

**Ingela Tietze-Stöckinger**

# **Kosteneinsparpotenziale durch Erweiterung von betrieblichen Systemgrenzen**

dargestellt an Beispielen von Kooperationen  
aus den Bereichen Energieversorgung und  
Abfallentsorgung





Ingela Tietze-Stöckinger

**Kosteneinsparpotenziale durch Erweiterung von betrieblichen Systemgrenzen**

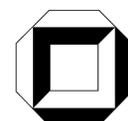
- dargestellt an Beispielen von Kooperationen aus den Bereichen Energieversorgung und Abfallentsorgung -



# **Kosteneinsparpotenziale durch Erweiterung von betrieblichen Systemgrenzen**

- dargestellt an Beispielen von Kooperationen aus den  
Bereichen Energieversorgung und Abfallentsorgung -

von  
Ingela Tietze-Stöckinger



Dissertation, genehmigt von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2005  
Referenten: Prof. Dr. O. Rentz, Prof. Dr. R. Studer

### **Impressum**

Universitätsverlag Karlsruhe  
c/o Universitätsbibliothek  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

[www.uvka.de](http://www.uvka.de)

© Universitätsverlag Karlsruhe 2005  
Print on Demand

ISBN 3-937300-52-X

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse von Kosteneinsparpotenzialen durch Erweiterung von betrieblichen Systemgrenzen. Sie entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Angestellte am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) der Universität Karlsruhe (TH) in den Jahren 2001 bis 2005. Ausgangspunkt waren verschiedene Arbeiten im Auftrag des bmb+f, die in Zusammenarbeit mit der DaimlerChrysler AG in Rastatt, der Sita P+R GmbH in Knittlingen und der EnBW AG in Karlsruhe durchgeführt wurden.

Dem Institutsleiter und Hauptreferenten, Herrn Prof. Dr. O. Rentz gilt mein herzlicher Dank für die stetige, fachliche Förderung und die vielfältigen, wertvollen Anregungen. Für die Übernahme des Korreferats und die prüfende Durchsicht der Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr. R. Studer.

Für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) sowie am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung (DFIU). Besonderen Dank schulde ich meinen Kolleginnen und Kollegen aus der Arbeitsgruppe Energiesystemanalyse und Umwelt für die gute Zusammenarbeit und die freundschaftliche Unterstützung: Herrn Dr. W. Fichtner, Herrn Dr. M. Wietschel, Herrn Dr. M. Göbelt, Herrn Dr. M. Dreher, Herrn Dr. M. Frank, Herrn Dr. N. Enzensberger, Herrn S. Graehl, Frau A. Fleury, Herrn D. Möst, Herrn J. Rosen, Herrn H. Perlwitz, Herrn M. Genoese, Herrn S. Cail und Frau A. Eßer.

Nicht zuletzt gilt mein großer Dank meinen Freunden und meiner Familie. Insbesondere bedanke ich mich bei Regina, Helmut, Monika und Thorsten für ihr Verständnis und ihre Unterstützung bei der Fertigstellung der Arbeit.

Karlsruhe, im März 2005

Ingela Tietze-Stöckinger



## Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg.....	2
<b>2 Systemgrenzenerweiterung durch Kooperationen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Systeme und Systemgrenzen .....	5
2.2 Definition und Motive von Kooperationen.....	7
2.3 Theoretische Erklärungsansätze von Kooperationen.....	9
2.3.1 Erklärungsperspektiven der Wettbewerbstheorie .....	9
2.3.2 Erklärungsperspektiven der Industrieökonomik.....	10
2.3.3 Erklärungsperspektiven der Spieltheorie .....	11
2.3.4 Erklärungsperspektiven der Neuen Institutionenökonomik.....	12
2.4 Typologisierung von Kooperationen.....	13
2.5 Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen.....	18
2.5.1 Personale Barrieren.....	19
2.5.2 Intra-organisationale Barrieren .....	21
2.5.3 Inter-organisationale Barrieren .....	22
2.5.4 Strukturelle Barrieren.....	24
<b>3 Zur Identifikation der zu analysierenden Systeme.....</b>	<b>26</b>
3.1 Kooperationen in der Energiewirtschaft .....	27
3.1.1 Motive für Kooperationen zwischen Unternehmen der Energiewirtschaft ...	27
3.1.2 Typologisierung von Kooperationen zur Errichtung und zum Betrieb von Gemeinschaftsheizkraftwerken.....	29
3.2 Kooperationen basierend auf dem Konzept der unmittelbaren Nähe.....	31
3.2.1 Existierende Konzepte.....	31
3.2.2 Entsorgerparks .....	40
3.2.3 Typologisierung von Kooperationen zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks.....	41

<b>4</b>	<b>Techno-ökonomische Analyse eines unternehmensübergreifenden Systems aus dem Bereich der Energiewirtschaft .....</b>	<b>45</b>
4.1	Grundlegende Aspekte der Energieversorgung .....	45
4.1.1	Rechtlich-politische Rahmenbedingungen.....	45
4.1.2	Strategische Planung der Energieversorgungsunternehmen unter den neuen Rahmenbedingungen .....	50
4.2	Anforderungen an ein Modell zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks.....	55
4.3	Energiemodelle und ihre Einsatzmöglichkeiten zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks .....	56
4.3.1	Marktsimulationsmodelle .....	57
4.3.2	Optimierende Energiesystemmodelle .....	59
4.3.3	Eignung der diskutierten Modellansätze zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks.....	61
4.3.4	Kurzdarstellung des PERSEUS-Modellsystems .....	62
4.4	Modellbeschreibung LINK <sup>opt</sup> -JPP .....	64
4.4.1	Einführung .....	64
4.4.2	Mathematische Beschreibung des LINK <sup>opt</sup> -JPP Modells .....	66
4.4.3	Modelleinsatz im Rahmen einer Szenarioanalyse .....	89
4.4.4	Kritische Reflexion der gewählten Methodik.....	92
4.5	Modellaufbau und verwendete Datenbasis .....	96
4.5.1	Kurzvorstellung der Unternehmen .....	96
4.5.2	Brennstoffpreise.....	99
4.5.3	Zubauoptionen.....	101
4.5.4	Nachfrageentwicklung und Laststruktur.....	103
4.5.5	Elektrizitätsfremdbezug und Elektrizitätsabgabe .....	104
4.5.6	Emissionsfaktoren und Zertifikatpreise.....	105
4.5.7	Zinssatz .....	106
4.5.8	Modelltechnische Umsetzung.....	107
4.6	Modellgestützte Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks.....	109
4.6.1	Szenariodefinitionen .....	109
4.6.2	Modellergebnisse des Basisszenarios.....	110
4.6.3	Auswirkungen veränderter Gaspreisentwicklungen.....	122
4.6.4	Auswirkungen der Vorgabe einer minimalen Eigenerzeugung .....	124
4.6.5	Auswirkungen des CO <sub>2</sub> -Emissionsrechtehandels.....	125

<b>5</b>	<b>Techno-ökonomische Analyse eines unternehmensübergreifenden Systems aus dem Bereich der Entsorgungswirtschaft .....</b>	<b>135</b>
5.1	Grundlegende Aspekte der industriellen Abfallentsorgung .....	135
5.1.1	Rechtsgrundlagen der Entsorgung .....	136
5.1.2	Funktionen der betrieblichen Entsorgungslogistik .....	139
5.1.3	Beeinflussung der Planung von Entsorgungslogistiksystemen durch die Wechselwirkung der entsorgungslogistischen Prozesse .....	140
5.2	Anforderungen an ein Modell zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks .....	144
5.3	Stoffstrommodelle und ihre Einsatzmöglichkeiten zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks .....	145
5.3.1	Stoffstrommodelle zur Abbildung einzelner entsorgungslogistischer Prozesse .....	146
5.3.2	Stoffstrommodelle unter simultaner Berücksichtigung von mindestens zwei entsorgungslogistischen Prozessen .....	148
5.3.3	Eignung der diskutierten Modelle zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks .....	150
5.4	Modellbeschreibung LINK <sup>opt</sup> -WMP .....	154
5.4.1	Einführung .....	154
5.4.2	Mathematische Beschreibung des LINK <sup>opt</sup> -WMP Modells .....	156
5.4.3	Modelleinsatz im Rahmen einer Szenarioanalyse .....	167
5.4.4	Kritische Reflexion der gewählten Methodik .....	169
5.5	Modellaufbau und verwendete Datenbasis .....	172
5.5.1	Kurzvorstellung der Unternehmen .....	172
5.5.2	Ist-Situation der Entsorgung .....	173
5.5.3	Zur Entwicklung effizienter Entsorgungslösungen .....	175
5.5.4	Entsorgerpark-Konzept für das Werksgelände des Automobilherstellers .....	176
5.5.5	Modelltechnische Umsetzung .....	186
5.6	Modellgestützte Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks .....	190
5.6.1	Szenariodefinitionen und Ergebnisdarstellung .....	190
5.6.2	Modellergebnisse des Basisszenarios .....	192
5.6.3	Überprüfung der Zulässigkeit der Verwendung einer durchschnittlichen monatlichen Abfallmenge und eines kontinuierlichen Anfalls .....	203
5.6.4	Auswirkungen erhöhter spezifischer Transportkosten .....	210
5.6.5	Auswirkungen veränderter Abfallmengen .....	215

<b>6 Implementierungsbarrieren in den Fallstudien .....</b>	<b>221</b>
6.1 Überwindung personaler Barrieren in den Fallstudien .....	221
6.2 Überwindung intra-organisationaler Barrieren in den Fallstudien.....	222
6.3 Überwindung inter-organisationaler Barrieren in den Fallstudien.....	223
6.3.1 Kostenaufteilung .....	224
6.3.2 Finanzierung und Betrieb.....	225
6.4 Überwindung struktureller Barrieren in den Fallstudien.....	227
<b>7 Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>229</b>
7.1 Das entwickelte Modell LINK <sup>opt</sup> -JPP .....	229
7.2 Schlussfolgerungen aus der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks .....	230
7.2.1 Zur Entwicklung des Systems ohne Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Emissionsrechtehandels .....	230
7.2.2 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkungen des CO <sub>2</sub> -Emissionsrechtehandels .....	231
7.3 Das entwickelte Modell LINK <sup>opt</sup> -WMP .....	231
7.4 Schlussfolgerungen aus der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks.....	233
7.4.1 Schlussfolgerungen aus der Analyse eines realen Systems .....	233
7.4.2 Übertragbarkeit eines Entsorgerparks .....	234
7.5 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Überwindung von Implementierungsbarrieren .....	235
7.6 Ausblick auf zukünftige Forschungsvorhaben .....	236
7.6.1 Weitere Anwendungsgebiete für die entwickelten Modelle.....	236
7.6.2 Weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Systemgrenzenerweiterung .....	237
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>239</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>243</b>

## Nomenklatur

Im Folgenden werden die in der mathematischen Beschreibung der Modelle verwendeten Indizes, Indexmengen, Modellparameter und Variablen definiert.

### Indizes

<i>base</i>	:=	Index für den Zeitraum base (Teilmenge von <i>SEAS</i> )
<i>CO<sub>2</sub></i>	:=	Kohlendioxid
<i>elec</i>	:=	Elektrischer Strom (Teilmenge von <i>MT<sub>seas</sub></i> )
<i>exp</i>	:=	Index der Senken der Graphenstruktur
<i>from-storage</i>	:=	Index für gespeichertes Wasser (Teilmenge von <i>MT</i> )
<i>imp</i>	:=	Index der Quellen der Graphenstruktur
<i>KWK-elec</i>	:=	KWK-Nettostrom (Teilmenge von <i>MT<sub>seas</sub></i> )
<i>mt, mt'</i>	:=	Index für Energieträger, -formen und Stoffe
<i>peak</i>	:=	Index für den Zeitraum peak (Teilmenge von <i>SEAS</i> )
<i>proc</i>	:=	Index für Prozesse
<i>prod, prod', prod''</i>	:=	Indizes für Produzenten
<i>reg</i>	:=	Index für Regionen
<i>seas</i>	:=	Index für Zeitscheiben
<i>sec</i>	:=	Index für Sektoren
<i>stor</i>	:=	Index für Lager
<i>t</i>	:=	Index für Perioden
<i>temp</i>	:=	Index für Jahreszeiten
<i>to-storage</i>	:=	Index für gespeichertes Wasser (Teilmenge von <i>MT</i> )
<i>unit</i>	:=	Index für Anlagen

### Indexmengen

<i>BASE</i>	:=	Basezeiträume
<i>BASEPROC</i>	:=	Energiebereitstellungs- und -umwandlungsprozesse, für die ein Grundlastbetrieb vorgegeben ist
<i>DEMPROC<sub>prod,mt</sub></i>	:=	Nachfrageprozesse nach <i>mt</i> eines Produzenten <i>prod</i>
<i>DEMPROC<sub>reg,mt</sub></i>	:=	Nachfrageprozesse nach <i>mt</i> einer Region <i>reg</i>
<i>EXP</i>	:=	Senken der Graphenstruktur
<i>GENPROC</i>	:=	Stromerzeugungsprozesse

$GENPROC_{prod,mt}$	:=	Stromerzeugungsprozesse des Produzenten $prod$ , in denen zur Stromerzeugung der Energieträger $mt$ eingesetzt wird
$GENPROC_{reg,mt}$	:=	Stromerzeugungsprozesse der Region $reg$ , in denen zur Stromerzeugung der Energieträger $mt$ eingesetzt wird
$GENUNIT_{reg}$	:=	Strom-/Wärmeerzeugende Anlagen der Region $reg$
$IMP$	:=	Quellen der Graphenstruktur
$MT$	:=	Stoffformen
$MT_{ibc}$	:=	Stoffe, die in Behältern des Typs $ibc$ (International <u>B</u> ulk <u>C</u> ontainer) befördert und gelagert werden
$MT_{mp}$	:=	Stoffe, die in Behältern des Typs $mp$ (Abrollmulden, -pressen) befördert und gelagert werden
$MT_{non-seas}$	:=	Stoffform ohne saisonal differenzierte Betrachtung
$MT_{seas}$	:=	Stoffform mit saisonal differenzierter Nachfrage
$PEAK$	:=	Peakzeiträume
$PMP_{PROD,PROD'}$	:=	Produzenten-Zuordnung für Pumpspeichergleichung
$PROC$	:=	Prozesse
$PROC_{path}$	:=	Prozesse, die einen möglichen Entsorgungspfad determinieren
$PROC_{unit}$	:=	Prozesse der Anlage $unit$
$PROC_{prod,mt}$	:=	Prozesse des Produzenten $prod$ , in denen $mt$ umgewandelt wird
$PROD, PROD'$	:=	Produzenten
$PROD_{exp,mt}$	:=	Produzenten, von denen aus $mt$ -Flüsse zu einer Senke $exp$ des Graphen fließen
$PROD_{imp,mt}$	:=	Produzenten, die über $mt$ -Flüsse von der Quelle $imp$ des Graphen beliefert werden
$PROD_{demand}$	:=	Produzenten, die Nachfrageprozesse enthalten
$PROD_{non-demand}$	:=	Produzenten, die keine Nachfrageprozesse enthalten
$PROD_{prod,mt}$	:=	Produzenten, von denen aus Flüsse des Energieträgers $mt$ zum Produzenten $prod$ fließen
$PROD'_{prod,mt}$	:=	Produzenten, die über $mt$ -Flüsse vom Produzenten $prod$ beliefert werden
$PROD_{reg}$	:=	Produzenten in der Region $reg$
$REG$	:=	Regionen
$SEAS$	:=	Zeitintervalle

$SEAS_{base}$	:=	Zeitintervalle im Zeitraum $base$
$SEAS_{peak}$	:=	Zeitintervalle im Zeitraum $peak$
$SEAS_{temp}$	:=	Zeitintervalle in der Jahreszeit $temp$
$SEC$	:=	Sektoren
$STOR$	:=	Lager
$STOR_{prod}$	:=	Lager des Produzenten $prod$
$T$	:=	Perioden
$TEMP$	:=	Jahreszeitintervalle
$UNIT$	:=	Anlagen
$UNIT_{dec}$	:=	stillgelegte Anlagen
$UNIT_{sec}$	:=	Anlagen des Sektors $sec$
$UNIT_{nuc}$	:=	Kernkraftwerke
$UNIT_{path}$	:=	Anlagen, deren Prozesse einen möglichen Entsorgungspfad determinieren

