenwerk- stätten	erweitert	2/3	2/4	4/6
	geschlossen	7/10	6/10	4/10
	errichtet	7/10	8/10	9/10
Vertriebslager	erweitert	6/7	7/8	9/9
Armaturenwerk	geschlossen	3/10	2/10	1/10
	errichtet	17/20	18/20	17/20
Zentrallager	erweitert	17/17	18/18	17/17
Kunde	geschlossen	3/20	2/20	3/20

Für die Einzelbetrachtung wird wiederum das Szenario mit 10 % Rückflussquote ausgewählt, da dieses sowohl in Bezug auf die Gesamtbetrachtung als auch im Bereich der Standortplanung für alle beteiligten Akteure die beste Alternative darstellt.

Aus der Tabelle 9.11 wird die neue Standortsituation der Armaturenhersteller ersichtlich. Dabei fällt auf, dass die Armaturenhersteller 3, 7, 8 und 10 durch ihre Kapazitätserweiterung ihren Umsatz und Marktanteil steigern konnten, indessen musste Armaturenhersteller 9 einen leichten Rückgang seines Marktanteils hinnehmen. Armaturenhersteller 8 konnte mit 50,61 % Marktanteil seine Vormachtstellung verteidigen. Alle Armaturenhersteller außer Armaturenhersteller 10 konnten eine Kapazitätsauslastung von 100 % erreichen bzw. beibehalten.

**Tabelle 9.11:** Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen- hersteller	Kapazität $\Delta[\%]$	Auslastung $\Delta_{alt}[\%]/[ \%]$	Betriebskosten $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Umsatz $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Marktanteil $\Delta[\%]$
3	+ 50,00	+ 5/100	+ 27,72	+ 46,20	+ 5,03
7	+ 50,00	0/100	+ 16,80	+ 28,00	+ 2,96
8	+ 16,67	0/100	+ 33,60	+ 56,00	+ 3,28
9	0	0/-	0	0	- 0,27
10	+ 37,50	0/97,46	+ 22,86	+ 38,09	+ 3,60

Anhand der Tabelle 9.12 wird deutlich, dass die Armaturenaufarbeiter 1 bis 3 und 6 bis 8 errichtet und dass an den Standorten 1, 3, 7 und 8 Kapazitätserweiterungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Alle Armaturenaufarbeiter außer Armaturenaufarbeiter 8 konnten ihre Kapazitätsauslastung, unabhängig davon ob Kapazitätserweiterungsmaßnahmen durchgeführt wurden, auf 100 % steigern. Demzufolge konnte jeder Armaturenaufarbeiter seinen Umsatz steigern, wobei nur fünf von sechs in der Lage waren ihren Marktanteil zu erhöhen. Mit jetzt 25,49 % und 25,95 % besitzen die Armaturenaufarbeiter 1 und 8 die größten Marktanteile.

**Tabelle 9.12:** Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen- aufarbeiter	Kapazität $\Delta[\%]$	Auslastung $\Delta_{alt}[\%]/[ \%]$	Betriebskosten $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Umsatz $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Marktanteil $\Delta[\%]$
1	+ 48,00	+ 35/100	+ 3,47	+ 4,98	+ 10,18
2	0	+ 25/-	+ 0,63	+ 0,90	- 0,27
3	+ 50,00	+ 10/100	+ 2,02	+ 2,88	+ 3,70
6	0	+ 30/-	+ 0,50	+ 0,72	+ 0,30
7	+ 55,00	+ 35/100	+ 1,51	+ 2,16	+ 4,56
8	+ 53,33	+ 30/81,91	+ 2,80	+ 4,00	+ 6,17

Die Veränderungen im Bereich der Lagerhaltung sind im Vergleich zum vorhergehenden Szenario eher gering, so dass diese nicht weiter kommentiert werden müssen.

In Abbildung 9.4 wird die optimale Lösung für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei 10 % Rückfluss grafisch dargestellt. Die Reallokationen der Standorte haben zur Folge, dass nun nur noch in vier von fünf Bundesländern Standorte von Armaturenherstellern existieren. Die Netzwerkstruktur der Armaturenaufarbeiter wird durch den neuen Aufarbeiter in Ostdeutschland eher dezentraler.



**Abbildung 9.4:** Optimale Lösung für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei 10 % Rückfluss

### 3. Ergebnisse für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten

Vergleicht man die monetären Positionen der Szenarien bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote in Tabelle 9.13 so fällt auf, dass das Szenario mit 10 % Rückflussquote in allen Bereichen außer den Transportkosten das Vorteilhafteste ist. Obwohl dieses Szenario bezüglich der Standortallokationen für die Armaturenhersteller nicht optimal ist, wird es für die Einzelbetrachtung herangezogen, da es bei einer gemeinsamen Betrachtung der Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter die meisten Gewinner gibt.

**Tabelle 9.13:** Kennzahlen für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen

		Szenario 5 % Rückfluss	Szenario 7 % Rückfluss	Szenario 10 % Rückfluss
Berechnungs- dauer	Sekunden	2,4	1,6	19,5
Lösungsgüte	in %	0,0098	0,0097	0,0098
Gesamtkosten	Mio €	815,69	795,51	763,75
Variable Betriebskosten	Mio €	550,16	542,39	535,65
Fixe Errichtungs- und Kapazitäts- erweiterungskosten	Mio €	278,22	275,65	265,22
Transportkosten	Mio €	12,26	12,40	12,78
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	24,95	34,93	49,90
	errichtet	7/10	7/10	6/10
Armaturenwerke	erweitert	6/7	5/7	5/6
	geschlossen	3/10	3/10	4/10
	errichtet	2/10	4/10	6/10
Armaturenwerk- stätten	erweitert	2/2	3/4	6/6
	geschlossen	8/10	6/10	4/10
	errichtet	7/10	9/10	8/10
Vertriebslager	erweitert	6/7	8/9	6/8
Armaturenwerk	geschlossen	3/10	1/10	2/10
	errichtet	18/20	18/20	18/20
Zentrale Lager	erweitert	17/18	16/18	17/18
Kunde	geschlossen	2/20	2/20	2/20

In der Tabelle 9.14 sind die Kennzahlen der Armaturenhersteller aufgeführt. Hierbei fällt auf das fünf von sechs ihre Produktionskapazität erweiterten. Allerdings konnten nur vier dieser fünf Armaturenhersteller ihren Marktanteil steigern. Armaturenhersteller 8 besitzt nach wie vor eine Vormachtstellung, jedoch ist diese mit 46,82 % Marktanteil nicht mehr ganz so stark. Bezuglich der Kapazitätsauslastung kann festgehalten, dass alle außer Armaturenhersteller 8 zu 100 % ausgelastet sind.

**Tabelle 9.14:** Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen-hersteller	Kapazität Δ[%]	Auslastung Δ <sub>alt</sub> [%]/[%]	Betriebskosten Δ[Mio €]	Umsatz Δ[Mio €]	Marktanteil Δ[%]
3	+ 50,00	+ 5/100	+ 27,72	+ 46,20	+ 3,91
4	+ 46,67	+ 5/100	+ 13,02	+ 21,70	+ 1,79
6	0	+ 10/-	+ 1,01	+ 1,68	- 0,11
7	+ 50,00	0/100	+ 16,80	+ 28,00	+ 2,21
8	+ 16,67	0/99,35	+ 32,08	+ 53,46	- 0,51
10	+ 37,50	0/100	+ 25,20	+ 42,00	+ 2,73

Anhand Tabelle 9.15 wird ersichtlich, dass alle sechs Armaturenaufarbeiter ihre Aufarbeitungskapazität erweitert haben. Hinsichtlich der Kapazitätsauslastung kann festgehalten werden, dass jeder Armaturenaufarbeiter seine Kapazitätsauslastung ohne Kapazitätserweiterungsmaßnahmen auf 100 % steigern konnte, wohingegen dies nach durchgeföhrter Kapazitätserweiterung nur noch bei fünf Aufarbeitern der Fall ist. Dennoch waren alle in der Lage ihren Umsatz sowie Marktanteil zu erhöhen.

**Tabelle 9.15:** Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen-aufarbeiter	Kapazität Δ[%]	Auslastung Δ <sub>alt</sub> [%]/[%]	Betriebskosten Δ[Mio €]	Umsatz Δ[Mio €]	Marktanteil Δ[%]
1	+ 48,00	+ 35/100	+ 3,49	+ 4,98	+ 8,42
2	+ 53,33	+ 25/100	+ 1,97	+ 2,82	+ 4,15
3	+ 50,00	+ 10/97,82	+ 1,91	+ 2,72	+ 1,86
6	+ 50,00	+ 30/100	+ 1,34	+ 1,92	+ 3,03
7	+ 55,00	+ 35/100	+ 1,51	+ 2,16	+ 3,82
8	+ 53,33	+ 30/78,45	+ 2,54	+ 3,62	+ 3,36

Betrachtet man den Bereich der Lagerstandortallokationen, so fällt auf, dass nur marginale Unterschiede existieren, somit ist es nicht notwendig diese Thematik zu erörtern.

Abschließend wird in Abbildung 9.5 die optimale Lösung für das im Rahmen der Einzelbetrachtung untersuchte Szenario grafisch dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass mit steigender Nachfrage die Standorte der Armaturenhersteller eine eher dezentrale Netzwerkstruktur aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neben den Ballungsgebieten auch andere Standorte, aufgrund der erhöhten Nachfrage, attraktiver für die Errichtung von Produktionsstandorten werden. Die Armaturenaufarbeiter befinden sich in unmittelbarer Nähe ihrer Großkunden, somit ist bezüglich der Netzwerkstruktur keine Änderung erkennbar.