### Modellparameter

$t$	:=	Diskontierungsfaktor
$proc, t$	:=	Wirkungsgrad des Prozesses $proc$
$prod, prod', mt, t$	:=	Übertragungswirkungsgrad des Flusses ( $prod, prod', mt$ )
$proc, mt$	:=	Anteil des Stoffes $mt$ am Gesamtinput bzw. Gesamtoutput des Prozesses $proc$ (Konvention: negative Werte für Input, positive für Output)
$\Omega_{proc, t}$	:=	Kapazitätsbezugszahl des Prozesses $proc$ in Periode $t$
$Avai_{unit, t}$	:=	Durchschnittliche Verfügbarkeit einer Anlage $unit$ in Periode $t$
$Cfix_{unit, t}$	:=	fixe jährliche Betriebsausgaben für die Anlage $unit$ in Periode $t$
$Cfix_{stor, t}$	:=	fixe jährliche Betriebsausgaben für das Lager $stor$ in Periode $t$
$Cfuel_{imp, prod, mt, t}$	:=	Brennstoffkosten für die Belieferung von $prod$ mit $mt$ aus der Quelle $imp$ in Periode $t$
$Cinv_{unit, t}$	:=	spezifische Investitionen für einen Zubau bzw. eine Erweiterung der Anlage $unit$ in Periode $t$
$Cinv_{stor, t}$	:=	spezifische Investitionen für einen Zubau bzw. eine Erweiterung des Lagers $stor$ in Periode $t$

$Cobbase_{seas,t}$	:=	spezifische Ausgaben für den Elektrizitätsfremdbezug von Basislast von der Börse/anderen Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$Cobpeak_{seas,t}$	:=	spezifische Ausgaben für den Elektrizitätsfremdbezug von Peaklast von der Börse/anderen Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$Cosbase_{seas,t}$	:=	spezifische Einnahmen durch Elektrizitätsabgabe von Baseload an der Börse/andere Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$Cospeak_{seas,t}$	:=	spezifische Einnahmen durch Elektrizitätsabgabe von Peaklast an der Börse/andere Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$Crb_{CO_2,t}$	:=	spezifische Ausgaben für den Bezug von CO <sub>2</sub> -Emissionsrechten in Periode $t$
$Crs_{CO_2,t}$	:=	spezifische Einnahmen für den Verkauf von CO <sub>2</sub> -Emissionsrechten in Periode $t$
$Ctrl_{prod,prod',t}$	:=	spezifische Ausgaben für einen Transport mit einem Behälter vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in Periode $t$
$Ctrl2_{prod,prod',t}$	:=	spezifische Ausgaben für einen Transport mit zwei Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in Periode $t$
$Ctrl12_{prod,prod',t}$	:=	spezifische Ausgaben für einen Transport mit 12 Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in Periode $t$
$Ctrl13_{prod,prod',t}$	:=	spezifische Ausgaben für einen Transport mit 13 Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in Periode $t$
$Ctrl24_{prod,prod',t}$	:=	spezifische Ausgaben für einen Transport mit 24 Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in Periode $t$
$Cvar_{proc,t}$	:=	variable Betriebsausgaben des Prozesses $proc$ in Periode $t$
$Cvar_{prod,exp,mt,t}$	:=	variable Ausgaben des Flusses ( $prod, exp, mt$ ) in Periode $t$
$Cvar_{prod,prod',mt,t}$	:=	variable Ausgaben des Flusses ( $prod, prod', mt$ ) in Periode $t$
$Cvar_{stor,mt,t}$	:=	variable Ausgaben für die Lagerung des Stoffes $mt$ im Lager $stor$ in Periode $t$
$Dem_{reg,mt,t}$	:=	Nachfrage in Region $reg$ nach Stoffart $mt$ in Periode $t$
$Dist_{prod,prod'}$	:=	Entfernung zwischen den Produzenten $prod$ und $prod'$

$DistMot_{prod,prod'}$	:=	Autobahnkilometer zwischen den Produzenten $prod$ und $prod'$
$EBP_{unit,CO_2}$	:=	durchschnittliche $CO_2$ -Emissionen der Anlage $unit$ in der Basisperiode
$EmBM_{unit,mt,t}$	:=	Emissionswert für den Output $mt$ der Anlage $unit$ in Periode $t$
$EmCap_{CO_2,t}$	:=	durchschnittliche Anzahl von $CO_2$ -Emissionsrechten pro MW installierter Leistung in Periode $t$
$EmCap_{unit,t,CO_2}$	:=	durchschnittliche Anzahl von $CO_2$ -Emissionsrechten pro MW installierter Leistung der Anlage $unit$ in Periode $t$
$f_{proc,t,seas}$	:=	Anteil der Zeitscheibe $seas$ an der jährlichen Gesamtnachfrage in Periode $t$ (Lastkurve eines Nachfrageprozesses)
$FacCap_{unit,t}$	:=	Blockgröße einer Anlage $unit$ in Periode $t$ , dessen ganzzahliges Vielfaches zugebaut werden kann
$FacCap_{stor,t}$	:=	Standardanzahl der Stellplätze in einem Lager $stor$ in Periode $t$ , deren ganzzahliges Vielfaches zugebaut werden kann
$ff_{unit,t}$	:=	Erfüllungsfaktor der Anlage $unit$ in Periode $t$
$FL_{lev}_{prod,prod',mt,t}$	:=	exogen vorgegebener Durchsatz für Fluss ( $prod, prod', mt$ )
$FL_{Max}_{prod,prod',mt,t}$	:=	maximaler Durchsatz für Fluss ( $prod, prod', mt$ )
$FL_{Min}_{prod,prod',mt,t}$	:=	Minstdurchsatz für Fluss ( $prod, prod', mt$ )
$h_{base}$	:=	Stundenzahl des Zeitraums $base$
$h_{peak}$	:=	Stundenzahl des Zeitraums $peak$
$h_{seas}$	:=	Stundenzahl, die auf die Zeitscheibe $seas$ entfallen
$h_{temp}$	:=	Stundenzahl, die auf die Jahreszeit $temp$ entfallen
$h_{year}$	:=	Jahresstundenzahl (8760h/a)
$M$	:=	Hilfsparameter
$MaxAdd_{unit,t}$	:=	maximal zulässiger Kapazitätswachstum der Anlage $unit$ in Periode $t$
$MaxCap_{unit,t}$	:=	Obergrenze für die insgesamt installierte Leistung (inkl. Zubau) der Anlage $unit$ für Periode $t$
$MaxCap_{stor,t}$	:=	Obergrenze für die insgesamt installierte Leistung (inkl. Zubau) des Lagers $stor$ für Periode $t$
$MaxO_{reg,elec,seas,t}$	:=	Obergrenze für den Stromaustausch der Region $reg$ über die Börse/mit anderen Unternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$

$MinCap_{unit,t}$	:=	Minimalgrenze für die in Periode $t$ zu gewährleistende, insgesamt installierte Leistung der Anlage $unit$
$MinSelf_{reg,mt,t}$	:=	Minimal in Region $reg$ erzeugter Anteil des Stoffes $mt$ in Periode $t$
$MinUL_{unit}$	:=	Mindestlast der Anlage $unit$
$p_{seas}$	:=	Verhältnis des Peakzeitraums in Zeitscheibe $seas$ zur Gesamtdauer der Zeitscheibe $seas$
$PLBP_{unit}$	:=	durchschnittliches Aktivitätsniveau der Anlage $unit$ in der Basisperiode
$ProcEmiss_{CO_2,proc,t}$	:=	$CO_2$ -Emissionsfaktor des Prozesses $proc$ in Periode $t$
$ResCap_{unit,t}$	:=	bereits installierte, in Periode $t$ noch zur Verfügung stehende Kapazität der Anlage $unit$
$ResCap_{stor,t}$	:=	Bereits installierte, in Periode $t$ noch zur Verfügung stehende Kapazität des Lagers $stor$
$Reserve$	:=	Reservefaktor
$Rest_{unit}$	:=	maximal zulässige Reststrommenge einer Anlage $unit$
$TLT_{unit}$	:=	technische Lebensdauer der Anlage $unit$
$TLT_{stor}$	:=	technische Lebensdauer des Lagers $stor$
$VlhMax_{proc,t}$	:=	Begrenzung der maximalen Volllaststundenzahl für den Prozess $proc$ in Periode $t$
$VlhMax_{unit,t}$	:=	Begrenzung der maximalen Volllaststundenzahl für die Anlage $unit$ in Periode $t$
$VlhMax_{unit,temp,t}$	:=	Begrenzung der maximalen Volllaststundenzahl für die Anlage $unit$ in der Jahreszeit $temp$ in Periode $t$
$VlhMin_{proc,t}$	:=	Vorgabe der minimalen Volllaststundenzahl für den Prozess $proc$ in Periode $t$
$VlhMin_{unit,t}$	:=	Vorgabe der minimalen Volllaststundenzahl für die Anlage $unit$ in Periode $t$
$VlhMin_{unit,temp,t}$	:=	Vorgabe der minimalen Volllaststundenzahl für die Anlage $unit$ in der Jahreszeit $temp$ in Periode $t$
$years_t$	:=	Anzahl der in Periode $t$ zusammengefassten Jahre

### Positive Variablen

$Cap_{unit,t}$	:=	installierte Kapazität der Anlage $unit$ in Periode $t$
$Cap_{stor,t}$	:=	installierte Kapazität des Lagers $stor$ in Periode $t$
$\Delta CapDec_{sec,t}$	:=	Differenz zwischen in Periode $t$ stillgelegten und zugebauten Anlagen (nur Werte $\geq 0$ )

$\Delta CapNew_{sec,t}$	:=	Differenz zwischen in Periode $t$ zugebauten und stillgelegten Anlagen (nur Werte $\geq 0$ )
$Em_{unit,CO_2,t}$	:=	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Anlage $unit$ in Periode $t$
$ERights_{sec,CO_2,t}$	:=	Anzahl der CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte des Sektors $sec$ in Periode $t$
$ERights_{unit,CO_2,t}$	:=	Anzahl der CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte der Anlage $unit$ in Periode $t$
$ERightsAP_{unit,CO_2,t}$	:=	Anzahl der CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte der Anlage $unit$ in Periode $t$ , die anhand der Regel für zusätzliche Neuanlagen zugeteilt wurden
$ERightsB_{sec,CO_2,t}$	:=	Anzahl gekaufter CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte des Sektors $sec$ in Periode $t$
$ERightsHP_{unit,CO_2,t}$	:=	Anzahl der CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte der Anlage $unit$ in Periode $t$ , die auf Basis historischer Emissionen zugeteilt wurden
$ERightsS_{sec,CO_2,t}$	:=	Anzahl verkaufter CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte des Sektors $sec$ in Periode $t$
$ERightsSA_{unit,CO_2,t}$	:=	Anzahl der CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte der Anlage $unit$ in Periode $t$ , die als Sonderzuteilung für KWK-Anlagen zugeteilt wurden
$ERightsTP_{unit,CO_2,t}$	:=	Anzahl der CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte der Anlage $unit$ in Periode $t$ , die anhand der Regel für zusätzliche Ersatzanlagen zugeteilt wurden
$ERightsTP_{sec,CO_2,t}$	:=	Anzahl der CO <sub>2</sub> -Emissionsrechte im Sektor $sec$ in Periode $t$ , die auf Ersatzanlagen übertragen werden können
$FL_{imp,prod',mt,t}$	:=	Niveau des $mt$ -Flusses von der Quelle $imp$ zu Produzenten $prod'$ in Periode $t$
$FL_{prod,exp,mt,t}$	:=	Niveau des $mt$ -Flusses von $prod$ zu Senken $exp$ in Periode $t$
$FL_{prod,prod',mt,t}$	:=	Niveau des $mt$ -Flusses von $prod$ zu Produzenten $prod'$ in Periode $t$
$FL_{prod,prod',mt,t,seas}$	:=	Niveau des $mt$ -Flusses von $prod$ zu Produzenten $prod'$ in der Zeitscheibe $seas$ der Periode $t$
$Mil_t$	:=	in der Periode $t$ zurückgelegte Transportkilometer
$MilMot_t$	:=	in der Periode $t$ auf Autobahnen zurückgelegte Transportkilometer
$NewCap_{unit,t}$	:=	in der Periode $t$ neu installierte Kapazität der Anlage $unit$ (Zubau)

$NewCap_{stor,t}$	:=	in der Periode $t$ neu installierte Kapazität des Lagers $stor$ (Zubau)
$OBbase_{prod,elec,seas,t}$	:=	Niveau des Elektrizitätsfremdbezugs des Typs Base des Produzenten $prod$ von der Börse/anderen Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$OBpeak_{prod,elec,seas,t}$	:=	Niveau des Elektrizitätsfremdbezugs des Typs Peak des Produzenten $prod$ von der Börse/anderen Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$OSbase_{prod,elec,seas,t}$	:=	Niveau der Elektrizitätsabgabe des Typs Base des Produzenten $prod$ an der Börse/andere Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$OSpeak_{prod,elec,seas,t}$	:=	Niveau der Elektrizitätsabgabe des Typs Peak des Produzenten $prod$ an der Börse/andere Energieversorgungsunternehmen in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$PL_{proc,t}$	:=	Aktivitätsniveau des Prozesses $proc$ in Periode $t$ (Jahreswert)
$PL_{proc,t,seas}$	:=	Aktivitätsniveau des Prozesses $proc$ in der Zeitscheibe $seas$ der Periode $t$
$SL_{stor,mt,t,seas}$	:=	Bestand des Stoffes $mt$ im Lager $stor$ in der Zeitscheibe $seas$ der Periode $t$

### Binäre Variablen

$Acti_{unit,seas,t}$	:=	Aktivitätszustand einer Anlage $unit$ in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$Acti_{proc,t}$	:=	Aktivitätszustand eines Prozesse $proc$ in Periode $t$
$Al_{unit}$	:=	Hilfsvariable zur Festlegung der anzuwendenden Zuteilungsregeln

### Ganzzahlige Variablen

$NCap_{unit,t}$	:=	Anzahl zugebauter Blöcke einer Anlage $unit$ in Periode $t$
$NCap_{stor,t}$	:=	Anzahl zugebauter Stellplatzeinheiten des Lagers $stor$ in Periode $t$
$TRI_{prod,prod',t,seas}$	:=	Anzahl der Transporte mit einem Behälter vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$

---

$TR2_{prod,prod',t,seas}$	:=	Anzahl der Transporte mit zwei Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$TR12_{prod,prod',t,seas}$	:=	Anzahl der Transporte mit 12 Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$TR13_{prod,prod',t,seas}$	:=	Anzahl der Transporte mit 13 Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$
$TR24_{prod,prod',t,seas}$	:=	Anzahl der Transporte mit 24 Behältern vom Produzenten $prod$ zum Produzenten $prod'$ in der Zeitscheibe $seas$ in Periode $t$



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Der einer Systemgrenzenerweiterung zugrunde liegende Gedanke ist, dass die Optima einzelner Systeme nicht notwendigerweise mit dem Optimum bei einer integrierten Betrachtung der Systeme zusammenfallen. Beispielsweise werden deshalb in der Regel im Rahmen der Produktionsplanung nicht einzelne Anlagen betrachtet, sondern die Entscheidungen für das komplexe Gefüge der Anlagen getroffen. Weitergehende Beispiele sind der Ansatz des Supply Chain Management zur betriebsübergreifenden Planung und Zusammenarbeit im Bereich der Güterbeschaffung sowie Verwertungsnetzwerke, in denen die Abfallströme eines Unternehmens in einem anderen Produktionsunternehmen als Rohstoffe genutzt werden.

Von besonderem Interesse im Rahmen einer Systemgrenzenerweiterung sind gemeinschaftliche Investitionsprojekte, da hierdurch Größendegressionseffekte erreicht werden können, welche die in den einzelnen Unternehmen erzielbaren Effekte übersteigen. Darüber hinaus liegt in dieser Vorgehensweise für kleinere Unternehmen häufig die einzige Möglichkeit, an Großtechnologien zu partizipieren. Jedoch können solche Potenziale nicht durch eine einmalige, zeitlich begrenzte Erweiterung der betrieblichen Systemgrenzen erzielt werden, sondern erfordern eine längerfristige Kooperation der betroffenen Unternehmen. Wie vielen Änderungen des wirtschaftlichen Verhaltens stehen aber auch der Bildung von Kooperationen Barrieren entgegen, deren Überwindung zur erfolgreichen Umsetzung kooperativer Beziehungen erforderlich ist. Solche Barrieren sind u.a. ein unklares Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand sowie eine nicht zusammen passende Qualität, Quantität oder Kontinuität der zu koppelnden Stoffströme.