**Abbildung 9.5:** Optimale Lösung für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei 10 % Rückfluss

#### 4. Ergebnisse für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten

In Tabelle 9.16 sind die Kennzahlen für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten dargestellt. Das beste Ergebnis ist mit dem Szenario bei einer Rückflussquote von 10 % zu erreichen. Einen wesentlichen Beitrag hierzu leistet die hohe Menge von aufgearbeiteten Industriearmaturen und die daraus resultierende Ersparnis. Obwohl das Szenario mit einer Rückflussquote von 5 % für die Armaturenhersteller optimal ist, wird es für die Einzelbetrachtung nicht heran-

**Tabelle 9.16:** Kennzahlen für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen

		Szenario 5 % Rückfluss	Szenario 7 % Rückfluss	Szenario 10 % Rückfluss
Berechnungs- dauer	Sekunden	0,8	0,5	1,0
Lösungsgüte	in %	0,0097	0,0097	0,0097
Gesamtkosten	Mio €	888,07	862,78	824,96
Variable Betriebskosten	Mio €	586,94	581,41	571,79
Fixe Errichtungs- und Kapazitäts- erweiterungskosten	Mio €	315,99	306,68	293,80
Transportkosten	Mio €	11,81	12,02	12,71
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	26,67	37,34	53,34
	errichtet	10/10	9/10	7/10
Armaturenwerke	erweitert	8/10	7/9	7/7
	geschlossen	0/10	1/10	3/10
	errichtet	3/10	4/10	7/10
Armaturenwerk- stätten	erweitert	3/3	3/4	6/7
	geschlossen	7/10	6/10	3/10
	errichtet	8/10	9/10	9/10
Vertriebslager	erweitert	6/8	6/9	7/9
Armaturenwerk	geschlossen	2/10	1/10	1/10
	errichtet	19/20	19/20	18/20
Zentrallager	erweitert	19/19	19/19	18/18
Kunde	geschlossen	1/20	1/20	2/20

gezogen, da es für die Armaturenaufarbeiter die schlechteste Alternative darstellt. Das beste Szenario für beide Parteien ist das Szenario mit einer Rückflussquote von 10 %, da hier die wenigsten Verlierer zu verzeichnen sind. Somit wird im weiteren Verlauf dieses Szenario im Rahmen der Einzelbetrachtung näher begutachtet.

Der Tabelle 9.17 sind die Kennzahlen für die Armaturenhersteller zu entnehmen. Die Umsatzsteigerungen sind sowohl auf die erhöhte Nachfrage als auch die damit verbundene Erhöhung der Produktionskapazität zurückzuführen. Nahezu jeder Armaturenhersteller konnte bezüglich der Kapazitätsauslastung eine Verbesserung erzielen. Des Weiteren waren sechs von sieben Armaturenherstellern in der Lage ihren Marktanteil aufzustocken.

**Tabelle 9.17:** Einzelbetrachtung der Armaturenhersteller im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen- hersteller	Kapazität $\Delta[\%]$	Auslastung $\Delta_{alt}[\%]/[ \%]$	Betriebskosten $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Umsatz $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Marktanteil $\Delta[\%]$
1	+ 40,00	+ 5/100	+ 7,56	+ 12,60	+ 0,66
3	+ 50,00	+ 5/100	+ 27,72	+ 46,20	+ 2,93
4	+ 46,67	+ 5/100	+ 13,02	+ 21,70	+ 1,31
7	+ 50,00	0/100	+ 16,80	+ 28,00	+ 1,56
8	+ 16,67	0/100	+ 33,60	+ 56,00	- 3,25
9	+ 50,00	0/100	+ 6,72	+ 11,20	+ 0,62
10	+ 37,50	0/99,24	+ 24,50	+ 40,83	+ 1,41

Anhand Tabelle 9.18 wird deutlich, dass alle Armaturenaufarbeiter, die ihre Aufarbeitungskapazität erweitert haben, auch ihren Umsatz sowie Marktanteil erhöhen konnten.

**Tabelle 9.18:** Einzelbetrachtung der Armaturenaufarbeiter im Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei hoher Rückflussquote von 10 %

Armaturen- aufarbeiter	Kapazität $\Delta[\%]$	Auslastung $\Delta_{alt}[\%]/[ \%]$	Betriebskosten $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Umsatz $\Delta[\text{Mio } \text{€}]$	Marktanteil $\Delta[\%]$
1	+ 48,00	+ 35/100	+ 3,49	+ 4,98	+ 6,89
2	0	+ 25/-	+ 0,63	+ 0,90	- 1,60
3	+ 50,00	+ 10/100	+ 2,02	+ 2,88	+ 1,04
6	+ 50,00	+ 30/100	+ 1,34	+ 1,92	+ 2,41
7	+ 55,00	+ 35/100	+ 1,51	+ 2,16	+ 3,18
8	+ 53,33	+ 30/78,67	+ 2,55	+ 3,64	+ 1,93
9	+ 50,00	+ 35/100	+ 1,71	+ 2,45	+ 3,45

Hinsichtlich der Kapazitätsauslastung kann festgehalten werden, dass außer Armaturenaufarbeiter 8 jeder seine Kapazitätsauslastung auf 100 % steigern konnte.

In Abbildung 9.6 ist die optimale Lösung für das im Rahmen der Einzelbetrachtung untersuchte Szenario grafisch dargestellt. Bezüglich der Netzwerkstruktur sind kaum Änderungen zu verzeichnen, d.h. die Standorte der Armaturenhersteller sind eher dezentral angeordnet und die Aufarbeitungsstandorte befinden sich weiterhin in der Nähe ihrer Großkunden. Analog zu den vorherigen Szenarien kann auf die Kommentierung der Lagerstandortsituation verzichtet werden.



**Abbildung 9.6:** Optimale Lösung für das Szenario mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei 10 % Rückfluss

### 9.2.3 Modifizierte Ausgangssituation

Da in den bisher betrachteten Szenarien die Lagerstandortsituation nur geringfügig verbessert werden konnte, soll in diesem Abschnitt auf der Basis der in Abbildung 9.7 dargestellten modifizierten Ausgangssituation untersucht werden, ob im Bereich der Lagerhaltung bessere Ergebnisse zu erzielen sind. Hierbei wird zu Grunde gelegt, dass drei potentielle Regionallager, symbolisiert durch blaue Rauten, errichtet werden können. Ferner wird angenommen, dass es sich um große vollautomatisierte Hochregallager mit einer Lagerkapazität für jeweils 500.000 Industriearmaturen handelt. Die kumulierte Lagerkapazität der drei Regionallager entspricht ungefähr der kumulierten Lagerkapazität

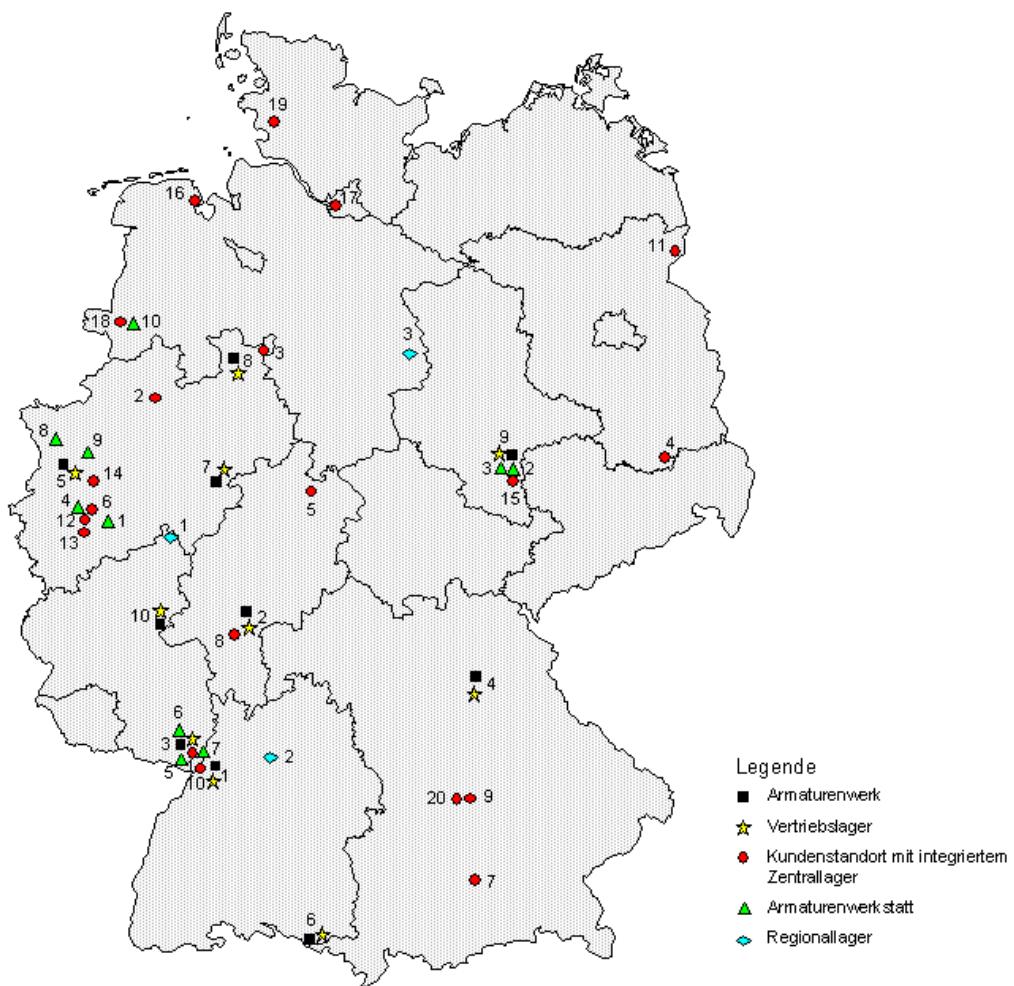


Abbildung 9.7: Modifizierte Ausgangssituation mit 3 potentiellen Regionallagern

der kleinen Vertriebslager der Armaturenhersteller und der Zentrallager bei den Kunden. Die fixen Errichtungskosten für ein Regionallager belaufen sich auf 40 Mio. €. Das für die zu untersuchenden Szenarien zu Grunde gelegte Datenmaterial für die Armaturenhersteller, Armaturenaufarbeiter und Lager bleibt unverändert. In den folgenden Szenarien gilt es zu ermitteln, inwieweit eine zentrale Lagerhaltungsstrategie, repräsentiert durch die drei potentiellen Regionallager, vorteilhaft ist, oder ob die bisherige Lagerhaltungsstrategie beizubehalten ist. Hierbei werden die Ergebnisse bezüglich der Armaturenwerke sowie der Armaturenwerkstätten nicht weiter betrachtet, da sich keinerlei Änderungen durch die Optimierung im Bereich der Lagerhaltung ergeben hat.

### **1. Ergebnisse für das Ausgangsszenario mit drei potentiellen Regionallagern bei unterschiedlichen Rückflussquoten**

Die Kennzahlen für das Ausgangsszenario mit drei potentiellen Regionallagern bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote sind der Tabelle 9.19 zu entnehmen.