Bei Überwindung dieser Barrieren weisen sowohl der Energieversorgungssektor als auch der Entsorgungssektor besondere Potenziale auf. Insbesondere Strom stellt ein weitgehend homogenes Produkt dar und kann somit in der Regel über Unternehmensgrenzen hinweg betrachtet werden, ohne dass hierzu wesentliche Anpassungen hinsichtlich der Eigenschaften bzw. der Qualität des in den unterschiedlichen Unternehmen erzeugten Stroms notwendig sind. Demgegenüber weisen Abfälle zwar eine deutliche Heterogenität auf, jedoch entstehen in vielen Unternehmen gleiche oder zumindest ähnliche Abfälle (z.B. die Fraktion Papier/Pappe/Kartonagen). Für diese Abfälle ist somit ebenfalls ohne zusätzliche Behandlungsmaßnahmen in den einzelnen Unternehmen eine überbetriebliche Betrachtung bzw. Zusammenführung möglich.

Darüber hinaus ist beiden Sektoren gemein, dass sie in den letzten zehn Jahren aufgrund politischer Maßnahmen starken Veränderungen unterlagen, die bis heute anhalten bzw. sich bis heute auf die Geschäftsgrundlage der Unternehmen auswirken. Im Energieversorgungsbereich führt die Liberalisierung des Energiemarkts zu einer kontinuierlichen Veränderung des Wettbewerbsumfelds. Aufgrund der damit einhergehenden Planungsunsicherheit versuchen die Energieversorgungsunternehmen derzeit, Investitionen zu vermeiden. Dieses Verhalten kann jedoch

nicht langfristig aufrechterhalten werden, da aufgrund der Altersstruktur des deutschen Kraftwerksparks Ersatzinvestitionen zwingend erforderlich sind. In diesem Zusammenhang stellt vor allem für Stadtwerke mit Eigenerzeugung sowie für Regionalversorger die Errichtung von Gemeinschaftsheizkraftwerken durch zwei oder mehrere Energieversorgungsunternehmen eine viel versprechende Lösung dar. Die Einzelunternehmen tragen hierdurch nicht mehr das Risiko in Höhe der Gesamtinvestition sondern lediglich in der Höhe eines definierten Anteils. Des Weiteren ist durch ein Gemeinschaftsheizkraftwerk eine Effizienzsteigerung sowohl hinsichtlich ökonomischer als auch ökologischer Aspekte möglich, und es können Potenziale aufgrund komplementärer Stärken der Partner ausgeschöpft werden.

Die Entsorgungsbranche wurde vor allem durch die Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes beeinflusst. Die dort festgeschriebene Forderung nach einer vorrangigen Verwertung der Abfälle führte zu einem Anstieg der zur Entsorgung notwendigen Abfalltransporte (vgl. [Meyer 1999, S. 34]). Neben negativen ökologischen Auswirkungen resultieren höhere Gesamtausgaben der Entsorgungsunternehmen. Insbesondere im Bereich der industriellen Entsorgung stehen die Entsorgungsunternehmen vor dem Problem, dass eine Erhöhung der Entsorgungspreise zum Verlust von Aufträgen führen kann, ein Beibehalten der Entsorgungspreise jedoch den Gewinn schmälert. Einen innovativen Ansatz zur Lösung dieses Problems stellt eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks dar. Die Grundidee liegt hierbei in der Übertragung des Konzeptes der unmittelbaren Nähe auf die Entsorgungsbranche, indem Entsorgungsdienstleistungen auf dem Werksgelände durchgeführt werden. Durch einen Entsorgerpark kann die Entsorgung aus ökologischer und ökonomischer Sicht effizienter gestaltet werden, indem die angefallenen Abfälle innerhalb des Werksgeländes von der Anfallstelle zum Entsorgerpark transportiert werden, wo sie durch geeignete Verfahren aufbereitet werden. Im Idealfall können Wertstoffe dadurch direkt in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden, wodurch sich die Abfallmenge verringert, die außerhalb des Werksgeländes behandelt wird.

Sowohl eine Kooperation im Rahmen eines Gemeinschaftsheizkraftwerks als auch eines Entsorgerparks erfordern eine längerfristige Zusammenarbeit der beteiligten Unternehmen. Wie bereits zu Beginn dieser Einleitung erwähnt wurde, steht solchen überbetrieblichen Konzepten aber eine Vielzahl von Barrieren entgegen, die eine erfolgreiche Umsetzung in die Praxis erschweren bzw. sogar verhindern können. Aus diesem Grund muss bereits im Vorfeld der Errichtung von Kooperationen eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, aus der die Vor- und Nachteile von Gemeinschaftsheizkraftwerken und Entsorgerparks bzw. unterschiedlicher Ausgestaltungen dieser Kooperationen für die einzelnen Unternehmen ersichtlich sind.

## **1.2 Zielsetzung und Lösungsweg**

Aus den beschriebenen Problemen hinsichtlich der Umsetzung unternehmensübergreifender Konzepte in die Praxis lassen sich folgende Hauptziele für die vorliegende Arbeit ableiten:

- Techno-ökonomische Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks sowie eines Entsorgerparks und
- Entwicklung einer hierfür geeigneten Methodik sowie deren exemplarische Anwendung zur Bewertung konkreter Fälle.

Hierbei sollen jeweils die unter den gegebenen Rahmenbedingungen erzielbaren Kosteneinsparpotenziale sowohl in Bezug auf das Gesamtsystem als auch für die einzelnen Unternehmen identifiziert werden. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, zu überprüfen, inwieweit durch den Einsatz der entwickelten Methodik Barrieren in den partizipierenden Unternehmen überwunden werden können und welche weiteren Maßnahmen zur Überwindung von Barrieren eingesetzt werden können.

Während Gemeinschaftsheizkraftwerke bereits erfolgreich in die Praxis umgesetzt wurden (z.B. das Großkraftwerk in Mannheim), konnte bisher kein Entsorgerpark-Konzept in der Praxis identifiziert werden. Somit ergibt sich hinsichtlich der Entsorgerparks als zusätzliches Ziel die Analyse der Übertragbarkeit dieses Konzeptes bzw. der anhand des konkreten Falles ermittelten Einsparpotenziale auf weitere Unternehmen.

Zur Umsetzung dieser Ziele wird folgender Lösungsweg eingeschlagen:

Da die im Rahmen dieser Arbeit analysierte Erweiterung der betrieblichen Systemgrenzen zu einer überbetrieblichen Betrachtung führt, werden im Anschluss an diese Einleitung in Kapitel 2 Systemgrenzenerweiterungen durch Kooperationen behandelt. Neben einer Definition werden allgemeine Motive zur Bildung von Kooperationen dargelegt sowie theoretische Erklärungsansätze des Phänomens Kooperation skizziert. Des Weiteren werden Typologisierungsansätze von Kooperationen präsentiert und ausgewählte Kriterien und deren Charakteristika erläutert. Abschließend werden in diesem Kapitel unterschiedliche Barrieren thematisiert, die einer erfolgreichen Umsetzung von Kooperationen in die Praxis entgegenstehen.

Im 3. Kapitel werden zu Beginn Gründe für die Auswahl der Bereiche Energieversorgung und Abfallentsorgung dargelegt. Daran anschließend werden Motive von Kooperationen im Bereich der Energieversorgung beschrieben und eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks anhand der in der Literatur identifizierten Kriterien beschrieben. Analog hierzu wird im Anschluss daran eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks dargestellt, wobei aufgrund mangelnder Erfahrungen mit diesem Konzept in der Praxis vor der Typologisierung Kooperationen auf Basis des Konzeptes der unmittelbaren Nähe präsentiert werden (Verwertungsnetzwerke, Industrie- und Zulieferparks).

Kapitel 4 behandelt ein unternehmensübergreifendes System aus dem Bereich der Energieversorgung. Nach einer kurzen Darstellung der Spezifika der Energiewirtschaft werden konkrete Anforderungen an ein Modell zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks abgeleitet sowie existierende Modellansätze und deren Eignung zur Analyse von Gemeinschaftsheizkraftwerken diskutiert. Im Anschluss daran werden das mathematische Gleichungssystem des entwickelten Modells LINK<sup>opt</sup>-JPP

vorgestellt sowie der Modellaufbau und die verwendete Datenbasis dargelegt. Abschließend werden die Ergebnisse der modellgestützten Analyse unterschiedlicher Szenarios aufgezeigt.

Die Analyse eines unternehmensübergreifenden Systems aus dem Bereich der Entsorgung ist Gegenstand von Kapitel 5. Analog zum Aufbau des 4. Kapitels beginnt dieses Kapitel mit den Grundlagen der Entsorgung, aus denen die Anforderungen an ein Modell zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks abgeleitet werden. Nach einer Diskussion der Eignung bestehender Modelle zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks wird die entwickelte Modellvariante LINK<sup>opt</sup>-WMP präsentiert, bevor die Modellergebnisse unterschiedlicher Szenarios vorgestellt werden.

In Kapitel 6 werden die in den Fallstudien zu erwartenden Implementierungsbarrieren dargestellt und Maßnahmen zur Überwindung dieser Barrieren diskutiert. Da die Barrieren maßgeblich von der Ausgestaltung der Kooperation abhängen, wird am Beispiel des Entsorgerparks der Einfluss unterschiedlicher Betreibermodelle auf eine solche Kooperation erörtert.

Die Schlussfolgerungen hinsichtlich der entwickelten Modelle sowie der Modellergebnisse werden in Kapitel 7 erarbeitet. Des Weiteren werden die Voraussetzungen zur Übertragbarkeit des Entsorgerpark-Konzeptes auf andere Unternehmen entwickelt.

Ein Ausblick auf zukünftige Forschungsvorhaben zeigt zusätzliche Anwendungsbereiche für die entwickelten Modelle sowie Übertragungsmöglichkeiten der Systemgrenzenerweiterung auf. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst.

## 2 Systemgrenzenerweiterung durch Kooperationen

Wie bereits in der Einleitung skizziert wurde, fokussiert diese Arbeit auf die Analyse von betrieblichen Systemgrenzenerweiterungen, in deren Rahmen (Teil-)Bereiche unterschiedlicher Unternehmen als ein System erfasst werden. Das Ausschöpfen hierdurch möglicher Kosteneinsparpotenziale erfordert deshalb kooperative Beziehungen zwischen den betrachteten Unternehmen. Kooperationen besitzen sowohl in der Wissenschaft als auch in der Unternehmenspraxis eine hohe Bedeutung<sup>1</sup>. Allerdings hat sich weder in der Literatur noch in der Wirtschaftspraxis bislang ein einheitlicher Kooperationsbegriff durchsetzen können, zumal die Grenzen zwischen den vielfältigen Formen unternehmerischer Zusammenarbeit fließend sind<sup>2</sup>. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Begriffen (u.a. Strategische Allianz, Joint Venture, Netzwerk, Strategic Partnership, Koalition, Collaborative Agreement, Bündnis, Partnerschaft, Wertschöpfungspartnerschaft), die teilweise synonym verwendet werden, teilweise jedoch auch voneinander abgegrenzt werden (vgl. [Meyer 1995, S. 156] und [Picot et al. 2001, S. 303]).

Aus diesem Grund werden im Anschluss an eine kurze Darstellung der Begriffe System und Systemgrenzen (Kapitel 2.1) Definitionen des Begriffs Kooperation und die wesentlichen Motive zum Aufbau kooperativer Beziehungen dargestellt (Kapitel 2.2). Daran anschließend wird in Kapitel 2.3 eine kurze Übersicht theoretischer Erklärungsansätze des Phänomens Kooperation gegeben. In Kapitel 2.4 wird auf Kriterien und deren Ausprägungen zur Typologisierung von Kooperationen eingegangen, anhand derer eine Abgrenzung unterschiedlicher Kooperationen vorgenommen werden kann. Abschließend werden in Kapitel 2.5 Widerstände bei der Initiierung und Implementierung kooperativer Unternehmensrelationen beschrieben, die für eine erfolgreiche Umsetzung von Kooperationen überwunden werden müssen.

### 2.1 Systeme und Systemgrenzen

In Abhängigkeit der Fachrichtung und Zielsetzung existieren unterschiedliche Definitionen des Begriffs System<sup>3</sup>. Laut [Blaß 1989, S. 32 f.] ist ein System „ein in Raum und Zeit durch eine (ideale oder reale) Systemgrenze begrenzter Teil der Wirklichkeit, der in einer bestimmten Umgebung ein charakteristisches Verhalten zeigt“. Die Menge der zugehörigen Elemente und die Menge der Kopplungen (Relationen) dieser Elemente bestimmen die Struktur des Systems. Hierbei liefert die Umgebung die Eingangsgrößen für das System und nimmt dessen Ausgangsgrößen auf.

Anhand der Qualität der Austauschbeziehungen mit der Umgebung werden in der Regel isolierte, geschlossene und offene Systeme unterschieden, wobei im Rahmen

---

<sup>1</sup> Zur Bedeutung des Untersuchungsgegenstandes in der Wissenschaft sei an dieser Stelle auf die Metaanalyse ausgewählter deutsch- und englischsprachiger Zeitschriften in [Zentes et al. 2003c, S. 7 ff.] verwiesen.

<sup>2</sup> Vgl. [Schubert et al. 1981, S. 6 und 118], [Hippe 2003, S. 22] und [Zentes et al. 2003c, S. 5].

<sup>3</sup> Vgl. [Schulze et al. 1982], [Marquardt 1995], [Aslaksen et al. 1992] und [Penkuhn 1997].

der vorliegenden Arbeit lediglich offene Systeme von Bedeutung sind<sup>4</sup>. Offene Systeme stehen zwar mit ihrer Umgebung durch den Austausch von Stoffen oder Energie in Verbindung, jedoch grenzen sie sich über bestimmte Systemeigenschaften und Beziehungsmuster von ihrer Umwelt ab (vgl. [Sterr 2003, S. 12]). Zwischen den Elementen innerhalb des Systems besteht ein größeres Maß an Interaktion als mit Elementen außerhalb der Systemgrenzen (vgl. [Aulinger 1996, S. 177]).

Diese abstrakte Darstellung von Systemen bedarf zur Operationalisierung und Kennzeichnung energie- und verfahrenstechnischer Produktionseinheiten einer weiteren Konkretisierung hinsichtlich der Relationen, der Systemfunktion, der Elemente, der Input- und Outputgrößen sowie der Systemgrenzen (vgl. [Gruhn 1976] und [Krallman 1996]). Die Systemgrenzen dienen der Abgrenzung des betrachteten Systems von seiner Umwelt und umfassen dieses vollständig. Somit kommt einer problemadäquaten Festlegung der Systemgrenzen eine wichtige Bedeutung zu. In Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung kann ein System hierdurch bspw. auf Volumenelemente sowie einzelne Apparate begrenzt werden oder vollständige Verfahrenssysteme sowie Verbundsysteme umfassen (vgl. [Schleef 1999, S. 35 f.]). Zur Durchführung einer strukturierten Analyse ist eine Untergliederung großer bzw. komplexer Teilsysteme erforderlich, um die Komplexität des Problems zu reduzieren. Aus einer sukzessiven Untergliederung resultiert ein hierarchischer Aufbau von übergeordneten Systemen und Subsystemen (vgl. Tabelle 1).

Der in Tabelle 1 dargestellten hierarchischen Gliederung der Systeme<sup>5</sup> kommt nicht nur eine formale Bedeutung zu. Sie besitzt darüber hinaus einen Einfluss auf die Zielsetzung der Systemanalyse und die Auswahl der Analysemethoden. Auf den unteren, dem Prozessbereich zugeordneten Ebenen dominieren naturwissenschaftliche und technische Fragestellungen, weshalb hier in der Regel ebensolche Untersuchungsmethoden verwendet werden. Demgegenüber stehen bei der Analyse der unter Systeme gefassten Hierarchieebenen meist ökonomische Zielgrößen und Analysemethoden im Vordergrund (vgl. [Frank 2003, S. 6 f.]).

Durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Systemgrenzenerweiterungen werden mehrere energie- bzw. stoffwirtschaftliche Werke als Verbundsysteme betrachtet. Da die einzelnen Werke bei unterschiedlichen Unternehmen angesiedelt sind, resultiert aus der Systemgrenzenerweiterung ein unternehmensübergreifendes Verbundsystem. Dementsprechend ist zur Realisierung möglicher Einsparpotenziale eine unternehmensübergreifende Zusammenarbeit erforderlich.

---

<sup>4</sup> Offene Systeme tauschen mit ihrer Umwelt sowohl Energie und Materie aus, während im Rahmen von geschlossenen Systemen lediglich ein energetischer Austausch zugelassen ist. Isolierte Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass weder Energie noch Materie mit der Systemumgebung ausgetauscht werden (vgl. beispielsweise [Fuchs 1976]).

<sup>5</sup> Ähnliche Gliederungen verfahrenstechnischer Anlagen finden sich auch bei [Sutter 1976] und [Schulze et al. 1982].

**Tabelle 1:** Hierarchieebenen verfahrens- und energietechnischer Systeme und Prozesse (in Ahnlehnung an [Hartmann et al. 1985], [Penkuhn 1997] und [Schleef 1999])

	Hierarchieebene	Typisches Beispiel aus der Energiewirtschaft	Typisches Beispiel aus der Entsorgungswirtschaft
<b>Verfahrens-/ energie- technische Systeme</b>	<b>Verbundsystem</b>	Energiewirtschaft eines Landes, einer Region, eines Energieversorgungsunternehmens	Abfallwirtschaft eines Landes, einer Region, eines Entsorgungs- oder Produktionsunternehmens
	<b>Energie-/Stoffwirtschaftliches Werk</b>	Einzelnes Kraftwerk inkl. aller Nebenanlagen	Einzelnes Werk oder Bereich innerhalb eines Verbundsystems
	<b>Verfahren</b>	Kombi-Prozess, Biomasse-wirbelschichtfeuerung	Destillation, Filtration, Sichtung
	<b>Verfahrensstufe</b>	Gasturbine, Abhitzeessel	Vorsichter, Dephlegmator
<b>Verfahrens-/ energie- technische Prozesse</b>	<b>Prozesseinheit</b>	Verdampferrohrbündel, Absorptionskolonne in der Rauchgasreinigung	Destillierkolonne, Filterkammer
	<b>Charakteristischer Teilprozess</b>	Brennerflamme	Katalysatorschicht eines Reaktors, Boden einer Trennkolonne
	<b>Volumeneinheit / Mikroprozess</b>	Verdampfungs- und Kondensationsvorgänge	Katalysatorkorn, Tropfen, Gasblase
	<b>Elementarprozess</b>	Chemische Reaktion (Verbrennung, Vergasung), Konduktion und Konvektion von Stoff und Energie	

## 2.2 Definition und Motive von Kooperationen

Kooperationen werden üblicherweise als Hybrid zwischen „Markt“ (totale Desintegration) und „Hierarchie“ (totale Integration) eingeordnet<sup>6</sup>. Die bewusste Entscheidung, die Autonomie<sup>7</sup> und das Entstehen gegenseitiger Abhängigkeiten<sup>8</sup> gehören zu den in der betriebswirtschaftlichen Kooperationsliteratur überwiegend genannten Merkmalen von Kooperationen (vgl. [Götzelmann 1992, S. 89]) Nach [Pampel 1993, S. 10] stellen Kooperationen eine „auf freiwilliger, vertraglicher Vereinbarung beruhende Zusammenarbeit mindestens zweier rechtlich und wirtschaftlich

<sup>6</sup> Vgl. [Richardson 1972, S. 883], [Williamson 1990, S. 18], [Wildemann 1997, S. 420] und [Friese 1998, S. 66].

<sup>7</sup> Das Merkmal der Autonomie kann sich einerseits auf das Maß der Selbständigkeit der Partner und andererseits auf die Entscheidungsfreiheit hinsichtlich des Beitritts bzw. Verlassens der Kooperation beziehen.

<sup>8</sup> Das Entstehen gegenseitiger Abhängigkeiten verdeutlicht, dass vor einer Entscheidung über eine Kooperation zu prüfen ist, ob eine Zusammenarbeit mit anderen Betrieben überhaupt erwünscht ist, da Kooperationen prinzipiell dem Streben eines Unternehmens nach äußerer Autonomie entgegenstehen.

selbständig bleibender Unternehmungen in bestimmten Teilbereichen“ dar<sup>9</sup>. Somit kann der Terminus Kooperation als Überbegriff für auf überbetrieblicher Zusammenarbeit basierende Konzepte wie beispielsweise Unternehmensnetzwerke verstanden werden. Der Begriff strategische Allianz wird häufig synonym zum Begriff Kooperation verwendet, wobei der Terminus meist eine längerfristige Zusammenarbeit impliziert<sup>10</sup>.

[Sydow 1992, S. 79] beschreibt Unternehmensnetzwerke als „eine auf die Realisierung von Wettbewerbsvorteilen zielende Organisationsform ökonomischer Aktivitäten ... , die sich durch ... eher kooperative denn kompetitive und relativ stabile Beziehungen zwischen rechtlich selbständigen, wirtschaftlich jedoch zumeist abhängigen Unternehmen auszeichnen.“ Dieses Begriffsverständnis ähnelt zwar weitestgehend dem der Kooperation, jedoch gehen Unternehmensnetzwerke über bilaterale Unternehmensbindungen hinaus und stellen mindestens trilatere Unternehmensbeziehungen dar (vgl. [Sell 2002, S. 72] und [Zentes et al. 2003c, S. 6]). Im Gegensatz zu bilateralen Kooperationen eröffnet die Summe aller direkten und indirekten Beziehungen in Unternehmensnetzwerken mehr Handlungsmöglichkeiten für die beteiligten Unternehmen (vgl. [Kutschker 1994, S. 130]).

Der Vorteil der Kooperation gegenüber der Hierarchie liegt primär in der größeren Flexibilität<sup>11</sup>, da eine Verbindung zwischen zwei Unternehmen sich leichter realisieren und auflösen lässt als eine Hierarchie integriert bzw. desintegriert werden kann. So lassen sich in Kooperationen gegenüber Marktleistungen durch Stabilisierung der Austauschbeziehungen Transaktionskosten und gegenüber hierarchischen Lösungen durch höhere Flexibilität Organisationskosten senken (vgl. [Pappenheim-Trockhorn 1995, S. 15]). Hinsichtlich Unternehmensnetzwerken konstatieren [Kühnle et al. 1999], dass solche kooperativen Netzwerke sehr schwer zu imitieren sind und somit einen entscheidenden und v.a. langfristigen Wettbewerbsvorteil eröffnen. Generell kann das Erzielen von Wettbewerbsvorteilen als hauptsächliches Ziel der Netzwerkakteure<sup>12</sup> identifiziert werden. Bereits diese Kooperationsmotive verdeutlichen, dass ein weites Spektrum möglicher Einzelmotive existiert. Dennoch lassen diese sich im Wesentlichen auf zwei Grundmotive zurückführen: das Ausschöpfen von Synergieeffekten und das Streben nach Wachstum (vgl. [Corsten et al. 1994, S. 127 ff.]). Synergieeffekte liegen bei der Verbindung zweier Unternehmen immer dann vor, wenn beide Unternehmen bei ihrer gemeinschaftlichen Aufgabenerfüllung in der Unternehmensverbindung ihre Ziele besser erreichen können als es ihnen bei jeweils isolierter Handlungsweise möglich gewesen wäre. Gründe für solche

---

<sup>9</sup> Eine vergleichbare Definition findet sich bei [Tietz et al. 1979, S. 9] sowie in [Zentes et al. 2001, S. 298], weiter gefasst bei [Sell 2002, S. 3]. Bzgl. einer umfassenden Übersicht unterschiedlicher deutsch- und englischsprachiger Definitionen siehe [Friese 1998, S. 58 ff.].

<sup>10</sup> Vgl. hierzu auch [Lubritz 1998], [Spekman et al. 1998] und [Sell 2002].

<sup>11</sup> Vgl. [Ottersbach et al. 1990], [Steinmann et al. 1991] und [Pappenheim-Trockhorn 1995, S. 13].

<sup>12</sup> Allerdings können Unternehmensnetzwerken nicht generell Vorteile gegenüber herkömmlichen Unternehmensformen zugeschrieben werden. Beispielsweise weist Carney Unternehmensnetzwerken bei eher kundenspezifischen und hochpreisigen Produkten einen Wettbewerbsvorteil zu, während bei Massenware eher vertikal tief integrierte Unternehmen Vorteile aufweisen [Carney 1998].

Synergieeffekte können in Möglichkeiten des Ressourcen-Sharing<sup>13</sup>, der Ressourcen-Kombination<sup>14</sup> oder der Nutzung von economies of scope<sup>15</sup> und economies of scale<sup>16</sup> gesehen werden (vgl. [Corsten et al. 1994, S. 128 ff.]).

## 2.3 Theoretische Erklärungsansätze von Kooperationen

In diesem Kapitel werden theoretische Ansätze behandelt, die das Auftreten von Kooperationen bzw. deren Voraussetzungen, Gestaltungen und Wirkungen erklären. Hierbei handelt es sich lediglich um einen Ausschnitt; auch hier ausgeklammerte Ansätze sind durchaus erklärungsrelevant<sup>17</sup>. Da diese Erklärungsansätze jedoch auf das Wesen der Kooperation fokussieren und nicht zur techno-ökonomischen Analyse herangezogen werden können, wird auf eine ausführliche Darstellung aller Ansätze verzichtet.

### 2.3.1 Erklärungsperspektiven der Wettbewerbstheorie

Die Aufgabe der Wettbewerbstheorie liegt in der Aufdeckung der Ursachen und der Analyse der Wirkung wettbewerblicher Prozesse. Hierbei besteht ein enger Bezug zur Wettbewerbspolitik, in deren Rahmen Ziel-Mittel-Beziehungen eine besondere Bedeutung zukommen (vgl. [Cox et al. 1981, S. 9]). Die Wettbewerbstheorie besteht aus einer Vielzahl von Leitbildern und Konzepten, die der theoretischen Durchdringung der konkurrenzbezogenen Organisation von Märkten dienen (vgl. [Swoboda 2003, S. 41])<sup>18</sup>.

---

<sup>13</sup> Die Erfüllung einer Aufgabe kann aus technischen oder ökonomischen Gründen einen Mindestressourceneinsatz erfordern, den ein einzelner Betrieb nicht realisieren kann. In einem solchen Fall lässt sich ein Synergieeffekt erzielen, indem zwei Betriebe zusammenarbeiten, um das Nutzungspotenzial gemeinschaftlich zu realisieren [Corsten et al. 1994, S. 128].

<sup>14</sup> Zur Erfüllung einer Aufgabe müssen mehrere Ressourcen kombiniert werden. Dies kann für unterschiedliche Betriebe dann von Interesse sein, wenn die Aufgabe bei isolierter Handlungsweise von allen nur unbefriedigend erfüllt werden kann. Falls sich die relativen Ressourcen-Stärken und Ressourcen-Schwächen der beiden Betriebe ergänzen, kann es vorteilhaft sein, die jeweils vorhandenen Stärken bei der gemeinschaftlichen Aufgabenerfüllung in einer Betriebsverbindung miteinander zu kombinieren [Corsten et al. 1994, S. 128].

<sup>15</sup> Diese Vielfalts- oder Breitenvorteile liegen immer dann vor, wenn eine Aufgabe in unterschiedlicher Vielfalt oder Breite erfüllt werden kann und mit zunehmender Aufgabenbreite der durchschnittliche Aufwand oder Ertrag je Einheit der Aufgabenbreite ab- bzw. zunimmt [Corsten et al. 1994, S. 130].

<sup>16</sup> Economies of scale bzw. Größendegressionseffekte können auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen analysiert werden, deren Unterscheidung für die Einordnung von Einzeleffekten der Größendegression sowie deren Zusammenspiel von Bedeutung ist. Die unterste Ebene stellt die Ebene der technischen Produktionsmittel oder Einzelaggregate dar. Des Weiteren lässt sich der Betrieb als Oberbegriff der Einheit der eigentlichen Leistungserstellung in den Mittelpunkt der Analysen zu Größenregressionseffekten stellen. Dagegen ist die dritte Betrachtungsebene, die Unternehmung, der Rahmen, in den der Betrieb gefasst ist. (Zu Größendegressionseffekten siehe auch [Gutenberg 1966], [Ludwig 1962], [Pratten 1971]).

<sup>17</sup> Beispielsweise arbeitsökonomische, politische, politökonomische, institutionalistische, organisationsökologische, interorganisationale, netzwerkorientierte Ansätze, der Resource-Dependence-Ansatz und die Systemtheorie. Zu einer Übersicht deutschsprachiger Habilitationen, Dissertationen und Zeitschriftenbeiträge zu theoretischen Erklärungsansätzen von Kooperationen siehe [Swoboda 2003, S. 38 ff.].

<sup>18</sup> Bezüglich einer Übersicht theoretischer Strömungen der Wettbewerbstheorie vgl. [Lingenfelder 1996, S. 96].

Die Bewertung von Kooperationen durch die Wettbewerbstheorie wurde insbesondere durch den Wandel vom Leitbild des vollständigen<sup>19</sup> zum funktionsfähigen<sup>20</sup> Wettbewerbs beeinflusst. Während neoklassische Wettbewerbskonzepte Kooperationen als künstliches Instrument ablehnen, wurden im Rahmen des Wandels zum funktionsfähigen Wettbewerb positive Wirkungen von Kooperationen anerkannt. Der Fokus liegt hierbei auf den Auswirkungen einer Kooperation auf die Funktionsfähigkeit des Wettbewerbs. Wird diese begünstigt bzw. nicht negativ beeinflusst, fügt sich die Kooperation in die Wettbewerbsordnung ein. Wettbewerbstheoretisch ist demnach eine Ursache für das Auftreten von Kooperationen, dass die kooperative Unternehmensbeziehung häufig eine Voraussetzung für die weitere Partizipation am Wettbewerb ist. Nach [Benisch 1981, S. 408 f.] ergibt sich das Erfordernis einer Kooperation z.B. aus Kostenvorteilen durch Größendegressions-effekte und der Nutzung sich ergänzenden Know-hows.

Allerdings ist die Identifikation derjenigen Faktoren problematisch, die die unternehmerische Entscheidung hinsichtlich der Auswahl einer Wettbewerbsstrategie beeinflussen. Neuere Konzepte der Wettbewerbstheorie fordern deshalb die Integration der internen Organisationsstrukturen in die Wettbewerbstheorie (vgl. [Schwamborn 1994, S. 27 f.]). Zusammenfassend ergibt sich eine widersprüchliche Bewertung der Kooperation durch die Wettbewerbstheorie, was auf die Konzeptunterschiede der Strömungen zurückgeführt werden kann (vgl. [Swoboda 2003, S. 43]).

### 2.3.2 Erklärungsperspektiven der Industrieökonomik

Mason (1959) und Bain (1968) gelten als Begründer der Industrieökonomik, die als Teil der Wettbewerbstheorie angesehen werden kann. Diese Auffassung begründet sich darin, dass die Industrieökonomik u.a. den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Unternehmen, Preisstrategien der Anbieter und Kapitalrendite<sup>21</sup> analysiert und wettbewerbspolitische Konsequenzen ableitet (vgl. [Kaufer 1980, S. 3 ff.] und [Ott 1985, S. 319 ff])<sup>22</sup>. Die Industrieökonomik ging aus der Workability-Strömung der Wettbewerbstheorie hervor, reicht jedoch sowohl inhaltlich als auch methodisch darüber hinaus. Im Gegensatz zur Wettbewerbstheorie steht nicht die Kennzeichnung industrieller Marktprozesse als wettbewerbslich bzw. nicht wettbewerbslich sondern deren Analyse im Vordergrund. Das Marktstruktur-Marktverhalten-Marktergebnis-Paradigma bildet den Kern der Industrieökonomik: Marktstrukturen üben eine bestimmte Wirkung auf das Verhalten von Unternehmen aus, die das Markt- und Wettbewerbsergebnis erklären. Der Ansatz zielt auf die Identifikation von Faktoren des Erfolgs, wobei Kooperationsformen und deren Marktergebniswirkung ein wichtiges Element darstellen (vgl. [Bühler et al. 2003, S. 93 ff.]).

---

<sup>19</sup> Als Begründer bzw. Hauptvertreter der neoklassischen Wettbewerbstheorien im weitesten Sinne gelten Hayek, Hoppmann, Mises, Schumpeter und Stigles. Übersichten zu diesen Wettbewerbskonzepten finden sich u.a. bei [Fritz 1990], [Aberle 1992] und [Möschel et al. 1994].

<sup>20</sup> Bestandteil der Workability-Strömung. Als Begründer bzw. Hauptvertreter dieser Strömung der Wettbewerbstheorie werden Bain, Clark, Kantzenbach und Mason angesehen.