**Tabelle 9.19:** Kennzahlen für das Ausgangsszenario mit drei potentiellen Regionallagern bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen

		Ausgangsszenario 5 % Rückfluss	Ausgangsszenario 7 % Rückfluss	Ausgangsszenario 10 % Rückfluss
Berechnungs-dauer	Sekunden	1,4	0,8	0,9
Lösungsgüte	in %	0,0097	0,0093	0,0096
Gesamtkosten	Mio €	677,66	664,32	639,79
Variable Betriebskosten	Mio €	472,70	468,05	461,11
Fixe Errichtungs- und Kapazitätserweiterungskosten	Mio €	214,35	214,46	209,44
Transportkosten	Mio €	12,12	11,92	12,26
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	21,51	30,11	43,02
	errichtet	8/10	6/10	6/10
Vertriebslager	erweitert	7/8	5/6	4/6
Armaturenwerk	geschlossen	2/10	4/10	4/10
	errichtet	13/20	13/20	12/20
Zentrallager	erweitert	13/13	13/13	12/12
Kunde	geschlossen	7/20	7/20	8/20
Regionallager	errichtet	1/3	1/3	1/3

Vergleicht man die Gesamtkosten der Tabelle 9.7 mit denen der Tabelle 9.19, so kann man erkennen, dass sich die Gesamtkosten der verschiedenen Szenarien um jeweils 6,22 Mio. €, 6,3 Mio € und 5,19 Mio € reduziert haben. Obwohl das Szenario mit 10 % Rückflussquote bezüglich der Gesamtkosten die geringste Ersparnis zu verzeichnen hat ist es dennoch das vorteilhafteste für alle beteiligten Akteure, da hier sowohl die Standortsituation der Armaturenwerke und Armaturenwerkstätten, siehe Tabelle 9.7, als auch die Lagerstandortsituation, siehe Tabelle 9.19, optimal ist. Deshalb wird in Abbildung 9.8 die optimale Lösung des Ausgangsszenarios mit drei potentiellen Regionallagern bei einer Rückflussquote von 10 % grafisch dargestellt.



**Abbildung 9.8:** Optimale Lösung des Ausgangsszenarios mit drei potentiellen Regionallagern bei einer Rückflussquote von 10 %

Die Kostenersparnis ist auf das neu errichtete Regionallager 1 und die daraus resultierende Reduktion der fixen Errichtungs- und Erweiterungskosten zurückzuführen. Durch das Regionallager 1 konnten zwischen drei und vier Zentrallager je nach Szenario eingespart werden. Dies stellt eine zusätzliche Ersparnis für die Kunden dar, da das neue Regionallager 1 gemeinschaftlich genutzt wird, werden die anfallenden Betriebskosten sowie Errichtungskosten analog zur Elektronikbranche anteilmäßig, bezüglich der genutzten Lagerfläche, auf die Betreiber (Kunden) verteilt. Im Szenario mit 10 % Rückflussquote konnten drei Armaturenhersteller aufgrund des neuen Regionallagers 1 ihre kleinen Vertriebslager schließen und liefern nun ihre Armaturen direkt in das Regionallager 1.

## **2. Ergebnisse für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten**

In der Tabelle 9.20 sind die Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regional-

**Tabelle 9.20:** Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen

		Szenario 5 % Rückfluss	Szenario 7 % Rückfluss	Szenario 10 % Rückfluss
Berechnungs- dauer	Sekunden	0,7	7,7	1,3
Lösungsgüte	in %	0,0099	0,0095	0,0099
Gesamtkosten	Mio €	739,35	725,43	696,56
Variable Betriebskosten	Mio €	511,07	506,05	498,01
Fixe Errichtungs- und Kapazitäts- erweiterungskosten	Mio €	239,38	239,39	232,60
Transportkosten	Mio €	12,13	12,51	12,41
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	23,23	32,52	46,46
	errichtet	4/10	7/10	6/10
Vertriebslager	erweitert	2/4	6/7	5/6
Armaturenwerk	geschlossen	6/10	3/10	4/10
	errichtet	6/20	15/20	14/20
Zentrallager	erweitert	6/6	15/15	14/14
Kunde	geschlossen	14/20	5/20	6/20
Regionallager	errichtet	2/3	1/3	1/3

lagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei verschiedenen Rückflussquoten aufgeführt. Im Rahmen einer Gegenüberstellung der Tabellen 9.10 und 9.20 fällt auf, dass die Gesamtkosten um jeweils 7,97 Mio. €, 6,36 Mio. € und 6,38 Mio. € zurückgegangen sind. Das Szenario mit 10 % Rückfluss belegt bezüglich der zusätzlichen Ersparnis nur Rang zwei. Dennoch liefert dieses Szenario gesamtheitlich betrachtet die beste Lösung für alle beteiligten Akteure. In Abbildung 9.9 wird die neue Standortsituation grafisch dargestellt. Die Kostenersparnis ist ebenfalls auf die Reallokation der Lagerstandorte, verursacht durch die Errichtung von einem bzw. zwei Regionallagern, zurückzuführen.



**Abbildung 9.9:** Optimale Lösung für das Szenario mit 3 potentiellen Regionallagern mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 8 % bei 10 % Rückflussquote

### 3. Ergebnisse für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten

In Tabelle 9.21 wird eine Übersicht der Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten dargestellt. Auf der Basis einer Gegenüberstellung der Tabellen 9.13 und 9.21 kann festgehalten werden, dass im Bereich der Gesamtkosten für das jeweilige Szenario Ersparnisse in Höhe von 9,62 Mio. €, 9,41 Mio. € und 8,49 Mio. € erzielt werden konnten. Diese Kostenreduktion beruht analog zu den vorangegangenen Szenarien auf der Errichtung der Regionallager und der daraus resultierenden Restrukturierung des Netzwerks. Ferner kann beobachtet werden, dass mit steigender Nachfrage die Anzahl der errichteten Regionallager zunimmt.

**Tabelle 9.21:** Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Kundenachfrage um 16 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen

		Szenario 5 % Rückfluss	Szenario 7 % Rückfluss	Szenario 10 % Rückfluss
Berechnungs- dauer	Sekunden	3,4	2,1	177,5
Lösungsgüte	in %	0,0099	0,0098	0,0099
Gesamtkosten	Mio €	806,07	786,10	755,26
Variable Betriebskosten	Mio €	548,31	543,39	534,57
Fixe Errichtungs- und Kapazitäts- erweiterungskosten	Mio €	269,81	264,75	257,64
Transportkosten	Mio €	12,90	12,90	12,95
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	24,95	34,93	49,90
	errichtet	4/10	5/10	3/10
Vertriebslager	erweitert	3/4	5/5	2/3
Armaturenwerk	geschlossen	6/10	5/10	7/10
	errichtet	8/20	7/20	7/20
Zentrallager	erweitert	8/8	7/7	6/7
Kunde	geschlossen	12/20	13/20	13/20
Regionallager	errichtet	2/3	2/3	2/3

In Abbildung 9.10 wird das vorteilhafteste Szenario für alle beteiligten Akteure grafisch

dargestellt. Durch die Errichtung der Regionallager 1 und 2 wird die Netzwerkstruktur bezüglich der Lagerhaltung mehr und mehr zentralisiert. Die Kooperation zwischen den Armaturenherstellern und Kunden wird somit weiter ausgebaut.



**Abbildung 9.10:** Optimale Lösung für das Szenario mit 3 potentiellen Regionallagern mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 16 % bei 10 % Rückflussquote

#### 4. Ergebnisse für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei unterschiedlichen Rückflussquoten

In Tabelle 9.22 werden die Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei unterschiedlichen Rück-

flussquoten übersichtlich dargestellt. Vergleicht man die Gesamtkosten in Tabelle 9.16 mit denen der Tabelle 9.22, so kann man beobachten, dass sich die Gesamtkosten der jeweiligen Szenarien um 10,78 Mio. €, 10,23 Mio € und 9,8 Mio € reduziert haben. Diese Kostenersparnis ist erneut auf die errichteten Regionallager 1 und 2 und die daraus resultierende Reduktion der fixen Errichtungs- und Erweiterungskosten zurückzuführen. Obwohl das Szenario mit 10 % Rückflussquote bezüglich der Gesamtkosten die geringste Ersparnis aufweist, ist es dennoch das Vorteilhafteste für alle beteiligten Akteure, wenn man die Standortsituation der Armaturenwerke und Armaturenwerkstätten einbezieht.

**Tabelle 9.22:** Kennzahlen für das Szenario mit drei potentiellen Regionallagern und einer Steigerung der Kundenachfrage um 24 % bei geringer, mittlerer und hoher Rückflussquote der Altarmaturen

		Szenario 5 % Rückfluss	Szenario 7 % Rückfluss	Szenario 10 % Rückfluss
Berechnungs- dauer	Sekunden	1,1	1,3	4,8
Lösungsgüte	in %	0,0098	0,0098	0,0099
Gesamtkosten	Mio €	877,29	852,55	815,16
Variable Betriebskosten	Mio €	586,79	580,80	572,36
Fixe Errichtungs- und Kapazitäts- erweiterungskosten	Mio €	304,40	296,09	282,68
Transportkosten	Mio €	12,78	13,00	13,46
Ersparnis durch Aufarbeitung	Mio €	26,67	37,34	53,34
Vertriebslager	errichtet	7/10	6/10	4/10
Armaturenwerk	erweitert	5/7	6/6	3/4
Zentrallager	geschlossen	3/10	4/10	6/10
Kunde	errichtet	10/20	9/20	8/20
Regionallager	erweitert	10/10	9/9	8/8
	geschlossen	10/20	11/20	12/20
	errichtet	2/3	2/3	2/3

In Abbildung 9.11 wird das zuvor erläuterte Szenario grafisch dargestellt. Hierbei fällt auf, dass durch die Errichtung der beiden Regionallager sehr viele Zentrallager eingespart werden konnten. Auch einige Armaturenhersteller profitierten von der Kooperation der Kunden im Bereich der Lagerhaltung und konnten ihrerseits kleine Vertriebslager schließen und liefern jetzt ihre Industriearmaturen direkt in das jeweilige Regionallager. Somit