<sup>21</sup> Die Anzahl der Unternehmen wird als Indikator der Marktstruktur, die Preisstrategien als Indikator des Marktverhaltens und die Kapitalrendite als Indikator des Marktergebnisses begriffen.

<sup>22</sup> Einen Überblick hierzu geben [Bühler et al. 2002].

In Bezug auf kooperative Beziehungen ist das Konzept der strategischen Gruppen von Bedeutung (vgl. [Caves et al. 1977]). Hierbei werden die Betrachtungsebenen des strategischen Managements und der Branchenstruktur verbunden, sodass eine strategische Gruppe aus Unternehmen mit gleicher oder ähnlicher Strategie besteht. Die Gewinnpotenziale der strategischen Gruppen steigen mit zunehmender Höhe der Mobilitätsbarrieren zwischen den strategischen Gruppen (vgl. [Homburg et al. 1992] und [Porter 1999]). Ein Motiv für Kooperationen wird deshalb u.a. im Bestreben eines Unternehmens gesehen, durch eine kooperative Verbindung mit einem Unternehmen einer anderen strategischen Gruppe, die Mobilitätsbarriere zu überwinden (vgl. [Swoboda 2003, S. 44]). [Porter et al. 1989, S. 375 ff.] ziehen vier strategische Vorteile und drei strategische Kosten heran, die bei der Bewertung von Kooperationsstrategien gegeneinander abgewogen werden müssen (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Strategische Vorteile und Kosten von Kooperationsstrategien

Strategische Vorteile	Strategische Kosten
Skalenvorteile und Voranschreiten auf der Lernkurve	Koordinationskosten und Absorption von Managementkapazität
Zugriff auf Technologien und Know-how des Kooperationspartners	Untergrabung der eigenen Wettbewerbsposition (z.B. unbeabsichtigter Informationstransfer)
Reduktion des unternehmerischen Risikos	Entstehung einer ungünstigen Verhandlungsposition
Einflussnahme auf die Wettbewerbsstruktur	

Nach den Ansätzen der Industrieökonomik sind Kooperationen primär durch die Industriestruktur bedingt. Neuere Ansätze, wie der Ansatz der strategischen Gruppen, erlauben begrenzt Aussagen hinsichtlich des Managements von Kooperationen, wobei Bedingungen einer Industrie aus der Sichtweise von Kooperationen erfasst werden. Jedoch werden selten Aussagen bezüglich der konkreten Organisation und das jeweilig betroffene Management abgeleitet (vgl. [Sydow 1992, S. 175 ff. und 226 f.] und [Swoboda 2003, S. 45]).

### 2.3.3 Erklärungsperspektiven der Spieltheorie

Die Ansätze der Spieltheorie stehen ebenfalls in engem Zusammenhang mit den wettbewerbstheoretischen Ansätzen. Die Spieltheorie beschäftigt sich mit der Analyse von Konfliktsituationen, in der mehrere Entscheidungsträger inter-individuell mit strategischen Entscheidungssituationen konfrontiert sind. Charakteristisch für diese Situationen ist nach [Holler et al. 2000, S. 1], dass

- I. ein einzelner Entscheidungsträger das Ergebnis nicht unabhängig von der Wahl der anderen bestimmen kann, da das Ergebnis von den Entscheidungen mehrerer Entscheidungsträger abhängt,
- II. sich jeder Entscheidungsträger dieser Interdependenz bewusst ist,
- III. jeder Entscheidungsträger davon ausgeht, dass alle anderen sich ebenfalls der Interdependenz bewusst sind und
- IV. alle Entscheidungsträger bei ihren Entscheidungen I., II. und III. berücksichtigen.

[Güth 1974, S. IX] stellte heraus, dass die Spieltheorie insbesondere geeignet ist, Situationen zu analysieren, die simultan durch Konflikt und Kooperation gekennzeichnet sind. Beispielsweise kann sich die kooperative Beziehung zwischen Unternehmen auf ein Geschäftsfeld beschränken, während in anderen Geschäftsfeldern konkurrierende Beziehungen bestehen. Darüber hinaus existiert auch im Bereich der Kooperation die Möglichkeit, dass ein Unternehmen durch die Verfolgung eigener Interessen seinem Partner schadet (vgl. [Schwamborn 1994, S. 31])<sup>23</sup>.

Die Ansätze der Spieltheorie unterstützen das Verständnis sowohl der Entstehung als auch der Gestaltung von Kooperationen, da sie die Bedingungen aufzeigen, unter denen die Unternehmen durch kooperatives Verhalten bessere Ergebnisse für jede Partei erzielen als bei autonomem Handeln (vgl. [Sydow 1992, S. 169]). Darüber hinaus kann mittels der Spieltheorie unabhängig von persönlichen Wertvorstellungen, Freundschaftsbeziehungen oder Zielkongruenz die Vertrauensentwicklung in kooperativen Unternehmensbeziehungen erklärt werden (vgl. [Sydow 1992, S. 169 ff.]). Kritik an den spieltheoretischen Ansätzen bezieht sich u.a. auf den Realitätsgehalt (vgl. [Schwamborn 1994, S. 36]). Darüber hinaus wird bemängelt, dass die Entstehung von Kooperation lediglich bezüglich ihres Merkmals „Koordination durch Kooperation“ erklärt und nicht auf die konkrete Organisation der Zusammenarbeit eingegangen wird (vgl. [Sydow 1992, S. 171] und [Swoboda 2003, S. 47]).

### 2.3.4 Erklärungsperspektiven der Neuen Institutionenökonomik

Die Neue Institutionenökonomik mit Bezug auf marktliche Institutionen<sup>24</sup> besteht aus den Zweigen Transaktionskostentheorie, Property-Rights-Theorie und Principal-Agent-Theorie, wobei die Transaktionskostentheorie die beiden anderen Theoriezweige wesentlich durchdringt<sup>25</sup>. Aus diesem Grund wird auf die Darstellung der Property-Rights-Theorie und der Principal-Agent-Theorie im Rahmen dieser Arbeit verzichtet<sup>26</sup>.

Das Fundament der Transaktionskostentheorie bildet die Analyse der Markt- und Organisationskosten. Als Analyseeinheit wird die Transaktion herangezogen, die nach [Williamson 1990, S. 1] definiert ist als Transfer eines Gutes bzw. einer Leistung über eine technisch trennbare Schnittstelle hinweg. Die Grundannahme liegt darin, dass die Individuen ihre Entscheidungen auf Basis der Transaktionskosten und nicht nur der Technologie- oder Produktionskosten treffen. Transaktionskosten sind demnach jene Kosten, die für die Koordination von Austauschbeziehungen anfallen (in der Anbahnungs-, Vereinbarungs-, Kontroll- und Anpassungs-

---

<sup>23</sup> Zu einer ausführlicheren Beschreibung dieses Zusammenhangs vgl. auch [Magin et al. 2003].

<sup>24</sup> Mit der Analyse nichtmarktlicher Institutionen beschäftigen sich die Neue Politische Ökonomie, die Ökonomische Analyse des Rechts und die Verfassungsökonomik (vgl. [Richter 1994] und [Erlei et al. 1999]).

<sup>25</sup> Vgl. [Picot 1991], [Gümbel et al. 1995] und [Erlei et al. 1999].

<sup>26</sup> Zur Principal-Agent-Theorie siehe auch [Bauer et al. 1995], [Gümbel et al. 1995] und [Jost 2001], zur Property-Rights-Theorie wird auf [Hart et al. 1990], [Hesse 1993] und [Richter et al. 1999] verwiesen.

phase). Die Höhe der Transaktionskosten in den einzelnen Phasen variiert in Abhängigkeit des Austauschgegenstandes und den an der Übertragung Beteiligten. Allerdings können diese Kosten nur partiell monetär erfasst werden (vgl. [Swoboda 2003, S. 48]).

Die Transaktionskostentheorie bietet eine fundierte Basis für die Erklärung der Kooperationsbildung, wobei sie sämtliche möglichen Einbindungsformen von Kooperationen zu erfassen vermag (vgl. [Picot et al. 1993, S. 190]). Aufgrund der Beschränkung auf die Kosten von Koordinationsvorgängen wird sie jedoch als unvollständig angesehen, da neben einem rein quantitativen kostenrechnerischen Modell weitere Analysen zur Entscheidung für eine Kooperation notwendig sind (vgl. [Swoboda 2003, S. 49]). Die mangelnde Operationalisierbarkeit der Transaktionskosten und die Problematik der Abtrennung zu Produktions- bzw. internen Kosten führen dazu, dass die Transaktionskostentheorie dem eigenen Anspruch einer Kostenvergleichsrechnung nicht gerecht wird. Zwar liefert die Transaktionstheorie feste Determinanten als Bezugsgrößen, ist aber grundsätzlich ergänzungsbedürftig (vgl. [Oesterle 1993, S. 127]).

## 2.4 Typologisierung von Kooperationen

Im Folgenden sollen zwischenbetriebliche Kooperationen anhand typischer Kriterien unterschieden werden (siehe Tabelle 3). Das grundsätzliche Problem einer Differenzierung und Systematisierung des Kooperationsphänomens und seiner Erscheinungsformen liegt im vielschichtigen und komplexen Wesen von Kooperationen begründet. Da extrem viele Kooperationsvarianten unterschiedlicher Intensität und unterschiedlichen Umfangs existieren<sup>27</sup>, ist eine enumerative Auflistung aller denkbaren Kooperationsformen unmöglich.

[Wurche 1994a] hat bereits eine Vielzahl an Gestaltungsparametern der deutschsprachigen Kooperationsforschung zusammengetragen: Aufgabenumfang, Partnereigenschaften, Funktionsbereich, Geografische Ausdehnung, Rechtsform/Eigentumsverhältnisse, Aufgabeninhalt, Richtung, Gruppengröße, Intensität, Dauer, Formalisierungsgrad, Zentralität, Freiwilligkeit, Gleichheit, Bindungsmittel, Aufteilung, Verantwortung, Entscheidungsfindung, Geschäftsführung, Organisation, Personalfragen, Geheimhaltung, Informationsrechte, Kosten, Gewinnbeteiligung, Steueraspekte, Kontrollrechte, Marktstellung, Konfliktmanagement, Schiedsvereinbarung, Anpassungsmodalitäten, Risikoverteilung, Verrechnungspreise, Kündigung, Ausschluss, Offenheit, Abbruchkriterien, Standort, Kapitalausstattung, Austritt/Reversibilität, Delegation, Marktstufe, Abstimmung, Machtverteilung, Flexibilität, Komplexität, Stabilität, Redundanz, Erfolgsrealisation, Funktionsgliederung und Managementprozesse<sup>28</sup>. Im Folgenden werden ausgewählte Kriterien und deren Ausprägungen etwas ausführlicher dargestellt, wobei sich diese Kriterien allerdings

---

<sup>27</sup> Vgl. [Endress 1991, S. 25]

<sup>28</sup> Vgl. hierzu [Wurche 1994a, S. 133] sowie die dort angegebenen Quellen: [Steck 1967, S. 128 ff.], [Bratschitsch 1968, S. 37 ff.], [Knoblich 1969, S. 505 ff.], [Straube 1972, S. 37 ff. und 106 ff.], [Benisch 1973, S. 104], [Grochla 1975, S. 104 ff.], [Staub 1975, S. 120 ff.], [Schwarz 1979, S. 26], [Abels 1980, S. 64 ff. und S. 137 ff.], [Kütting 1983, S. 21 ff.], [Tröndle 1987, S. 51, S. 79 und S. 119 ff.], [Brauer 1989, S. 83] und [Hollmann 1992, S. 296].

lediglich zur deskriptiven Klassifikation eignen und nicht zur aktiven Gestaltung von Kooperationen.

**Tabelle 3:** Kriterien und Ausprägungen zur Charakterisierung von Kooperationen (vgl. [Rentz et al. 2003b, S. 37])

Kriterium	Ausprägungen				
Grundmotive	Nutzung von Synergieeffekten		Streben nach Wachstum		
Gegenstand/Sachziel	F&E	...	Produktion		
Intensität	Erfahrungsaustausch	...	Gemeinschaftsunternehmen		
Bezugsobjekt	Produkte/Waren		Dienstleistungen		
Zusammenarbeit	direkt		indirekt		
Dauer	kurzfristig	mittelfristig	langfristig		
Zielrichtung	operativ	taktisch	strategisch		
Stabilität	stabil		instabil (nur für 1 Projekt)		
Ressourceneinbringung	projektbezogen		unbefristet		
Richtung	horizontal	vertikal	diagonal/lateral		
Anzahl der Partner	bilateral		multilateral		
Aufbau	polyzentrische Struktur		fokales Unternehmen		
Dominanz	initiator-dominante Kooperation	ausgewogene Kooperation	partner-dominante Kooperation		
Vertragsbasis	vertragsfrei	kurzfristiger Vertrag	langfristiger Vertrag	Gemeinschaftsunternehmen	
Funktionsverknüpfung	Funktionszusammenlegung		Funktionsabstimmung		
Erhalt der wirtschaftlichen Selbstständigkeit	gering		stark		
Bindungsintensität	formlos	kapitalmäßig	vertraglich		
Terminiertheit	befristet		unbefristet		
Geografische Ausdehnung	lokal	regional	national	international	
Koordination	Preismechanismen		Hierarchie		
Koordinationsmechanismen	gegenseitige Anpassung	Standardisierung	gemeinsame Variable		
Kommunikation	gelegentlich		laufend		
Aktivität der Beteiligten	pro-aktiv		reaktiv		
Wettbewerbswirkung	fördernd	neutral	beschränkend		
Kooperationsphase	Initiative	Voruntersuchung	Konzeption	Gestaltung	Realisierung

Wird der Gegenstand der Kooperation als Entscheidungsmerkmal herangezogen, so kann u.a. zwischen Forschung und Entwicklung, Beschaffung und Einkauf, Produk-

tion, Marketing, Vertrieb und Distribution, Service sowie Demontage und Recycling<sup>29</sup> differenziert werden. Darüber hinaus können Kooperationen als Finanzierungsinstrument fungieren (vgl. [Solf 2001] und [Nelles et al. 2003]). [Schubert et al. 1981, S. 130] stellen fest, dass jede betriebliche Teilaufgabe Gegenstand der Kooperation sein kann, wobei in den meisten Fällen nicht auf allen Teilgebieten oder Funktionen eines Unternehmens kooperiert wird. Des Weiteren können sich zwischenbetriebliche Kooperationen entweder auf betriebliche Teilaufgaben oder auf allgemeiner gehaltene Informationsdienste und Beratungen beziehen. Je nach Gegenstand der Kooperation resultiert daraus eine unmittelbare oder eine mittelbare Zusammenarbeit der Partner. Darüber hinaus können sich Kooperationen auf Waren beziehen, z.B. bei der Beschaffung, oder auf Dienste, wie bei dem Aufbau eines gemeinsamen Kundendienstnetzes.

Nach der zeitlichen Ausprägung kann eine Einteilung in lang- (über fünf Jahre), mittel- (ein bis fünf Jahre) und kurzfristige (unter einem Jahr) Kooperationen durchgeführt werden (vgl. z.B. [Fichtner et al. 2004]). In diesem Zusammenhang wird häufig die Zielrichtung sowie das Stabilitätsmerkmal aufgeführt, wobei stabile Kooperationen durch viele Aufträge des gleichen Typs gekennzeichnet sind und instabile Kooperationen zur Erfüllung einer Aufgabe (eines Projektes) gebildet werden (vgl. [Friese 1998, S. 145]). Schließlich lassen sich Kooperationen auch danach unterscheiden, in welcher Phase ihres Lebenszyklus sie sich gerade befinden (vgl. [Vornhusen 1994] und [Meckl 1995, S. 27]).

Bezüglich des auf Stärken und Schwächen bezogenen Ressourcenprofils der kooperierenden Unternehmen lassen sich zwei Grundtypen von Kooperationen differenzieren (vgl. [Porter et al. 1989, S. 389 ff.]). Bei einer X-Kooperation arbeiten die Partner übergreifend in jeweils verschiedenen Aktivitätsbereichen zusammen, indem sie die hierfür notwendigen Ressourcen zusammenlegen oder austauschen. Die Unternehmen haben in der Regel unterschiedliche Stärken bzw. Schwächen, die durch die X-Kooperation genutzt bzw. ausgeglichen werden sollen (vgl. [Rotering 1993, S. 57 ff.] und [Morschett 2003, S. 393]). Im Rahmen von Y-Kooperation betreiben Unternehmen mit einem ähnlichen Stärken- und Schwächenprofil eine oder mehrere, aber jeweils gleiche Aktivität(en) gemeinsam mit dem Ziel, die Wettbewerbsposition der Firma in dem (den) Aktivitätsbereich(en) zu verbessern. Ein Wettbewerbsvorteil wird demnach durch die Bündelung von Stärken erzielt (vgl. [Lubritz 1998, S. 40 f.]). Durch die Heterogenität der Ressourcenprofile entstehen in X-Kooperationen stärkere Abhängigkeiten als in Y-Kooperationen (vgl. [Das et al. 2002, S. 733]).