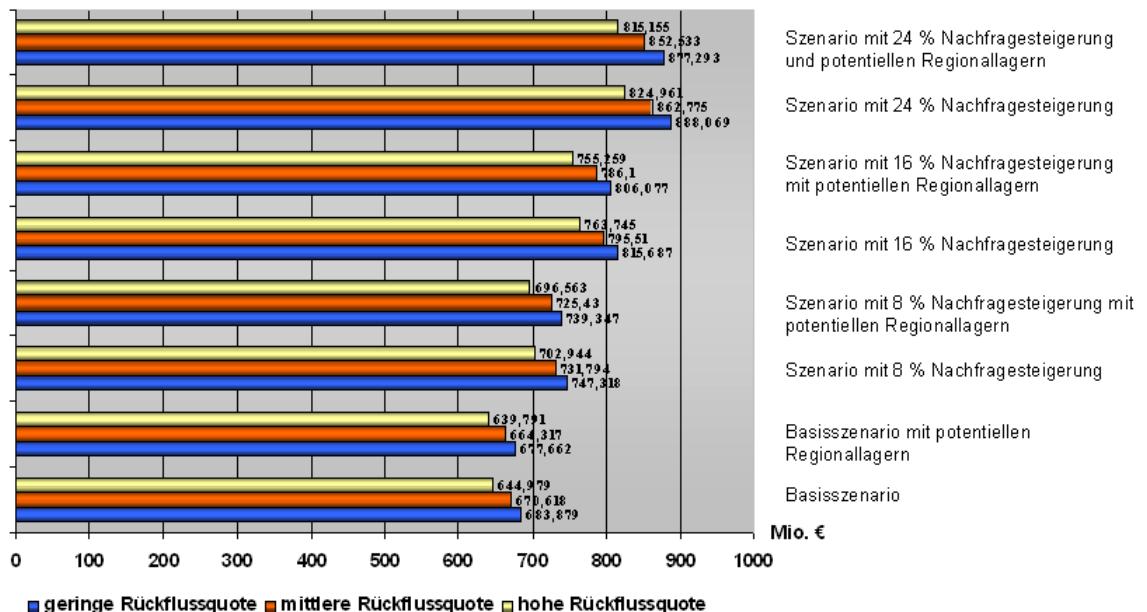
fand ein Wandel von der eher dezentralen zur zentralen Lagerhaltungstrategie statt. Des Weiteren kann man feststellen, dass die Effektivität der Regionallager mit steigender Nachfrage zunimmt. Durch diese Maßnahmen war es möglich Bullwippeffekte und unnötig hohe Sicherheitsbestände zu reduzieren sowie die schlechte Auslastung der Zentrallager zu verbessern.



**Abbildung 9.11:** Optimale Lösung für das Szenario mit 3 potentiellen Regionallagern mit einer Steigerung der Gesamtnachfrage um 24 % bei 10 % Rückflussquote

### 9.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abschließend sind in Abbildung 9.12 noch einmal die Gesamtkosten der unterschiedlichen Szenarien zusammengefasst. Die Vorteilhaftigkeit einer hohen Rückflussquote ist unabhängig vom jeweiligen Szenario gut erkennbar. Die Reduktion der Gesamtkosten lässt sich durch die positive Korrelation der aufgearbeiteten Industriearmaturen mit der Rückflussquote erklären. Weitere Kostenreduktionen konnten durch die kooperative Nutzung von großen Regionallagern und die daraus resultierende Restrukturierung der Lagerstandorte erzielt werden. In erster Linie profitierten hiervon die Kunden und die Armaturenhersteller.



**Abbildung 9.12:** Vergleich der szenarioabhängigen Gesamtkosten in Mio. €

Im Rahmen der Einzelbetrachtung konnte gezeigt werden, dass die großen Armaturenhersteller und Armaturenaufarbeiter ihre Kapazitäten sowie Marktanteile zu Lasten der kleineren Betriebe ausbauten. Allerdings: Je größer die Nachfrage nach Neuarmaturen und je höher die Rückflussquote der aufzuarbeitenden Industriearmaturen, desto positiver entwickelte sich die Lage für die kleineren Betriebe. Durch die Optimierung des Reverse-Logistik-Netzwerkes und die daraus resultierenden Reallokationen der Standorte im Bereich der Armaturenwerke, Armaturenaufarbeiter sowie der Lagerhaltung liegt nun eine eher zentralisierte Netzwerkstruktur vor. Dies bedeutet, dass das optimierte Reverse-Logistik-Netzwerk weniger Standorte in allen Segmenten aufweist.

Für politische Entscheidungsträger ergeben sich daraus folgende Handlungsempfehlungen. Der Bau von Aufarbeitungsanlagen für Industriearmaturen sollte durch staatliche Investitionszuschüsse z.B. im Rahmen eines Umweltschutzprogramms oder durch fiskalische Maßnahmen des Bundes gefördert werden. Des Weiteren sollte durch eine bundeseinheitliche Einführung einer zeitlich ansteigenden Quote für die Nutzung von aufgearbeiteten Industriearmaturen die Rückflussquote aufzuarbeitender Industriearmaturen sukzessive erhöht werden. Durch die schrittweise Steigerung der Rückflussquote und der damit verbundenen vermehrten Nutzung von aufgearbeiteten Armaturen werden Rohstoffressourcen geschont, Emissionen verringert und Energie eingespart. Ferner sollte die Entwicklung aufarbeitungsfreundlicher Industriearmaturen staatlich gefördert werden.

Für die Industriearmaturenbranche und deren Kunden können die folgenden Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die Kunden sollten alle möglichen Einsparmaßnahmen, die mit der Nutzung der Armaturenaufarbeitung erzielt werden können, ausschöpfen. Im Bereich der Lagerhaltung sollten, sofern vorhanden, bestehende Kooperationsverträge ausgebaut bzw. neue geschlossen werden. Durch die Bildung von Aufarbeitungskooperationen ist die Realisierung einer zentralen Aufarbeitungsanlage für Industriearmaturen möglich.

## 9.4 Kritische Würdigung

Nach der Anwendung des Reverse-Logistik-Standortplanungsmodells auf die Problematik der Industriearmaturenbranche wird in diesem Abschnitt das entwickelte Modell einer kritischen Diskussion, bezüglich der wissenschaftlichen Erkenntnisse, unterzogen. Hierbei wird die entwickelte Methodik hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf weitere Problemstellungen betrachtet.

### 9.4.1 Modellkritik

Das Reverse-Logistik-Standortplanungmodell erwies sich für alle untersuchten Szenarien, unabhängig von der Anzahl der szenarioabhängigen Variablen, als gut handhabbar. Wird eine sehr große Anzahl potentieller Standorte für Armaturenwerke, Lager und Armaturenwerkstätten zu Grunde gelegt, ist die Ermittlung des Datenmaterials und dessen Implementierung sehr zeitintensiv. Zur Lösung der jeweiligen Standortplanungsprobleme mittels der Software Xpress-Ive reichen die Ressourcen eines handelsüblichen PC vollkommen aus.

Die Vernachlässigung der Warenflüsse für die zu verschrottenden Armaturengehäuse,

metallischen Verschleißteile und Dichtungen, die in den betrachteten Reverse-Logistik-Netzwerken der Industriarmaturenbranche existieren, stellt eine Simplifizierung der Realität dar. Vor dem Hintergrund der strategischen Standortplanung erweist sich diese vereinfachte Darstellung als hinreichend gut, da diese geringen Warenflüsse praktisch keinen Einfluss auf die strategischen Standortallokationen haben.

Die diskrete Betrachtung der Standorte und Kapazitätsbereiche erwies sich als notwendig, da die fixen Errichtungs- und Kapazitätserweiterungskosten sowie die variablen Betriebskosten in allen untersuchten Szenarien einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten haben. Durch die Anpassungsmöglichkeiten im Bereich der Fertigungs-, Lager- und Aufarbeitungskapazität wird die Flexibilität des Modells erhöht, da auf Nachfragereschwankungen und deren Auswirkungen besser reagiert werden kann. Die hierbei anfallenden Transportkosten können vernachlässigt werden. Die Gesamtkosten über alle Szenarien hinweg waren bei höheren Rückflussquoten an aufzuarbeitenden Industriarmaturen deutlich niedriger.

#### **9.4.2 Übertragbarkeit auf weitere Problemstellungen**

In dieser Arbeit wurde auf der Basis eines mehrstufigen Warehouse-Location-Problems und bereits vorhandener Modelle für CLSCs ein neues gemischt ganzzahliges Standortplanungsmodell zur strategischen Gestaltung von Reverse-Logistik-Netzwerken der Industriarmaturenbranche entwickelt. Im Rahmen der Modellentwicklung wurden Anregungen im Bereich der Modellansätze von Dekker/Fleischmann/Inderfurth/Van Wassenhove 2004, S. 73 [34], Spengler/Schröter 2005, S. 1-30 [122], Fandel/Rudolph 2005, S. 31-58 [47], Tuma/Lebreton 2005, S. 59-75 [138] miteinbezogen und die Überlegungen von Marin und Pelegrin (1998) [81], wobei der Warenrückfluss einem fixen Anteil der Nachfrage entspricht, berücksichtigt. Des Weiteren steht es im Einklang mit den Anforderungen des BImSchG und der darin enthaltenen Verwaltungsvorschrift TA-Luft, der IPPC Direktive und dem Clean Air Act, die es bei der Aufarbeitung von Industriarmaturen zu beachten gilt.

Das Modell erweist sich, wie in den Abschnitten 9.2.2 bis 9.2.3 aufgezeigt wird, als leistungsstarkes Entscheidungsinstrument zur strategischen Standortplanung in Reverse-Logistik-Netzwerken sowie bei der Interpretation der ermittelten Ergebnisse. Durch die Anwendung des Modells konnten zukünftige Szenarien für die Industriarmaturenbranche analysiert werden und daraus konkrete Handlungsempfehlungen für die beteiligten Akteure erarbeitet werden.

Mit Hilfe des Modells wird aufgezeigt, dass die Transportkosten kaum einen Einfluss auf die jeweilige Standortallokation haben. Firmenübergreifende Kooperationen im Bereich der Lagerhaltung dagegen führen zu einer deutlichen Kostenreduktion. Des Weiteren kann

festgehalten werden, dass je höher die Rückflussquote für aufzuarbeitende Industriearmaturen ist, desto höher ist auch die Ersparnis. Außerdem können mittels des entwickelten Modells konkrete Vorschläge für die logistischen und organisatorischen Problemstellungen konzipiert werden.

Eine Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes z.B. auf Automobil- oder Elektronikindustrie bedarf branchenspezifischer Modifikationen im Bereich der Zielfunktion und der Nebenbedingungen. Nach einer problemadäquaten Parameterisierung kann das Modell für die jeweilige Branche eingesetzt werden. Besonderes Augenmerk ist auf die genaue Ermittlung der fixen Errichtungs-, Kapazitätserweiterungs- und der laufenden Betriebskosten sowie die Entwicklung der Nachfrage und der Rückflussquote für das entsprechende Produkt zu legen, um verwertbare Ergebnisse für die strategische Standortplanungsproblematik bei der Gestaltung von Reverse-Logistik-Netzwerken zu erhalten.

# 10 Zusammenfassung und Ausblick

## 10.1 Fazit

Die Schonung der Ressourcen und die Reinhaltung der Luft nach TA-Luft sind aktuelle Themen in der Wirtschaft und der Politik. Kreislaufwirtschaftssysteme und Reverse-Logistik-Netzwerke tragen maßgeblich dazu bei, Reststoffe oder Altprodukte sachgerecht zu verwerten bzw. aufzuarbeiten. Sie dienen ebenfalls als Planungsinstrument, um die dabei auftretenden logistischen Prozesse und organisatorischen Funktionen zu optimieren. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines gemischt ganzzahligen Modells zur strategischen Standortplanung von Reverse-Logistik-Netzwerken und dessen exemplarische Anwendung auf die Industriarmaturenbranche unter Berücksichtigung der bestehenden Gesetze, Richtlinien und Aufarbeitungsvorschriften.

Zu Beginn der Arbeit wird der Begriff der Reverse-Logistik als Segment der Unternehmenslogistik näher erläutert. Hierbei werden die logistischen Prozesse des jeweiligen Teilbereichs der Unternehmenslogistik differenziert. Danach werden methodisch und übersichtlich die Grundlagen des Netzwerkdesigns für Supply- und Closed-Loop-Supply Chains analysiert. Im nächsten Abschnitt werden die Unterschiede zwischen Recycling und Aufarbeitung aufgezeigt, in diesem Zusammenhang wird besonders auf das Produkt- und Materialrecycling eingegangen.

Zur Lösung der in der Industriarmaturenbranche existierenden Problemstellung werden die zentralen Gesetze, Verordnungen und Normen, die es im Rahmen der Armaturenaufarbeitung zu berücksichtigen gilt, untersucht. Von entscheidender Bedeutung für die industrielle Armaturenaufarbeitung sind die Europäische Druckgeräte Richtlinie (DGRL) und die in der Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) enthaltene erste allgemeine Verwaltungsvorschrift TA-Luft. Ferner werden noch die wichtigsten Normen und Regelwerke betrachtet.

Des Weiteren wird eine Branchen- und Markanalyse für Industriarmaturen durchgeführt. Dabei wird im Einzelnen auf die Wachstumsraten der Gesamtarmaturenproduktion von 1999 bis 2005, die Aufteilung der Armaturenproduktion in die jeweiligen Armaturensegmente in 2005 und deren Umsatzentwicklung von 2000 bis 2005 sowie der Exportentwicklung des Jahres 2006 im Vergleich zum Vorjahr näher eingegangen. Ferner werden

die Aspekte bei der Armaturenauswahl, die Dichtungssysteme, die Unterteilung der Industriearmaturen in Armaturenklassen, die Gründe für Schäden bei Industriearmaturen und die Eigenschaften und Gefahrenpotentiale von Durchflussmedien behandelt.

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der wirtschaftlichen Betrachtung der Armaturenaufarbeitungsbranche für den Zeitraum von 2003 bis 2005. Darüber hinaus wird auf die Entwicklung von Kreislaufarmaturen und die daraus resultierenden Lebenszykluskosten näher eingegangen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen in der Praxis vorherrschenden Netzwerkstrukturen bei der Armaturenaufarbeitung vorgestellt. Abschließend werden die Arbeitsprozesse im Rahmen der Armaturenaufarbeitung sowie das Einsparpotential beleuchtet.

Auf der Basis der Branchen- und Marktanalyse ergibt die Auswertung der Problemstruktur für die Industriearmaturenbranche, dass im Rahmen der strategischen Planung von Reverse-Logistik-Netzwerken eine Standort-, Kapazitäts- und Transportoptimierung für neu zu errichtende oder zu erweiternde Armaturenwerke, Lager und Armaturenwerkstätten durchzuführen ist.

Zunächst wird ein Überblick über die verschiedenen Standortplanungsprobleme und die dazugehörigen Lösungsmethoden gegeben. Danach werden diese Ansätze hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die Problemstruktur untersucht. Bei der Entwicklung des Modells werden Anregungen des bekannten Warehouse-Location-Problems und von bereits existierenden Closed-Loop-Supply Chain Ansätzen so modifiziert, dass sie auf die spezielle Problemformulierung der Industriearmaturenbranche angewendet werden können. Das erstellte strategische Planungsmodell wird in dieser Arbeit exemplarisch auf die Fertigung und Aufarbeitung von Industriearmaturen deutschlandweit unter Vernachlässigung des Exports angewendet, wodurch erstmalig für die Industriearmaturenbranche eine ökonomische Evaluation der zukünftig zu gestaltenden Reverse-Logistik-Netzwerke unter simultaner Berücksichtigung von Standortwahl für zu errichtende Armaturenwerke, Lager und Armaturenwerkstätten, Kapazitäts- und Transportentscheidungen vorgenommen wird.

Mit Hilfe des Modells konnte aufgezeigt werden, dass die fixen Errichtungs- und Kapazitätserweiterungskosten den größten Einfluss auf die Standortallokationen haben. Die Transportkosten hingegen können praktisch vernachlässigt werden. Weitere Kostenreduktionen konnten mit Kooperationen im Bereich der Lagerhaltung und bei einer Erhöhung der Rückflussquote für die aufzuarbeitenden Industriearmaturen erzielt werden. Hier kommt das Erfolgsmodell „Einsparung durch Aufarbeitung“ zum Tragen. Im Rahmen der Einzelbetrachtung wurde herausgearbeitet, was die beteiligten Akteure gewonnen bzw. verloren haben. Abschließend werden auf der Basis der vorliegenden Ergebnisse Handlungsempfehlungen für die politischen Entscheidungsträger und die beteiligten Akteure der Industriearmaturenbranche abgeleitet.

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Anwendung des entwickelten Standortplanungsmodells in der Praxis ist, dass die Entscheidungsträger des Reverse-Logistik-Netzwerks über die Nutzung der neuen und aufgearbeiteten Industriarmaturen zu entscheiden haben (Einkauf, Produktion, Ersatzteilmanagement, Technische Fachzentren), in das Projekt zur problem- und unternehmensspezifischen Anpassung des Modells integriert werden. Dadurch können Vorurteile gegenüber den aufgearbeiteten Armaturen abgebaut und ein abteilungsübergreifendes Problemverständnis und ein gemeinsamer Maßnahmenplan zur effizienten Gestaltung eines Reverse-Logistik-Netzwerkes für die Industriarmaturenbranche entwickelt werden. Unternehmen, die dieses Entscheidungsinstrument in ihre strategischen Planungen mit einbeziehen, werden wirtschaftliche Vorteile erlangen können.

## **10.2 Weiterer Forschungsbedarf**

Gegenstand der bisherigen Diskussion war die Standortplanung in Reverse-Logistik-Netzwerken für die Industriarmaturenbranche innerhalb Deutschlands. Das Ziel der weiteren Forschung auf dem Gebiet der Reverse-Logistik sollte deshalb darin bestehen, Ansätze zu entwickeln, die Importe und Exporte berücksichtigen, unabhängig davon auf welche Branche das Modell angewendet wird. Des Weiteren sollte die Standortplanung global möglich sein. Erst dadurch kann ermittelt werden, ob eventuell noch größere Einsparpotentiale unter Gewährleistung der Qualitätsstandards zu erzielen sind.

# Literaturverzeichnis

- [1] AKINC, U. ; KHUMAWALA, B. M.: An efficient branch and bound algorithm for the capacitated warehouse location problem. In: *Management Science* Nr. 23 (1977), S. 585–594
- [2] ALBERTI, G.: Normen und Regelwerke für Industriarmaturen. In: *Industriarmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 434–445
- [3] ARNOLDS, H. ; HEEGE, F. ; TUSSING, W.: *Material und Einkauf*. Nr. 10. Wiesbaden : Gabler Verlag, 1998
- [4] AURICH, Jan C. ; GOSSMANN, M. ; GÜNTER, K.: Life Cycle Costing von Industriarmaturen. In: *Industriarmaturen* Nr. 2 (2006), S. 137–142
- [5] BAKER, B.M.: A partial dual algorithm for the capacitated warehouse location problem. In: *J. of OR*. Nr. 23. 1986, S. 48–56
- [6] BAMBERG, G. ; A.G., Coenenberg.: *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. Nr. 3. München : Vahlen Verlag, 1981
- [7] BARROS, A. I. ; DEKKER, R. ; SCHOLTEN, V.: A two-level network for recycling sand: A case study. In: *European Journal of Operational Research* Nr. 110 (1998), S. 199–214
- [8] BEASLEY, J.E.: An algorithm for solving large capacitated warehouse location problems. In: *J. of OR*. Nr. 33. 1988, S. 314–325
- [9] BECHTEL, K.: *TA Luft und die Auswirkungen auf Dichtungssysteme*. Eagle Burgmann, Gendorf, 2007
- [10] BEITZ, W. ; HOVE, U. ; POURSHIRAZI, M.: *Altteileverwendung im Automobilbau, Schriftreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)*. Nr. 24. Frankfurt/Main, 1982
- [11] BERGER, T. ; DEBAILLIE, B.: *Location of disassembly centers for re-use to extend an existing distribution network*. University of Leuven, Belgium : Masters thesis, 1997
- [12] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *VDI 2220: Produktplanung - Ablauf, Begriffe und Organisation* -. Berlin, 1980