---

<sup>29</sup> Götzelmann behandelt generell umweltschutzinduzierte Kooperationen und differenziert zwischenbetriebliche Kooperationen aus ökologischen Motiven in F&E-Kooperationen beispielsweise zur Grundlagenforschung, Nutzungs-Kooperationen z.B. zur gemeinsamen Nutzung von Rauchgasreinigungsanlagen und Rückstands-Kooperationen zum Aufbau von Output-Input-Beziehungen zwischen Unternehmen [Götzelmann 1992, S. 97].

Anhand der Kooperationsrichtung werden vertikale, horizontale und laterale Kooperationen unterschieden<sup>30</sup>. Die horizontale Kooperation bezieht sich auf die Zusammenarbeit zwischen Betrieben gleicher Fabrikations- oder Handelsstufe. Dabei stellt die substitutive Beziehung zwischen den Partnern im Sinne konkurrierender Leistungen eine erste Ausprägung dar. Bei komplementärer Beziehung im Sinne sich ergänzender Leistungen stehen die kooperierenden Partner zwar auf der gleichen Marktstufe, aufgrund der Komplementarität ihrer Produkte existieren aber keine direkten Konkurrenzbeziehungen zwischen ihnen (vgl. [Thelen 1993, S. 58]). Die vertikale Kooperation bezieht sich demgegenüber auf die Zusammenarbeit zwischen Betrieben verschiedener Fabrikations- oder Handelsstufen. Je nachdem ob eine Vorstufe oder Nachstufe in die Sphäre der Unternehmen einbezogen wird, werden Rückwärts- (backward) und Vorwärtsintegration (forward integration) differenziert. Im Rahmen von lateralen Kooperationen arbeiten Unternehmen aus unterschiedlichen Stufen und Branchen zusammen<sup>31</sup>.

Des Weiteren lassen sich Kooperationen anhand der Anzahl der Kooperationspartner unterscheiden<sup>32</sup>. Kooperationen mit zwei Partnern werden als bilateral, Kooperationen mit drei und mehr Partnern als (multi-)lateral bezeichnet. Vereinzelt wird die Anzahl der Partner einer Kooperation auch unter dem Begriff der Kooperationsgröße subsumiert (vgl. [Lutz 1993, S. 55 f.]). Eine weitere Differenzierung von Kooperationen kann hinsichtlich der Anzahl der Partner vorgenommen werden, die einen Marktzugang besitzen.

Bezüglich des Aufbaus bzw. Steuerungsmechanismus von Kooperationen können hierarchisch-pyramidale und polyzentrische (heterarchische) Kooperationen differenziert werden<sup>33</sup>. Hierarchisch-pyramidale Kooperationen sind durch die strategische Führerschaft eines so genannten fokalen Unternehmens („hub firm“) gekennzeichnet, während sich polyzentrische Kooperationen durch die Gleichberechtigung aller Partner auszeichnen<sup>34</sup>. In engem Bezug zum Kriterium des Kooperationsaufbaus steht das Kriterium der Dominanz, wonach in initiatordominierte, ausgewogene und von einem Partner dominierte Kooperationen differenziert werden kann.

Die Bindungsintensität von Zusammenschlüssen wird auch als Schärfe oder Strenge der unternehmerischen Zusammenarbeit bezeichnet (vgl. [Schubert et al. 1981, S. 8 f.]). Zunächst bezieht sich die Bindungsintensität auf die formale Art und Weise, in der sich die Partner verbinden. Bezüglich der Vertragsbasis reichen Unternehmenskooperationen vom vertragsfreien Informationsaustausch über kurz- und langfristige Lieferverträge bis hin zu Gemeinschaftsunternehmen (vgl. [Kaluza et al. 1998, S. 28]). Nach dem Grad der organisatorischen Verflechtung unterscheidet [Klanke 1995, S. 18] in Kooperationen unter Beibehaltung getrennter Geschäfts-

---

<sup>30</sup> Hierbei handelt es sich um das wohl meistverwendete Differenzierungskriterium in der Literatur. Vgl. beispielsweise [Pausenberger 1989, S. 622 f.], [Balling 1998, S. 41], [Gill et al. 2002, S. 457] und [Zentes et al. 2003a, S. 228].

<sup>31</sup> Vgl. [Thelen 1993, S. 57 ff.], [Sell 2002, S. 18 ff.] und [Friese 1998, S. 149].

<sup>32</sup> Vgl. [Kraege 1997, S. 66 f.], [Buse 1997, S. 460] und [Child et al. 1998, S. 108].

<sup>33</sup> Vgl. [Wildemann 1997], [Reuter 1998], [Windeler 2001] und [Dibbern 2002].

<sup>34</sup> Vgl. [Hippe 1997, S. 40], [Child et al. 1998, S. 120 f.] und [Jarillo 1988, S. 32].

aktivitäten der Partner, Kooperationen unter Zusammenführung der kooperativ wahrzunehmenden Aktivitäten in den Partnerunternehmungen und Kooperationen unter Ausgliederung der kooperativ wahrzunehmenden Aktivitäten in einem eigenständigen Geschäftsbetrieb. [Hess 1998] unterscheidet bezüglich der Art der Funktionsverknüpfung zwischen einer Funktionszusammenlegung und Funktionsabstimmung. Eine Zusammenlegung von Ressourcen führt zu einem gemeinsamen Anfall von Erlösen und Kosten, die auf die Partner aufgeteilt werden müssen. Demgegenüber sind auf Abstimmung beruhende Kooperationen durch getrennten Anfall von Erlösen und Kosten gekennzeichnet (vgl. [Kraege 1997, S. 67]). Teilweise werden die auf Zusammenlegung beruhenden Kooperationen als reziprok und die auf Abstimmung basierenden Kooperationen als redistributiv bezeichnet (vgl. [Tröndle 1987, S. 19 ff.] und [Rotering 1993, S. 53 ff.]). Als zweites Kriterium der Bindungsintensität wird das Ausmaß der eingeschränkten Dispositionsfreiheit in die Betrachtung einbezogen. In engem Zusammenhang mit der Bindungsintensität von Zusammenschlüssen steht auch die Dauer und Terminiertheit der Bindung (vgl. [Abel 1992, S. 91]). Befristete Kooperationen haben ein bestimmtes, gemeinsames Ziel, nach dessen Erfüllung die Beziehung beendet wird (vgl. [Friese 1998, S. 145]). Je formstrenger, intensiver und länger die Dispositionsfreiheit eingeschränkt wird, umso schärfer (strenger) ist der Zusammenschluss zu werten. Allerdings kann es durchaus auch ohne ein Vertragswerk oder eine Kapitalverflechtung zu einer intensiven Zusammenarbeit kommen und andererseits muss ein ausgefeiltes Vertragswerk nicht zwangsläufig zu einer intensiven Kooperation führen.

Die geographische Ausdehnung von Unternehmensnetzwerken kann von lokal bis international<sup>35</sup> reichen (vgl. [Abel 1992, S. 104 ff.] und [Friese 1998, S. 148 f.]). Das Maß der Zugänglichkeit der Netzwerkbeziehungen für Außenstehende (ggf. auch Netzwerkorganisationen) wird unter dem Begriff Sichtbarkeit erfasst (vgl. [Sydow 1992, S. 84]).

Bezüglich der Koordination von Unternehmensnetzwerken und Kooperationen können die Mechanismen der gegenseitigen Anpassung, der Standardisierung und der Verwendung gemeinsamer Variablen differenziert werden (vgl. [Steven et al. 1999, S. 7 ff.]). Zur Reduzierung der Koordinationskosten wird z.B. in der Automobilindustrie seit einigen Jahren dazu übergegangen, einbaufertige Systemmodule von einem Lieferanten zu beziehen, der für dieses Modul alleiniger Ansprechpartner ist und die Gesamtverantwortung für dieses Modul (teilweise sogar für dessen Montage) trägt (vgl. [Eicke et al. 1990] und [Stehle 2003, S. 80]). Auch im Rahmen des notwendigen unternehmensübergreifenden Controllings lassen sich eher marktliche, eher hierarchische oder diese Extrema kombinierende Instrumente – wie Kennzahlen, Zielvereinbarungen, Budgetierungen, Vertrauen und Monitoring – unterscheiden (vgl. [Wildemann 1996c, S. 20]).

Im Gegensatz zu reaktiven Kooperationen, die mehr oder weniger zufällig aus bestehenden Beziehungen entstehen, sind pro-aktiv induzierte Kooperationen das Ergebnis einer vorausgehenden Evaluierung von Voraussetzungen, Zielen,

---

<sup>35</sup> [Gill et al. 2002, S. 457] differenzieren die Ausprägungen lokal, regional, national und global.

Partneralternativen und möglichen Organisationsformen durch zumindest einen der Kooperationsbeteiligten (vgl. [Balling 1998, S. 41]).

In den „Kooperationsmodalitäten – Verwendung von Erträgen der Kooperation“ sehen [Lorange et al. 1992, S. 11 f.] ein zentrales Differenzierungskriterium und unterscheiden zwischen „disbursed back to the parents“ und „retained in the alliance“. [Fontanari 1996, S. 39] führt als weiteres Kriterium von Kooperationen die Risikoverteilung an und differenziert in Kooperationen mit Risikoverteilung im Verhältnis zum eingesetzten Kapital (aliquot) und Kooperationen mit paritätischer und einseitiger Risikoverteilung.

Aus wettbewerbspolitischer Sicht ist das Kriterium der durch Kooperationen entstehenden Wettbewerbswirkungen von besonderer Bedeutung. Wird dieses Kriterium als Differenzierungsgrundlage herangezogen, können im Wesentlichen wettbewerbsfördernde, wettbewerbsneutrale und wettbewerbshemmende Kooperationen unterschieden werden (vgl. [Klanke 1995, S. 19]).

Hinsichtlich der aktiven Gestaltung von Kooperationen führt [Wurche 1994a, S. 134 f.] aus, dass die Erfolgchancen konkreter Kooperationsformen nur teilweise bewusst beeinflusst werden können. Vielmehr werden Kooperationen auch durch nicht beeinflussbare Faktoren geprägt, von denen einige zum Zeitpunkt des Aushandelns in ihrer jetzigen oder auch zukünftigen Ausprägung nicht bekannt sind. Wenngleich solche exogenen Parameter nicht beeinflusst werden können, ist es von großer Bedeutung, sie rechtzeitig zu erkennen, in ihrer Wirkung abzuschätzen und in den anstehenden Entscheidungen zu berücksichtigen.<sup>36</sup>

## 2.5 Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen

Bereits [Schumpeter 1912, S. 118] beschrieb die Widerstände, die einem Unternehmen widerfahren, das sein wirtschaftliches Verhalten verändern will. Da bei der Bildung von Kooperationen mehrere Unternehmen zumindest Bereiche ihres wirtschaftlichen Verhaltens verändern, treten in der Regel verstärkt Widerstände auf. [Graehl et al. 2001, S. 34 ff.] differenzieren bezüglich Kooperationen personale, intra-organisationale, inter-organisationale und strukturelle Barrieren<sup>37</sup>. Demgegenüber unterscheiden [Gemünden et al. 1996] im Zusammenhang mit inter-organisationalen Innovationskooperationen die Barrieren des Nicht-Wissens, Nicht-Könnens, Nicht-Wollens und Nicht-Dürfens. Diese Barrieren finden sich in den kognitiven, motivationalen und ressourcen-bezogenen Barrieren bei [Graehl et al. 2001] wieder (siehe Tabelle 4), weshalb im Folgenden dessen Differenzierung gefolgt wird.

<sup>36</sup> Zu exogenen und endogenen Einflussfaktoren der Kooperation siehe auch [Zentes et al. 2003b].

<sup>37</sup> Ein ausführliches, phasenspezifisches Konzept bezüglich des Auftretens bestimmter Barrieren findet sich bei [Zaltman et al. 1973].

**Tabelle 4:** Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen (in Anlehnung an [Graehl et al. 2001])

<b>personale Barrieren</b>	kognitive Barrieren
	motivationale Barrieren
	situative Barrieren
<b>intra-organisationale Barrieren</b>	kommunikationsbezogene Barrieren
	ressourcenbezogene Barrieren
<b>inter-organisationale Barrieren</b>	Kooperationsbarrieren
	Kopplungsbarrieren
<b>strukturelle Barrieren</b>	physische Barrieren
	rechtlich-politische Barrieren
	sozio-kulturelle Barrieren
	technologische Barrieren

### 2.5.1 Personale Barrieren

Bezüglich personaler Barrieren können kognitive, motivationale und situative Barrieren differenziert werden (siehe Tabelle 5)<sup>38</sup>. Kognitive Barrieren betreffen die Unwissenheit der Entscheidungsträger<sup>39</sup> bzw. mangelnde Fähigkeiten der beteiligten Personen (sog. Fähigkeitsbarrieren)<sup>40</sup>. Die Unwissenheit der Akteure kann sich hierbei einerseits auf fehlende Kenntnisse in Bezug auf die erzielbaren Vorteile der Veränderungen beziehen (vgl. [Graehl et al. 2001, S. 34]), andererseits zählt auch die Unkenntnis geeigneter Kooperationspartner bzw. Ansprechpartner in potenziellen Partnerunternehmen zu den kognitiven Barrieren (vgl. [Gemünden et al. 1995, S. 974.]). [Walter 1998, S. 36] nimmt eine weitere Differenzierung der Fähigkeitsbarrieren in fachspezifische und fachübergreifende Barrieren vor. Fachspezifische Barrieren lassen sich auf Problemfelder zurückführen, die ein bestimmtes Fachgebiet betreffen (wie fehlende naturwissenschaftlich-technische, rechtliche oder organisatorische Qualifikationen), während fachübergreifende Fähigkeitsbarrieren weitgehend unabhängig von fachspezifischen Fragestellungen auftreten und in erster Linie die soziale Interaktion mit anderen Individuen betreffen (vgl. [Walter 1998, S. 36 f.]).

<sup>38</sup> [Klöter 1997, S. 133 ff.] identifiziert Macht- und Einflussgrundlagen der Akteure als wesentliche Determinanten unterschiedlicher Erscheinungsformen personaler Widerstände und nimmt eine Klassifizierung in offene oder verdeckte, passive oder aktive, direkte und indirekte, destruktive und konstruktive sowie loyale und egozentrierte Widerstände vor.

<sup>39</sup> Vgl. [Graehl et al. 2001, S. 34]. [Gemünden et al. 1995, S. 974] verwenden in diesem Kontext den Begriff Barriere des Nicht-Voneinander-Wissens.

<sup>40</sup> Vgl. [Witte 1973, S. 8] und [Walter 1998, S. 35]. [Gemünden et al. 1996, S. 238] verwenden hier den Ausdruck Barriere des Nicht-Könnens.

**Tabelle 5:** Personale Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen

<b>kognitive Barrieren</b>	mangelnde Bekanntheit der Optionen/Konzepte
	Unkenntnis möglicher Kooperationspartner
	unzureichende Fähigkeiten der betroffenen Personen
	mangelnde Bekanntheit möglicher Ausgestaltungsformen der Kooperation
<b>motivationale Barrieren</b>	Bedürfnisse und Neigungen der betroffenen Personen
	persönliche Merkmale
	Wertvorstellungen und Normen in den Unternehmen
<b>situative Barrieren</b>	Auslastung durch sonstige Aufgaben

Bei der Existenz von motivationalen Hemmnissen sind die Potenziale, die durch die Veränderung (z.B. eine Kooperation mit anderen Unternehmen) erzielt werden können, bekannt, doch scheitert die Umsetzung aufgrund von Konflikten mit der individuellen Zielsetzung der Akteure. Motivationale Barrieren werden deshalb auch häufig mit dem Begriff Willensbarriere bzw. Barriere des Nicht-Wollens umschrieben<sup>41</sup>. Allgemeinpsychologisch begründete Willensbarrieren lassen sich auf die Bedürfnisse und Neigungen der betroffenen Personen zurückführen: So lange die Bedürfnisse der Akteure durch den Ist-Zustand erfüllt sind, werden Veränderungen als mögliche Bedrohung empfunden. Darüber hinaus ist für die Akteure der Verlust von Bewährtem leichter erkennbar als potenzielle Vorteile in der Zukunft (vgl. [Leonard-Barton 1995, S. 34 f.]). [Hauschildt 1997, S. 128] leitet daraus ab, dass Innovationen von vielen Akteuren als Störung bzw. Ärgernis, Umbruch oder sinnlose Turbulenz wahrgenommen werden. Aufgrund ihrer Neigungen greifen die am Veränderungsprozess beteiligten Akteure oftmals auf bewährte Lösungsansätze zurück und vermeiden die Auseinandersetzung mit innovativen Anforderungen (vgl. [Kröber-Riel et al. 1999, S. 37 ff.]). Unter differentiell-psychologisch begründeten Barrieren werden Widerstände zusammengefasst, die aus individuellen Charakteristika der beteiligten Akteure resultieren (u.a. Persönlichkeit, Werte, Einstellungen und Zielsetzungen) (vgl. [Walter 1998, S. 45 f.]). Sozialpsychologisch begründete Barrieren beschreiben den Widerstand, der durch die Wertvorstellungen und Normen entsteht, die in einer Personengruppe oder Organisation existieren (vgl. [Walter 1998, S. 43 ff.]).