- [13] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin, 1993
- [14] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *VDI 2222: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin, 1997
- [15] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *VDI 2440: Emissionsminderung Mineralölraffinerien, Reinhaltung der Luft*. Berlin, 2000
- [16] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *EN ISO 10628:2000 Fließschemata für verfahrenstechnische Anlagen*. Berlin, 2001
- [17] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *EN ISO 1092-1:2002 Flansche und ihre Verbindungen*. Berlin, 2002
- [18] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *VDI 2884: Beschaffung, Betrieb, und Anwendung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)*. Berlin, 2003
- [19] BEUTH VERLAG (Hrsg.): *EN 60300-3-3 Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten*. Berlin, 2005
- [20] BEYER, A.: *Nachhaltigkeit und Umweltbildung*. Nr. 2. Hamburg: Krämer, 2000
- [21] BICHLER, K. ; KROHN, R.: *Beschaffungs- und Lagerwirtschaft*. Nr. 8. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2001
- [22] BLOECH, J. ; PHYSICA-VERLAG (Hrsg.): *Optimale Industriestandorte*. Würzburg-Wien, 1970
- [23] BLOECH, J. ; IHDE, G.B.: *Vahlens Großes Logistiklexikon*. Nr. 1. München : Verlag Franz Vahlen GmbH, 1997
- [24] BOERS, A. ; RICHTER, F.: *Müll schafft Märkte*. FHTW Berlin, 2005
- [25] BOFFEY, T.B.: Location Problems arising in computer networks. In: *J. of Opl. Res. Society*. Nr. 40. 1989, S. 347–354
- [26] BRENCK, A. ; RUTKOWSKY, S. ; ZIEGLER, M. ; WEILAND, R.: *Entsorgungslogistik*. Nr. 1. Münster : Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster 1996, 1996
- [27] BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE ; BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Recycling durch Aufarbeiten technischer Produkte in Austauscherzeugnisfertigung, Phase I und II, Forschungsbericht T86-122, Technologische Forschung und Entwicklung*. Bonn, 1986
- [28] BUSCH, A. ; W., Dangelmaier: *Integriertes Supply Chain Management: Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*. Nr. 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2002
- [29] CARRINGTON, R.: *Product recycling value and recyclability index for products*. Lund (Schweden), 1996

- [30] CHRISTEN, H. R.: Metalle. In: *Struktur Stoff Reaktion* Bd. Nr. 1. Otto Salle Verlag, 1974, S. 295–319
- [31] CHRISTOFIDES, N. ; ACADEMIC PRESS (Hrsg.): *An Algorithmic Approach.* New York-London-San Francisco, 1975
- [32] CORNUEJOLS, G. ; SHRIDHARAN, R. ; THIZY, J.M.: A comparison of heuristics and relaxations for the capacitated plant location problem. In: *European J. of OR.* Nr. 50. 1991, S. 280–297
- [33] CORSTEN, H. ; GÖTZELMANN, F. ; BFUP BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE FORSCHUNG UND PRAXIS; NWB VERLAG (Hrsg.): *Abfallvermeidung und Reststoffverwertung; Eine produkt- und verfahrensorientierte Analyse.* Nr. 2. Herne, 1992
- [34] DEKKER, R. ; FLEISCHMANN, M. ; INDERFURTH, K. ; VAN WASSENHOVE, L. N.: *Reverse Logistics.* Nr. 1. Berlin, Heidelberg, New York : Springer Verlag, 2004
- [35] DICK, S.: Unterteilung der Armaturenklassen - weichgedichtete Kugelhähne. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 118–126
- [36] DIEKMANN, A.: *Empirische Sozialforschung.* Nr. 6. Reinbek bei Hamburg : Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, 2000
- [37] DINKELBACH, W. ; MI-VERLAG (Hrsg.): *Entscheidungstheorie.* Landsberg am Lech, 1982
- [38] DOMSCHKE, W. ; DREXL, A.: *Logistik: Standorte.* Nr. 4. München Wien : Oldenbourg Verlag, 1996
- [39] DOMSCHKE, W. ; DREXL, A.: *Einführung in Operations Research.* Nr. 6. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2004
- [40] DOMSCHKE, W. ; SCHOLL, A. ; VOSS, S.: *Produktionsplanung.* Nr. 1. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1993
- [41] DREWS, R.: *Organisationsformen der Produktionslogistik.* Nr. 1. Aachen : Shaker Verlag, 2006
- [42] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung.* Nr. 2. München Wien : Hanser Fachbuchverlag, 2002
- [43] EL-SHAIEB, A.M.: The Single Source Weber Problem - Survey and Extensions. In: *Operational Research Quarterly.* Nr. 29. 1978, S. 469–476
- [44] ERNST, W.: Befederte Dichtsysteme bei Armaturen für extreme Anwendungen. In: *Praxis-Handbuch Industriearmaturen 2003* Bd. 1. Vulkan Verlag GmbH, 2003, S. 236–241
- [45] EVERSHIM, W.: *Innovationsmanagement für technische Produkte.* Nr. 1. Berlin : Springer Verlang, 2002

- [46] FANDEL, G. ; P., François ; K.-M., Gubitz: *PPS- und integrierte betriebliche Softwaresysteme*. Nr. 2. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1997
- [47] FANDEL, G. ; RUDOLPH, A.: Die Integration von Separierungs- und Aufarbeitungsprozessen in die optimale Demontageplanung. In: *ZfB Reverse Logistics I*. Hrsg. G. Fandel und J. Reese, 2005, S. 31–58
- [48] FLEISCHMANN, B.: Operations-Research-Modelle und Verfahren in der Produktionsplanung. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* Nr. 58 (1988), S. 347–372
- [49] FLEISCHMANN, M. ; BEULLENS, P. ; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M. ; VAN WASSENHOVE, L. N.: The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design. In: *Production and Operations Management* Nr. 10 (2001), S. 156–173
- [50] GLASER, H.: *Material- und Produktionswirtschaft*. Nr. 3. Düsseldorf, 1996
- [51] GLASER, H. ; L., Petersen;: PPS (Produktionsplanung und -steuerungs)-Systeme. In: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft* Bd. Nr. 2. Schäfer-Poeschel Verlag, 1996, S. 1406–1417
- [52] GOLDMAN, A.J.: Optimal Center Location in Simple Network. In: *Transportation Science*. Nr. 5. 1971, S. 212–221
- [53] GOMORY, R.: Early Integer Programming. In: *Operations Research*. Volume 50 Nummer 1. 2002, S. 78–81
- [54] HÄBERLE, M.: *Betriebswirtschaftliche Analyse des Recycling*. Nr. 1. Lohfelden : Dr. Jan Uthermark Verlag, 1996
- [55] HAKIMI, S. L.: Optimum location of switching centers and the absolute centers and the medians of a graph. In: *Operations Research* Nr. 12 (1964), S. 450–459
- [56] HAKIMI, S. L.: Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. In: *Operations Research* Nr. 13 (1965), S. 462–475
- [57] HAKIMI, S.L. ; SCHMEICHEL, E.F. ; PIERCE, J.G.: On p-Centers in Networks. In: *Transportation Science*. Nr. 12. 1978, S. 1–15
- [58] HANDLER, G.Y. ; MICHANDANI, P.B. ; MIT PRESS (Hrsg.): *Location on Networks: Theory and Algorithms*. Cambrige(Mass.)-London, 1979
- [59] HARTMANN, H.: *Materialwirtschaft*. Nr. 8. Gernsbach : Deutscher Betriebswirte Verlag, 2002
- [60] HOCHBAUM, D.S.: Heuristics for fixed cost median problem. In: *Math. Programming*. Nr. 22. 1982, S. 148–162
- [61] HÖLKER, H. B.: EG Richtlinien. In: *Industriearmaturen 2000*. Nr. 1. 2000, S. 346–350

- [62] HOSAGE, C.M. ; GODCHILD, M.F.: Discrete space location-allocation solutions from genetic algorithms. In: *Annals of Oprns. Res.* Nr. 6. 1986, S. 35–46
- [63] HUMMELTENBERG, W. ; PHYSICA-VERLAG (Hrsg.): *Optimierungsmethoden zur betrieblichen Standortwahl*. Würzburg-Wien, 1981
- [64] IHDE, G.B.: *Transport, Verkehr, Logistik*. Nr. 2. München : Verlag Franz Vahlen GmbH, 1991
- [65] ISERMAN, H.: *Logistik (Gestaltung von Logistiksystemen)*. Nr. 2. Verlag moderne Industrie, 1998
- [66] J., Levy: An Extended Theorem for Location on a Network. In: *Operational Research Quarterly*. Nr. 18. 1967, S. 433–442
- [67] JACOBSEN, S. K.: Heuristics for the capacited plant location modell. In: *European Journal of Operational Research* Nr. 12 (1983), S. 253–261
- [68] JAHNKE, B.: *Betriebliches Recycling - Produktionswirtschaftliche Probleme und betriebswirtschaftliche Konsequenzen*. Wiesbaden, 1986
- [69] JOHN, M.: Zulassungsverfahren von Armaturen nach Einsatzzwecken. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 351–358
- [70] KAPOUN, J.: Logistik - ein moderner Begriff mit langer Geschichte. In: *Zeitschrift für Logistik* Nr. 2 (1981), S. 123–127
- [71] KLEINALTENKAMP, M.: *Recycling-Strategien, Wege zur wirtschaftlichen Verwertung von Rückständen aus absatz- und beschaffungswirtschaftlicher Sicht*. Berlin, 1985
- [72] KRIKKE, H. R. ; VAN HARTEN, A. ; SCHUUR, P. C.: Business case Océ: Reverse logistic network re-design for copiers. In: *OR Spektrum* Nr. 21 (1999), S. 381–409
- [73] KROMREY, H.: *Empirische Sozialforschung*. Nr. 9. Opladen : Leske + Budrich Verlag, 2000
- [74] KROON, L. ; VRIJENS, G.: Returnable containers: An example of reverse logistics. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* Nr. 25 (1995), S. 56–68
- [75] KLINGER SCHÖNEBERG (Hrsg.): *Montage- und Reparaturanleitung*. Nr. 1. Idstein, 2005
- [76] LAND, A.H. ; DOIG, A.G.: An automatic method of solving discrete programming problems. In: *Econometrica*. Nr. 28. 1960, S. 497–520
- [77] LANGE, R.: Industriarmaturen: Stand der Technik und Entwicklungstendenzen. In: *Praxis-Handbuch Industriarmaturen 2003* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2003, S. 20–28

- [78] LAY, G. ; RADMACHER, E. ; PHYSICA VERLAG (Hrsg.): *Life-Cycle-Costing-Tool als Instrument zur Kosten-/Nutzen-Betrachtung produktbegleitender Dienstleistungen*. Heidelberg, 2005
- [79] LETMATHE, P.: Kostenrechnerische Implikationen für verschiedene Forschungsfelder der Reverse Logistics. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Reverse Logistics II* Bd. 4. Hrsg. G. Fandel und J. Reese, 2005, S. 1–28
- [80] LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Nr. 1. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2004
- [81] MARIN, A. ; PELEGRI, B.: The return plant location problem: Modelling and resolution. In: *European Journal of Operational Research* Nr. 104 (1998), S. 375–392
- [82] MATTICK, R. ; DITTMER, T.: Auswahl nach Einsatzzweck und Beanspruchung. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 2–12
- [83] MATULA, D.W. ; KOLDE, R. ; BULLETIN, ORSA/TIMS (Hrsg.): *Efficient Multi-Median Location in Acyclic Network*. Nr. 2. Miami, Florida, 1976
- [84] MEYER, H.: *Recyclingorientierte Produktgestaltung, Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften, VDI-Z, Reihe 1*. Nr. 98. Düsseldorf, 1983
- [85] MINIEKA, E.: A Polynomial Time Algorithm for Finding the Absolute Median of a Network. In: *Networks*. Nr. 11. 1981, S. 351–355
- [86] MÜHLHALER, W. ; MÜHLHALER, S. ; LEINWEBER, A.: Recyclingverfahren für Industriearmaturen. In: *Industriearmaturen* Nr. 2 (2005), S. 115–120
- [87] MÜNCKEL, L.: Auswahl von Armaturen nach Medium und Betriebsparametern. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 13–28
- [88] MUSCHET, A.: Leitfaden zur Auswahl geeigneter Stellventile für industrielle Anlagen. In: *Praxis-Handbuch Industriearmaturen 2003* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2003, S. 126–157
- [89] NEMHAUSER, G. ; WOLESEY, L. ; WILEY INTERSCIENCE VERLAG (Hrsg.): *Integer and Combinatorial Optimization*. 1988
- [90] NEUMANN, K. ; MORLOCK, M. ; CARL HANSER VERLAG (Hrsg.): *Operations Research*. München Wien, 1993
- [91] NICKEL, S.: *Vorlesungsunterlagen: Standortplanung und strategisches Supply Chain Management*. Universität Saarbrücken, 2007
- [92] NICKEL, W.: *Recycling-Handbuch*. Nr. 1. Düsseldorf : VDI Verlag, 1996
- [93] OSMERS, U. ; WERNER, B.: Das Karlsruher Modell - Ingenieurfortbildung unter den Bedingungen des industriellen Strukturwandels zur Vermittlung einer ganzheitlichen Betrachtung von Produkt und Produktion wt -. In: *Produktion und Management* Nr. 9 (1996)

- [94] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; SPRINGER VERLAG (Hrsg.): *Konstruktionslehre*. Berlin/Heidelberg/New York, 1986
- [95] PALUPSKI, R.: *Management von Beschaffung Produktion und Absatz*. Nr. 2. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2002
- [96] PFEIFFER, W. ; SCHULTHEISS, B. ; STAUDT, E.: Recycling - Systematischer Ansatz zur Berücksichtigung von Wiederverwendungskreisläufen. In: *Systemtechnische Grundlagen und Anwendungen*. Nr. I/3. München : Hrsg. G. Ropohl, 1975
- [97] PFOHL, H.-C.: *Logistiksysteme*. Nr. 7. Heidelberg : Springer Verlag, 2003
- [98] PFOHL, H.-C. ; WÜBBENHORST, K.T.: Lebenszykluskosten - Ursprung, Begriff und Gestaltungsvariablen. In: *Journal für Betriebswirtschaft* Bd. 3. Springer Verlag, 1983, S. 142–155
- [99] PFOHL, H.-CH. ; BRAUN, G.E. ; DE GRUYTER VERLAG (Hrsg.): *Entscheidungstheorie*. Berlin-New York, 1981
- [100] PFOHL, H.-Chr. ; STÖLZLE, W.: Das Informationssystem der Entsorgungslogistik. In: *Ökonomische Risiken und Umweltschutz*. Hrsg. G. R. Wagner, 1992, S. 184–226
- [101] PFOHL, H.C.: *Logistiksysteme - Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Nr. 7. Berlin : Springer Verlag, 1996
- [102] PROBST, H.: Armaturenrecycling - entscheidende Vorteile für den Anwender. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 402–408
- [103] PROBST, H. ; PROBST GMBH, MASCHINENBAU - ARMATURENRECYCLING (Hrsg.): *Technische Aufarbeitungsbedingungen für die Instandhaltung von Standardarmaturen sowie der Umrüstung auf TA-Luft nach VDI 2440*. Nr. 2. Bad Dürkheim, 2005
- [104] R., Dekker ; FLEISCHMANN, M. ; K., Inderfurth ; N., Van Wassenhove L.: *Reverse Logistics: Quantitative models for closed-loop supply chain*. Nr. 1. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2004
- [105] REALFF, M. J. ; AMMONS, J. C. ; NEWTON, D.: Carpet recycling: Determining the reverse production system design. In: *The Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering* Nr. 38 (1999), S. 547–567
- [106] REICHWALD, R. ; DIETEL, B.: Produktionswirtschaft. In: *Industriebetriebslehre - Entscheidungen im Industriebetrieb* Bd. Nr. 8. Hrsg. E. Heinen, 1991, S. 395–622
- [107] REMZ, R.: *Grundlagen des Recyclings, Skriptum zur Vorlesung Grundlagen des Recyclings*. Uni Kaiserslautern, 2001
- [108] RIEDL, A.: Industrikunststoffe und neue Dichtungswerkstoffe. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 107–115

- [109] RÜCKLE, D. ; KLEIN, A.: Product-Life-Cycle-Cost Management. In: *Neuere Entwicklungen im Kostenmanagement*. Hrsg. K. Dellman, 1994, S. 355–367
- [110] SALKIN, H. ; MATHUR, K.: *Foundations of integer programming*. North Holland, New York, Amsterdam, London, 1989
- [111] SCHÄPPI, B. ; ANDREASEN, M. M. ; KIRCHGEORG, M. ; RADERMACHER, F.-J.: *Handbuch Produktentwicklung*. Nr. 1. München Wien : Hanser Fachbuchverlag, 2005
- [112] SCHILDT, B. ; DEUTSCHER UNIVERSITÄTS VERLAG (Hrsg.): *Strategische Produktions- und Distributionssysteme - Betriebliche Standortoptimierung bei degressiv verlaufenden Produktionskosten*. Wiesbaden, 1994
- [113] SCHMIEMANN, A. ; INSTITUT FÜR RECYCLING, FACHHOCHSCHULE BS/WF (Hrsg.): *Abfallwirtschaft; Kurseinheit: Recycling/Stoffliche Abfallverwertung*. Nr. 1. Wolfsburg, 1989-1994
- [114] SCHOPEN, M. ; ZELASS, M.: *Script zur Kombinatorischen und Ganzzahligen Optimierung*. 1994
- [115] SCHREINER, M.: *Umweltmanagement in 22 Lektionen*. Wiesbaden, 1988
- [116] SCHUBERT, H. ; ZIEGAHN, K.F. ; HIRTH, T.: *Strategische Aspekte der Kreislaufwirtschaft und Beschreibung spezifischer Handlungsfelder*. Pfinztal, 1997
- [117] SCHULTE, C.: *Logistik*. Nr. 4. München : Vahlen Verlag, 2005
- [118] SCHULTE, G.: *Material und Logistikmanagement*. Nr. 2. München Wien : Oldenbourg Verlag, 2001
- [119] SEMMELROGGEN, H.G.: Logistik-Geschichte: Moderner Begriff mit Vergangenheit. In: *Logistik im Unternehmen* Nr. 2 (1988), S. 6–9
- [120] SIESTRUP, G.: *Produktkreilaufsysteme*. Nr. 1. München Wien : Erich Schmidt Verlag, 1999
- [121] SPENGLER, T. ; PÜCHERT, H. ; PENKUHN, T. ; RENTZ, O.: Environmental integrated production and recycling management. In: *European Journal of Operational Research* Nr. 97 (1997), S. 308–326
- [122] SPENGLER, T. ; SCHRÖTER, M.: Konzeption eines System Dynamics Modells zur strategischen Planung von Closed-Loop Supply Chains. In: *ZfB Reverse Logistics I*. Hrsg. G. Fandel und J. Reese, 2005, S. 1–30
- [123] SPENGLER, TH. ; ERICH SCHMIDT VERLAG (Hrsg.): *Industrielle Demontage und Recyclingkonzepte - Betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomischen effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten*. Berlin, 1994

- [124] SPRENGLER, T.: *Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte*. Nr. 1. Ettlingen : Erich Schmidt Verlag, 1994
- [125] SRIDHARAN, R.: A Lagrangian heuristic for capacitated plant location problem with side constraints. In: *J. of Opl. Res. Society*. Nr. 42. 1991, S. 579–585
- [126] STACHE, U.: *Redistributionsstrategien*. Nr. 1. Rinschede/Wehking, 1995
- [127] STEINHILPER, R.: *Produktrecycling im Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg, New York, 1988
- [128] STEVEN, M. ; LAARMANN, A.: Lerneffekte in der Entsorgungslogistik. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Reverse Logistics I* Bd. Nr. 3. Hrsg. G. Fandel und J. Reese, 2005, S. 95–115
- [129] STEVEN, M. ; TENGLER, S. ; KRÜGER, R.: Reverse Logistics. In: *Das Wirtschaftsstudium 32*. Lange Verlag in Düsseldorf, 2003, S. 643–647 u. 689–697
- [130] STÖLZLE, W.: Kostenbetrachtung. In: *Entsorgungslogistik in Fertigungsbetrieben. Notwendigkeit, Methoden, Beispiele*. VDI, 1992, S. 85–117
- [131] STÖLZLE, W.: *Umweltschutz und Entsorgungslogistik: theoretische Grundlagen mit ersten empirischen Ergebnissen zur innerbetrieblichen Entsorgungslogistik*. Berlin, 1993
- [132] STÖRK, J.: *Planungssysteme*. Universität Oldenburg, 2003
- [133] STREBEL, H. ; GÖRG, M.: Recycling. In: *Jahrbuch für Betriebswirtschaft*. Stuttgart : Hrsg. W. Kresse und W. Alt, 1981
- [134] STROHRMANN, G.: Stellarmaturen für Prozessautomatisierung. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 211–240
- [135] TEMPELMEIER, G.: *Produktion und Logistik*. Nr. 6. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2005
- [136] TERHART, K.: Betriebswirtschaftliche Fragen des Umweltschutzes. In: *WiSt*. Nr. 8. 1986, S. 401–405
- [137] THIERRY, M. C.: *An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies*. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, 1997
- [138] TUMA, A. ; LEBRETON, B.: Zur Bewertung und Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien. In: *ZfB Reverse Logistics I*. Hrsg. G. Fandel und J. Reese, 2005, S. 59–75
- [139] VAHRENKAMP, R.: *Quantitative Logistik für das Supply Chain Management*. Nr. 1. München Wien : R. Oldenbourg Verlag, 2003
- [140] VAHRENKAMP, R.: *Produktionsmanagement*. Nr. 5. München Wien : Oldenburg Verlag, 2004