Nach [Graehl et al. 2001, S. 34] sind situative Barrieren dadurch gekennzeichnet, dass eine Initiierung bzw. Umsetzung der Veränderung aufgrund der Auslastung der Akteure durch andere Aufgaben gehemmt wird. Diese Barrieren können v.a. in kleinen Unternehmen beobachtet werden, da der Geschäftsleiter in der Regel der einzige Entscheidungsträger ist.

<sup>41</sup> Vgl. [Witte 1973, S. 6], [Gemünden et al. 1996, S. 238], [Hauschildt 1997, S. 136] und [Walter 1998, S. 34 ff.].

## 2.5.2 Intra-organisationale Barrieren

Zu den intra-organisationalen Barrieren zählen diejenigen strukturellen und kulturellen unternehmensspezifischen Bedingungen, die einen innerbetrieblichen Widerstand darstellen und dadurch der Umsetzung von Veränderungen bzw. Kooperationen entgegenstehen. Es handelt sich in erster Linie um den Widerstand von Vorgesetzten oder Mitarbeitern, der durch den Einsatz von hierarchischer Macht überwunden werden kann (vgl. [Hauschildt 1997, S. 130]). Bei innerbetrieblichen Widerständen können kommunikations- und ressourcenbezogene Barrieren unterschieden werden (vgl. [Graehl et al. 2001, S. 34]). Tabelle 6 enthält eine Übersicht möglicher kommunikations- und ressourcenbezogener Barrieren.

**Tabelle 6:** Intra-organisationale Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen

<b>kommunikationsbezogene Barrieren</b>	streng getrennte Funktionsbereiche und Zuständigkeiten
	hierarchische Strukturen
	mangelnde Informationssysteme
<b>ressourcenbezogene Barrieren</b>	Ressourcenverweigerung aufgrund personaler Barrieren
	Kooperationen besitzen untergeordnete Bedeutung in organisationaler Zielhierarchie

Kommunikationsbezogene Barrieren dominieren insbesondere in Großunternehmen aufgrund der dort vorhandenen hierarchischen Strukturen und sind zumeist durch eine verzögerte oder nicht vorhandene Weiterleitung der Informationen zwischen den Hierarchieebenen gekennzeichnet (vgl. [Rothwell et al. 1991, S. 127] und [Walter 1998, S. 51 ff.]). Darüber hinaus erfordert die Implementierung und die Aufrechterhaltung von Kooperationen häufig eine fachübergreifende Zusammenarbeit. Streng getrennte Funktionsbereiche und Zuständigkeiten fördern hierbei das Entstehen von Konkurrenzdenken zwischen einzelnen Abteilungen, was ebenfalls zu einer Verzögerung oder Unterlassung der Informationsweitergabe führen kann. Insbesondere in großen Unternehmen, in denen viele unterschiedliche Ansprechpartner für eine Veränderung vorhanden sind, kommen deshalb Wissensmanagement- und anderen geeigneten Informationssystemen eine besondere Bedeutung zu.

Ressourcenbezogene Barrieren treten demgegenüber v.a. in kleinen und mittelständischen Unternehmen auf. Sie entstehen bei der Initiierung und Implementierung der Veränderung, u.a. indem der Innovation eine untergeordnete Bedeutung zugemessen wird und sie daher bei der Zuteilung von personellen, materiellen und immateriellen Ressourcen vernachlässigt wird (vgl. [Graehl et al. 2001, S. 34 f.] und [Tietze-Stöckinger et al. 2004d, S. 11]). Darüber hinaus erschweren unklare technische, ökonomische oder organisatorische Rahmenbedingungen eine effiziente Ressourcenzuteilung (vgl. [Heck 1999, S. 29 f.]). Ein weiteres Hindernis liegt in der Definition der personellen Zuständigkeit für das Vorantreiben der Veränderung, da „definitionsgemäß niemand für das bisher unbekanntes Neue zuständig“ ist [Hauschildt 1997, S. 141]. Der Widerstand von Vorgesetzten gegenüber der Kooperation kann sich darin äußern, dass diese ihren Mitarbeitern die Verwendung

notwendiger Ressourcen verweigern (vgl. [Gemünden et al. 1996, S. 238]), weshalb aus dem personalen Widerstand einer Person eine zusätzliche, ressourcenbezogene Barriere für andere Akteure resultiert.

### 2.5.3 Inter-organisationale Barrieren

Aufgrund der Beteiligung mehrerer Unternehmen im Rahmen von Kooperationen treten neben intra-organisationalen auch inter-organisationale Barrieren auf (siehe Tabelle 7). Diese Widerstände können zum einen aus dem Kooperationsgedanken generell entstehen (Kooperationsbarrieren). Erfordert die angestrebte Kooperation eine überbetriebliche Kopplung von Stoff- und Energieströmen, können zum anderen intra-organisationale Barrieren aus der Art der zu vernetzenden Stoffströme (Kopplungsbarrieren) resultieren.

**Tabelle 7:** Inter-organisationale Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen

<b>Kooperationsbarrieren</b>	Abhängigkeit von Kooperationspartnern
	mangelhafte Kommunikation zwischen den Kooperationspartnern
	mangelndes Vertrauen zwischen den Kooperationspartnern
	Offenlegung von Information
	unterschiedliche Verhaltensweise, Normen und Werte
	Aufteilung des erzielten Mehrwerts
<b>Kopplungsbarrieren</b>	nicht zusammen passende Qualität bzw. Quantität zu koppelnder Stoffströme
	mangelnde Kontinuität zu koppelnder Stoffströme
	materielle und immaterielle Investitionen
	lange Amortisationszeiten

Eine wichtige Voraussetzung für die Kooperation zwischen Unternehmen ist das gegenseitige Vertrauen der Partner<sup>42</sup>, da einerseits jedes Unternehmen Daten offen legen muss, andererseits aber nicht sämtliche Handlungen der Partner kontrolliert werden können. Demnach liegt eine der grundlegenden Barrieren im mangelnden Vertrauen der Partner untereinander. Aus einem guten Vertrauensverhältnis wird das Verhalten der andern Kooperationspartner berechenbar, was die Komplexität einer solchen Kooperationsbeziehung reduziert (vgl. [Rentz et al. 2002]). [Wurche 1994b, S. 142 ff.] bezeichnet Vertrauen als notwendige, wenn auch nicht hinreichende Bedingung, das zur Ausschöpfung der Kooperationspotenziale erforderlich ist<sup>43</sup>. Zusätzlich können durch Vertrauen der Kontrollaufwand und die Zeit für Verhandlungen gesenkt werden, wodurch eine Reduktion der Transaktionskosten möglich ist (vgl. [Jarillo 1988, S. 36 f.]).

<sup>42</sup> Während in der Theorie des vollkommenen Marktes bei Sicherheit Vertrauen nebensächlich ist, ist Vertrauen von hoher Bedeutung für Märkte mit Unsicherheit. Zur Rolle von Vertrauen vgl. [Child et al. 1998, S. 45 ff.] und [Fichtner et al. 2000].

<sup>43</sup> [Tröndle 1987], [Lorenz 1988], [Bradach et al. 1989] und [Larson 1992] sprechen dem Vertrauensverhältnis eine vergleichbare Bedeutung zu.

Des Weiteren ist für die Bildung einer Kooperation unerlässlich, dass hieraus für alle Beteiligten die Möglichkeit entsteht, den eigenen Gewinn zu maximieren bzw. durch das Eingehen der Kooperation einen Nutzen zu erzielen (Win-Win-Situation) (vgl. [Larson 1992, S. 87]). Der gemeinsam erzielbare Mehrwert muss hierbei die beste strategische Alternative darstellen, d.h. dass der Mehrwert der von den Unternehmen realisierbaren Einzellösungen niedriger sein muss, als der der kooperativen Lösung (vgl. [Balling 1998, S. 97]). Aus dem gemeinsam erzielten Mehrwert resultiert allerdings auch die Frage der Aufteilung desselben, was zusätzliches Konfliktpotenzial impliziert (vgl. [Balling 1998, S. 133] und [Schmidtchen 2003, S. 67]).

Eine weitere Kooperationsbarriere liegt in der Angst vor der Abhängigkeit von den Partnern<sup>44</sup>. Diese Angst bezieht sich einerseits auf den möglichen Austritt eines Unternehmens aus der Kooperation, sodass Kosten für dessen Substitution entstehen bzw. die Kooperation nicht mehr weitergeführt werden kann (vgl. [Walter 1998, S. 51 ff.]). Andererseits befürchten Unternehmen insbesondere im Rahmen eines hierarchisch-pyramidal geführten Netzwerkes (z.B. zwischen kleinen und mittelständischen Zulieferunternehmen und einem großen Hersteller) eine Einschränkung ihrer Verhaltensfreiheit durch das fokale Unternehmen (vgl. [Wildemann 1996b, S. 230 ff.]).

Darüber hinaus bergen unterschiedliche Verhaltensweisen, Werte und Normen in den beteiligten Unternehmen Konfliktpotenziale (vgl. [Sydow 1992, S. 269]), weshalb eine weitere Voraussetzung für den Erfolg von Kooperationen ein gemeinsames Grundverständnis über einzuhaltende Standards und Formen der Zusammenarbeit ist. Zudem ist es wichtig, Akzeptanz für die Kooperation nicht nur in den Führungsetagen, sondern durch alle Ebenen der Unternehmen zu erzielen<sup>45</sup>. Sämtliche in den beteiligten Organisationen auftretenden Widerstände müssen frühzeitig erkannt und beseitigt werden, wozu es einer intensiven Informationspolitik bedarf (vgl. [Balling 1998, S. 122 ff.] und [Havighorst 2001, S. 198 ff.]).

Hinsichtlich Kopplungsbarrieren entstehen u.a. Widerstände aufgrund der zu tätigen Investitionen. Hierbei unterscheidet [Hauschildt 1997, S. 132] den Widerstand aufgrund der zusätzlichen finanziellen Anforderungen und den Widerstand aufgrund des antizipierten Risikos. Insbesondere Investitionen mit langer Amortisationsdauer führen zu Widerstand bei den Akteuren (vgl. [Fichtner et al. 2005]). Zur Implementierung kooperativer Beziehungen sind neben materiellen Investitionen auch immaterielle Investitionen u.a. in den Aufbau der Geschäftsbeziehungen, die Umschulung des Personals und die Vertragsgestaltung nötig. Die Bewertung dieser immateriellen Investitionen ist mit den Methoden der Erfolgsbestimmung problematisch, weshalb sie als extrem riskant gelten.

Im Rahmen von Kooperationen, die eine Kopplung von Energie- oder Stoffströmen erfordert, können weitere Kopplungsbarrieren aus einer nicht zusammen passenden Qualität, Quantität oder Kontinuität der Stoff- und Energieströme resultieren. Dieser

---

<sup>44</sup> Vgl. [Doz 1992], [Walter 1998, S. 51 ff.], [Lenz et al. 1999, S. 137] und [Belz et al. 2003, S. 755].

<sup>45</sup> Englischsprachige Autoren führen in diesem Kontext häufig den Aspekt des Commitment an und sehen in ihm einen wichtigen Faktor für den Erfolg einer Unternehmenskooperation (vgl. [Mohr et al. 1994, S. 145 f.]).

Barriere kommt eine wichtige Bedeutung zu, da inkompatible Stoff- und Energieströme u.a. zu Engpässen in Produktion und Vertrieb führen können (vgl. [Fichtner et al. 2005]). Des Weiteren erfordert eine unzureichende Qualität der Stoff- und Energieströme eine zusätzliche Aufbereitung, bevor diese in die Produktion der Partner eingeführt werden können, woraus sich zusätzliche finanzielle Belastungen ergeben, die dem Mehrwert gegenüber gestellt werden müssen, der durch die Kopplung erzielbar ist. Vor diesem Hintergrund stellen Quantität und Kontinuität der Stoff- und Energieströme kritische Erfolgsfaktoren dar, da sie die Amortisation (bzw. Amortisationsdauer) der getätigten Investitionen determinieren.

#### 2.5.4 Strukturelle Barrieren

Strukturelle Barrieren betreffen Widerstände der globalen Umwelt und können u.a. in physische, rechtlich-politische, sozio-kulturelle und technologische Barrieren gegliedert werden (siehe Tabelle 8).

**Tabelle 8:** Strukturelle Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen

<b>physische Barrieren</b>	mangelnde Infrastruktur
	mangelnde Anzahl an potenziellen Partnern
<b>technologische Barrieren</b>	Funktionsfähigkeit
	Angepasstheit an die Umgebung
	Zeitpunkt der Veränderung
<b>rechtlich-politische Barrieren</b>	Genehmigungspflichten
	Kartellvorschriften
<b>sozio-kulturelle Barrieren</b>	Akzeptanz bei Anwohnern
	Akzeptanz bei Kunden

Physische Hemmnisse betreffen in diesem Zusammenhang die lokalen Gegebenheiten hinsichtlich Infrastruktur und Rohstoffvorkommen, was v.a. bei regionalen Kooperationen eine bedeutende Barriere darstellt. Zusätzlich (ebenfalls vorwiegend bei regionalen Kooperationen) kann aus der Inexistenz adäquater Partner eine unüberwindbare Barriere resultieren (vgl. [Korhonen 2000]).

Technologische Widerstände lassen sich vereinfacht in drei Arten von Argumenten finden: Zweifel an der Funktionsfähigkeit, der Angepasstheit an die Umgebung und dem Zeitpunkt der Veränderungen (vgl. [Hauschildt 1997, S. 131 f.]). Im Rahmen der Regionalisierung von Wirtschaftsaktivitäten können darüber hinaus Barrieren aufgrund des Wegfalls von Größendegressionseffekten entstehen. Um diese ausschöpfen zu können, sind größere Inputmengen erforderlich, die auf regionaler Ebene häufig nicht erreicht werden können (vgl. [Graehl et al. 2001, S. 36]).

Hinsichtlich der rechtlich-politischen Barrieren konstatieren [Cyert et al. 1963], dass Behörden und Prüfungsinstitutionen Innovationen ablehnend gegenüber stehen, da ihnen Innovationen fremd sind und sie unvorhersehbare Konsequenzen fürchten. Im Gegensatz dazu gingen in den letzten Jahren vorwiegend positive politische Impulse

auf die Bildung von Kooperationen aus (vgl. [Balling 1998, S. 93]). Eine mögliche rechtlich-politisch Barriere liegt im europäischen Wettbewerbsrecht bzw. dessen Umsetzung in deutsches Recht [GWB 1998]<sup>46</sup>.

Sozio-kulturelle Barrieren betreffen den Widerstand der nicht institutionalisierten Umwelt der Unternehmen, weshalb Dauer, Gegenstand und Intensität dieser Barriere schwer prognostizierbar sind (vgl. [Hauschildt 1997, S. 130]). Als Beispiel hierfür seien Anwohner genannt, die aufgrund der Veränderungen eine Beeinträchtigung der Lebensqualität befürchten und Kunden, die Produkte von Unternehmen aufgrund ökologischer Gesichtspunkte boykottieren.

---

<sup>46</sup> Zu Kooperationen im europäischen Wettbewerbsrecht vgl. [Schulte 2003].