- [141] VAHRENKAMP, R.: *Logistik: Management und Strategien*. Nr. 5. Münschen : Oldenbourg Verlag, 2005
- [142] VAHRENKAMP, R. ; OLDENBOURG VERLAG (Hrsg.): *Produktions- und Logistikmanagement*. München Wien, 2005
- [143] VDI VERLAG (Hrsg.): *VDI 1086: Entsorgungslogistik in Fertigungsbetrieben; Wege zur Kreislaufwirtschaft*. Düsseldorf, 1993
- [144] VDI VERLAG (Hrsg.): *VDI 2243: Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte*. Düsseldorf, 1993
- [145] VOGEL, K.-H.: *Das Steiner-Weber-Problem und Erweiterungen des Problems bei der Bestimmung optimaler Standorte*. Universität Hamburg, 1975
- [146] VOGEL, R.: *Internationale Emissionsgesetzgebung*. Burgmann Packings, Wolfrathshausen, 2004
- [147] VOGEL, R. ; DANNER, S.: Anwendungsverfahren mit Armaturenabdichtungen nach TA Luft. In: *Industriearmaturen* Nr. 3 (2005), S. 203–207
- [148] VOGEL, U.: Schmiedearmaturen. In: *Industriearmaturen 2000* Bd. Nr. 1. Vulkan-Verlag GmbH, 2000, S. 92–101
- [149] WANNENWETSCH, H.: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik*. Nr. 2. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2004
- [150] WANNENWETSCH, H. ; NICOLAI, S. ; GABLER VERLAG (Hrsg.): *E-Supply-Chain-Management*. Wiesbaden, 2002
- [151] WARNECKE, G.: *Multimediales Schulungskonzept zur systematischen recyclinggerechten Produktentwicklung*. Uni Kaiserslautern, 2000
- [152] WEBER, J. ; KUMMER, S.: *Logistikmanagement*. Nr. 2. Stuttgart : Schäffer-Poeschel Verlag, 1998
- [153] WEEGE, R.-D.: *Recyclinggerechtes Konstruieren*. Düsseldorf, 1981
- [154] WEINHEIMER NACHRICHTEN (Hrsg.): *EU will Klima-Vorreiter werden*. Weinheim, 10. März 2007
- [155] WERNER, H.: *Supply Chain Management*. Nr. 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2000
- [156] WHEELWRIGHT, S. ; CLARK, K. ; CAMPUS VERLAG (Hrsg.): *Revolution der Produktentwicklung*. Frankfurt am Main, 1998
- [157] WITTE, H.: *Materialwirtschaft*. Nr. 1. München : Oldenbourg Verlag, 2000
- [158] WODARA, G. ; KELLERMANN, H.: Anforderungen an Spindeldurchführungen von Armaturen nach TA Luft Ausgabe 2002. In: *Praxis-Handbuch Industriearmaturen 2003* Bd. Nr. 1. Vulkan Verlag GmbH, 2003, S. 216–235

- [159] WÖHE, G.: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Nr. 20. München : Verlag Vahlen, 2000
- [160] ZAHR, D.: Aufarbeitung von Altarmaturen - eine wirtschaftliche Alternative beim Einsatz von Armaturen in der chemischen Industrie. In: *Praxis-Handbuch Industriearmaturen 2003* Bd. Nr. 1. Vulkan Verlag GmbH, 2003, S. 282–289
- [161] ZÄPFEL, G. ; DE GRUYTER VERLAG (Hrsg.): *Taktisches Produktionsmanagement*. Berlin New York, 1989b
- [162] ZÄPFEL, G. ; H., Missbauer: Produktionsplanung und -steuerung für die Fertigungsindustrie. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* Nr. 9 (1987), S. 882–899
- [163] ZIMMERMANN: *Operations Research Methoden und Modelle*. Nr. 1. Braunschweig : Friedr. Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft, 1987

# Anhang

```
model ModelName
uses "mmxprs"

declarations
a: integer
b: integer
c: integer
d: integer
R: real
W: real
UK: real
NP: real
AP: real
UMNP: real
UMAP: real
end-declarations

initialisations from 'Reverse.dat'
a b c d R W NP AP UK UMNP UMAP
end-initialisations

declarations
aufarbeiter = 1..a
hersteller = 1..b
lager = 1..c
kunde = 1..d
FA: array(aufarbeiter) of real
FH: array(hersteller) of real
FL: array(lager) of real
FEA: array(aufarbeiter) of real
```

FEH: array(hersteller) of real

FEL: array(lager) of real

KA: array(aufarbeiter) of real

KH: array(hersteller) of real

KL: array(lager) of real

KEA: array(aufarbeiter) of real

KEH: array(hersteller) of real

KEL: array(lager) of real

KN: array(kunde) of real

TK1: array(lager,hersteller) of real

TK2: array(lager,kunde) of real

TK3: array(kunde,aufarbeiter) of real

TK4: array(aufarbeiter,kunde) of real

x1: array(hersteller,lager) of mpvar

x2: array(lager,kunde) of mpvar

x3: array(kunde,aufarbeiter) of mpvar

x4: array(aufarbeiter,kunde) of mpvar

y1: array(hersteller) of mpvar

y2: array(lager) of mpvar

y3: array(aufarbeiter) of mpvar

e1: array(hersteller) of mpvar

e2: array(lager) of mpvar

e3: array(aufarbeiter) of mpvar

**end-declarations**

forall (i in hersteller) y1(i) is\_binary

forall (j in lager) y2(j) is\_binary

forall (l in aufarbeiter) y3(l) is\_binary

forall (i in hersteller) e1(i) is\_binary

forall (j in lager) e2(j) is\_binary

forall (l in aufarbeiter) e3(l) is\_binary

**initialisations from 'Reverse.dat'**

TK1 TK2 TK3 TK4 KN FA FEA FH FEH FL FEL KA KEA KH KEH KL KEL

**end-initialisations**

## Zielfunktion

**kosten:=**

```
sum (i in hersteller) FH(i) * y1(i) +
sum (j in lager) FL(j) * y2(j) +
sum (l in aufarbeiter) FA(l) * y3(l) +
sum (i in hersteller) FEH(i) * e1(i) +
sum (j in lager) FEL(j) * e2(j) +
sum (l in aufarbeiter) FEA(l) * e3(l) +
sum (i in hersteller,j in lager) TK1(j,i) * x1(i,j) +
sum (j in lager,k in kunde) TK2(j,k) * x2(j,k) +
sum (k in kunde,l in aufarbeiter) TK3(k,l) * x3(k,l) +
sum (l in aufarbeiter,k in kunde) TK4(l,k) * x4(l,k) +
sum (i in hersteller,j in lager) UMAP * AP * x1(i,j) +
sum (l in aufarbeiter, k in kunde) UMAP * AP * x4(l,k) +
sum (j in lager, k in kunde) UK * x2(j,k) -
sum (l in aufarbeiter,k in kunde) (NP - AP) * x4(l,k)
```

## Restriktionen

```
forall (k in kunde) sum (j in lager) x2(j,k) + sum (l in aufarbeiter) x4(l,k) = KN(k)
forall (k in kunde) sum(l in aufarbeiter) x3(k,l) = R * KN(k)
forall (k in kunde) (sum (l in aufarbeiter) x4(l,k) = W * R * KN(k))
forall (j in lager) (sum (i in hersteller) x1(i,j) = sum (k in kunde) x2(j,k))
forall (i in hersteller) (sum (j in lager) x1(i,j) <= KH(i) * y1(i) + KEH(i) * e1(i))
forall (j in lager) (sum (i in hersteller) x1(i,j) <= KL(j) * y2(j) + KEL(j) * e2(j))
forall (l in aufarbeiter) (sum (k in kunde) x3(k,l) <= KA(l) * y3(l) + KEA(l) * e3(l))
forall (l in aufarbeiter) (sum (k in kunde) x4(l,k) <= KA(l) * y3(l) + KEA(l) * e3(l))
forall (i in hersteller) e1(i) <= y1(i)
forall (j in lager) e2(j) <= y2(j)
forall (l in aufarbeiter) e3(l) <= y3(l)
```

**minimize (kosten)**

```

writeln("Minimale Kosten: ",getobjval,"Mio. Euro")
forall (i in hersteller,j in lager | getsol(x1(i,j)) > 0)
writeln("x1("", "Armaturenwerk:", i, "Lager:", j,) = ", getsol (x1(i,j)), "[Stück]")
forall (j in lager,k in kunde | getsol(x2(j,k)) > 0)
writeln("x2("", "Lager:", j, "Kunde:", k,) = ", getsol (x2(j,k)), "[Stück]")
forall (k in kunde,l in aufarbeiter | getsol(x3(k,l)) > 0)
writeln("x3("", "Kunde:", k, "Aufarbeitungsanlage:", l,) = ", getsol (x3(k,l)), "[Stück]")
forall (l in aufarbeiter,k in kunde | getsol(x4(l,k)) > 0)
writeln("x4("", "Aufarbeitungsanlage:", l, "Kunde:", k,) = ", getsol (x4(l,k)), "[Stück]")
forall (i in hersteller | getsol(y1(i)) > 0)
writeln("y1("", "Ärmaturenwerk:", i,) = ", getsol (y1(i)),)
forall (j in lager | getsol(y2(j)) > 0)
writeln("y2("", "Lager:", j,) = ", getsol (y2(j)),)
forall (l in aufarbeiter | getsol(y3(l)) > 0)
writeln("y3("", "Aufarbeitungsanlage:", l,) = ", getsol (y3(l)),)
forall (i in hersteller | getsol(e1(i)) > 0)
writeln("e1("", "Armaturenwerk:", i,) = ", getsol (e1(i)),)
forall (j in lager | getsol(e2(j)) > 0)
writeln("e2("", "Lager:", j,) = ", getsol (e2(j)),)
forall (l in aufarbeiter | getsol(e3(l)) > 0)
writeln("e3("", "Aufarbeitungsanlage:", l,) = ", getsol (e3(l)),)

```