### 3 Zur Identifikation der zu analysierenden Systeme

Dieses Kapitel dient der Präsentation zweier ausgewählter betriebsübergreifender Systeme, die im Rahmen dieser Arbeit weiter analysiert werden sollen. Bevor in den nachstehenden Kapiteln auf die Motive zur Auswahl der einzelnen Konzepte eingegangen wird und diese anhand der in Kapitel 2.4 beschriebenen Kriterien typologisiert werden, werden nachstehend Gründe für die Fokussierung auf die Bereiche Energieversorgung und Abfallentsorgung dargestellt.

Beide in dieser Arbeit betrachteten Wirtschaftsbereiche unterlagen in den letzten zehn Jahren aufgrund politischer Eingriffe deutlichen Veränderungen. Im Bereich der Energieversorgung sind hier in erster Linie die Liberalisierung des Energiemarkts, der Ausstieg aus der Kernenergienutzung sowie die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels anzuführen (siehe hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 4.1.1), die Entsorgungsbranche wurde maßgeblich durch die Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (siehe hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 5.1.1) verändert. Zur Analyse betriebsübergreifender Konzepte eignen sich solche sich verändernden Wirtschaftsbereiche insbesondere, da zum einen Kooperationen hierbei eine adäquate Strategie zur Anpassung an diese Veränderungen darstellen können. Zum anderen führen diese Veränderungen möglicherweise dazu, dass vormals ökonomisch uninteressante betriebsübergreifende Konzepte aufgrund der neuen Rahmenbedingungen zu Kosteneinsparpotenzialen führen. Darüber hinaus ergibt sich aus den im vorigen Kapitel dargestellten motivationalen Barrieren ein weiteres Motiv zur Selektion von Wirtschaftsbereichen mit einem sich verändernden Umfeld. Von den Veränderungen betroffene Unternehmen sind gezwungen, sich an diese Veränderungen anzupassen. Dementsprechend ist auch ohne den Aufbau kooperativer Beziehungen zu anderen Unternehmen eine Änderung des wirtschaftlichen Verhaltens notwendig. Motivationale Barrieren betroffener Personen müssen in diesen Unternehmen somit unabhängig von der Entscheidung für oder gegen kooperative Beziehungen überwunden werden und stellen demnach kein zusätzliches Hindernis für eine Kooperation dar.

Ein weiteres Motiv zur Auswahl der Bereiche Energieversorgung und Abfallentsorgung ergibt sich aus der Kopplungsbarriere in Form einer ungenügenden Qualität der betriebsübergreifend zu betrachtenden Stoffströme. Diese Barriere stellt einen kritischen Erfolgsfaktor einer betrieblichen Systemgrenzenerweiterung dar, da eine nicht zusammen passende Qualität zusätzliche Aufbereitungsschritte erfordert bzw. eine betriebsübergreifende Betrachtung verhindern kann. Im Bereich der Energieversorgung kann diese Barriere zumindest für das Produkt Strom bereits im Vorfeld weitgehend ausgeschlossen werden, da dieses bereits im Rahmen der Ist-Situation von allen Energieversorgungsunternehmen in ein gemeinsames Netz<sup>47</sup>

---

<sup>47</sup> Das Stromnetz setzt sich aus vier untereinander über Transformatoren gekoppelten Netzen zusammen: Höchstspannungsnetz (380 kV und 220 kV), Hochspannungsnetz (110 kV), Mittelspannungsnetz (30 kV, 20 kV und 10 kV) und Niederspannungsnetz (400 V und 230 V). Die Nennfrequenz beträgt 50 Hz. Im sogenannten TransmissionCode [VDN 2003] sind die Netz- und Systemregeln der Übertragungsnetzbetreiber festgelegt (bspw. Anforderungen beim Anschluss

eingespeist wird. Somit werden auch ohne Kooperation an sämtliche existierende Stromerzeugungsanlagen dieselben Anforderungen bezüglich der wesentlichen Eigenschaften des erzeugten Stroms gestellt. Abfälle weisen demgegenüber zwar eine deutliche Heterogenität auf, jedoch entstehen in vielen Unternehmen gleiche Abfallfraktionen wie beispielsweise Papier/Pappe/ Kartonagen. Für solche Abfallfraktionen ist eine betriebsübergreifende Betrachtung ebenfalls ohne zusätzliche Aufbereitungsschritte möglich.

### **3.1 Kooperationen in der Energiewirtschaft**

#### **3.1.1 Motive für Kooperationen zwischen Unternehmen der Energiewirtschaft**

Im Rahmen der Liberalisierung wurden Kooperationen zur Bewältigung der neuen Herausforderungen des Wettbewerbs als unverzichtbar oder zumindest als bedeutendes strategisches Element der Unternehmen angesehen (vgl. [Meller 1998] und [Picot 2000, S. 134])<sup>48</sup>. Allerdings führte diese Sichtweise auch zur Bildung von Kooperationen, die keine wirksame Neupositionierung der Unternehmen erkennen lassen, sondern vielmehr den Versuch darstellen, sich vor den Auswirkungen des Wettbewerbs zu schützen. Diese Kooperationen werden sich jedoch aufgrund mangelnder Inhalte nicht auf Dauer in einem liberalisierten Markt behaupten können (vgl. [Glimpel 2003, S. 236]). [Steckert 2000, S. 648] führt an, dass insbesondere die Stadtwerke unterschiedlich stark vom Wettbewerb betroffen sind. Zwar führte der Erlösverfall bei allen Stadtwerken zu sinkenden Renditen, jedoch sind Stadtwerke mit großem Anteil an Eigenerzeugung deutlich stärker betroffen als jene, die eine reine Verteilfunktion innehaben.

Die Motive der Unternehmen zur Bildung von Kooperationen lassen sich auch im Bereich der Energiewirtschaft auf die beiden Hauptmotive Ausschöpfen von Synergieeffekten und Streben nach Wachstum zurückführen (vgl. Kapitel 2.2). Auf eine Auswahl der darüber hinaus existierenden Vielzahl von Einzelmotiven wird im Folgenden eingegangen.

Eines der Einzelmotive liegt in der Erzielung einer Effizienzsteigerung durch einen Zugewinn an Know-how<sup>49</sup>. Hierbei ist die Kooperation der Fusion vorzuziehen, da durch die verbleibende Eigenständigkeit der Partner eine erhöhte Qualität erreicht werden kann (vgl. [Jochum 2001, S. 111]). Im Kontext der Effizienzsteigerung kommt der Identifikation eines geeigneten Partners eine bedeutende Rolle zu, um existierende Potenziale weitest möglich ausschöpfen zu können. Allgemein gelten die Stadtwerke als interessante Partner, sowohl aus der Sicht der Regional- und Flächenversorger als auch aus Sicht der Stadtwerke selbst<sup>50</sup>. Eine Studie im Auftrag des Verbands der Elektrizitätswirtschaft (VDEW) im Jahre 2003 ergab, dass 76 %

---

von Erzeugungseinheiten, Sicherstellung und Inanspruchnahme von Systemdienstleistungen wie Frequenz- und Spannungshaltung).

<sup>48</sup> In dieser Arbeit wird lediglich auf Kooperationen zwischen Unternehmen der Energiewirtschaft eingegangen. Kooperationen mit Unternehmen anderer Branchen (z.B. Handwerk (vgl. auch [Thomzik et al. 2003])) stellen gleichermaßen ein Instrument zum Erhalt und zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Energieversorgungsunternehmen dar.

<sup>49</sup> Vgl. [Jochum 2001, S. 111], [Edelmann et al. 2003, S. 461] und [EY/VDEW 2003, S. 3].

<sup>50</sup> Vgl. [Forthmann 2002 S. 38], [Edelmann et al. 2003, S. 461] und [EY/VDEW 2003, S. 3].

der Stadtwerke und Regionalversorger eine horizontale Kooperation bevorzugten, für eine vertikale Kooperation mit dem Vorlieferanten sprachen sich 11 % der Geschäftsführer und Vorstände dieser Unternehmen aus (vgl. [EY/VDEW 2003, S. 3]). Eine ähnliche Einschätzung ergibt sich bei der Befragung der Stadtwerke hinsichtlich des antizipierten Erfolgs einer Kooperation. Über 90 % der Befragten stufen eine horizontale Kooperation als Erfolg versprechend ein, etwa die Hälfte erachtet eine vertikale Kooperation als nützlich (vgl. [Edelmann et al. 2003, S. 461])<sup>51</sup>.

Ein ebenfalls wissensbasiertes Motiv stellt nicht auf den Zugewinn von Know-how, sondern auf die Bündelung komplementärer Stärken ab (vgl. [Jochum 2001, S. 111]). Ein Beispiel ist die Kooperation zwischen Flächenversorger und Stadtwerk: Eine Stärke der Stadtwerke liegt in ihrer Nähe zum Kunden, die den Flächenversorgern meist fehlt<sup>52</sup>. Stadtwerke sind hierdurch häufig besser in der Lage, Lastprognosen für ihre Kunden zu erstellen. Auf der anderen Seite können die Stadtwerke im Bereich des Beschaffungsportfolios vom Wissen der Flächenversorger profitieren (vgl. [Glimpel 2003, S. 237]). Generell wird die Sicherung günstiger Beschaffungsquellen insbesondere von Stadtwerken als Motiv zur Kooperationsbildung genannt (vgl. [EY/VDEW 2003, S. 3]), wobei dies neben der vertikalen Kooperation mit dem Vorlieferanten auch durch eine horizontale Kooperation mit anderen Stadtwerken in Form von Einkaufsgemeinschaften (z.B. Kommunale Energiedienstleistungsgesellschaft Südsachsen GmbH, Trianel European Energy Trading GmbH (Aachen), Kommunale Energiedienstleistungsgesellschaft Lausitz mbH und die KOM-Strom AG) erreicht werden kann (vgl. [Ruhland 2000, S. 934]).

Durch die Liberalisierung der Energiewirtschaft sind die Energieversorgungsunternehmen mit einer zunehmenden Planungsunsicherheit konfrontiert. Diesem Umstand versuchen sie zu begegnen, indem sie (vgl. [Steckert 2000, S. 649])

- Ausgaben für längerfristige Forschung und Entwicklung vermeiden,
- kurzfristige Projekte mit kurzen Amortisationsdauern bevorzugen,
- sich Ergänzungstechnologien statt Innovationen zuwenden und
- Investitionen vermeiden<sup>53</sup>.

Allerdings kann diese Verhalten nicht langfristig aufrechterhalten werden, da in den nächsten 20 Jahren über die Hälfte der bestehenden Kraftwerkskapazitäten in Deutschland ihre technische Lebensdauererreichung erreichen (vgl. [Krämer 2003, S. 2]). Eine Möglichkeit mit der zunehmenden Planungsunsicherheit umzugehen, liegt im Eingehen langfristiger Kooperationsverbindungen mit dem Ziel der Risikoreduktion (vgl. [Jochum 2001, S. 211 und [Wetjen 2003, S. 8]). In diesem Zusammenhang stellt v.a. für Stadtwerke mit Eigenerzeugung sowie Regionalversorger die Errichtung von Gemeinschaftsheizkraftwerken durch zwei oder mehrere Energieversorgungsunternehmen eine Lösung dar. Die Einzelunternehmen dann nicht mehr das

---

<sup>51</sup> Allerdings sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass lediglich ein Viertel der befragten Unternehmen einen nennenswerten Anteil an Eigenerzeugung auswies und bei der Auswertung keine Differenzierung zwischen diesen Unternehmen stattfand.

<sup>52</sup> Vgl. [Steckert 2000, S. 653], [Seele 2001, S. 556] und [Forthmann 2002 S. 38].

<sup>53</sup> Beispielsweise wurde in England und Wales seit der Liberalisierung im Jahr 1990 nur in Gaskraftwerke investiert (vgl. [Bartsch et al. 2002, S. 6]).

Risiko in Höhe der Gesamtinvestition sondern lediglich in der Höhe eines definierten Anteils. Des Weiteren ist die Mitfinanzierung eines Gemeinschaftskraftwerks in der Regel die einzige Möglichkeit für Stadtwerke, an den Vorteilen von Großtechnologien wie besseren Wirkungsgraden und der Erzielung niedrigerer Brennstoffpreise zu partizipieren. Aus Sicht der Flächenversorger liegt ein Motiv zur Kooperation mit einem Stadtwerk in der ökonomisch und ökologisch attraktiven Möglichkeit zur Produktion von Wärme und Strom in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen.

### **3.1.2 Typologisierung von Kooperationen zur Errichtung und zum Betrieb von Gemeinschaftsheizkraftwerken**

Dieses Kapitel der Arbeit dient der Abgrenzung der in Kapitel 4 analysierten Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks. Hierzu werden die im Kapitel 2.4 vorgestellten Kriterien zur Typologisierung von Kooperationen herangezogen und die für eine Kooperation zwischen Stadtwerk und Flächenversorger zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks typischen Ausprägungen diskutiert (siehe Tabelle 9).

Das primäre Motiv der Unternehmen zur Errichtung eines Gemeinschaftsunternehmens liegt in der Nutzung von Synergieeffekten im Rahmen der Produktion. Zwar unterstützt diese Kooperation auch das Streben der Unternehmen nach Wachstum, da der Flächenversorger hierdurch in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken seine Position in der entsprechenden Region ausbauen kann. Aus Sicht der Stadtwerke handelt es sich jedoch eher um einen Erhalt der Eigenerzeugung als um deren Erweiterung. Das Bezugsobjekt der Kooperation sind die Kuppelprodukte Strom und Wärme. Aufgrund der Begrenzung der Kooperationswirkung auf das Belieferungsgebiet der Stadtwerke handelt es sich in der Regel um eine regionale Ausdehnung der Kooperation.

Die wirtschaftliche Selbstständigkeit der Unternehmen bleibt bei der Errichtung eines Gemeinschaftsheizkraftwerkes erhalten. Allerdings muss das beteiligte Stadtwerk im Rahmen seiner zukünftigen Kraftwerksausbau- bzw. -rückbauplanung den aus den Entscheidungen resultierenden Grad der Abhängigkeit von dem Gemeinschaftsheizkraftwerk berücksichtigen. Eine Vernachlässigung dieses Zusammenhangs kann zu einer wirtschaftlichen Abhängigkeit und somit Unselbstständigkeit des Stadtwerks führen.

Die direkte Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen reicht weit über einen Erfahrungsaustausch hinaus und kann bis hin zur Gründung eines Gemeinschaftsunternehmens zum Betrieb des Gemeinschaftsheizkraftwerks führen. Aufgrund der Funktionszusammenlegung im Kernbereich der Leistungserstellung der beteiligten Unternehmen und der Höhe der zu tätigen Investitionen basiert die Zusammenarbeit auf einem langfristigen Vertrag bzw. auf der Gründung eines Gemeinschaftsunternehmens. Hinsichtlich der Bindungsintensität ergibt sich somit sowohl eine vertragliche als auch kapitalmäßige Verflechtung der Partner. Die Höhe der zum Kraftwerksbau notwendigen Investitionen erfordert demzufolge eine langfristige kooperative Verbindung, die als strategisches Ziel beider Unternehmen definiert sein muss. Die zur Ausgestaltung und Risikominimierung notwendigen Analysen im

Vorfeld der Errichtung eines Gemeinschaftsheizkraftwerks erfordern ein pro-aktives Verhalten der beteiligten Unternehmen.

**Tabelle 9:** Übersicht wichtiger Charakteristika von Kooperationen zwischen Stadtwerken und Flächenversorgern (Ausprägungen für ein Gemeinschaftsheizkraftwerk grau hinterlegt)

Kriterium	Ausprägung der Kooperationen			
Grundmotive	Nutzung von Synergieeffekten		Streben nach Wachstum	
Gegenstand/Sachziel	F&E	...	Entsorgung	Produktion
Intensität	Erfahrungsaustausch	...	Gemeinschaftsunternehmen	
Bezugsobjekt	Produkte/Waren		Dienstleistungen	
Zusammenarbeit	direkt		indirekt	
Dauer	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	
Zielrichtung	operativ	taktisch	strategisch	
Stabilität	stabil		instabil (nur für 1 Projekt)	
Ressourceneinbringung	projektbezogen		unbefristet	
Richtung	horizontal	vertikal	diagonal/lateral	
Anzahl der Partner	bilateral		multilateral	
Aufbau	polyzentrische Struktur		fokales Unternehmen	
Dominanz	initiator dominante Kooperation	ausgewogene Kooperation	partner dominante Kooperation	
Vertragsbasis	vertragsfrei	kurzfristiger Vertrag	langfristiger Vertrag	Gemeinschaftsunternehmen
Funktionsverknüpfung	Funktionszusammenlegung		Funktionsabstimmung	
Erhalt der wirtschaftlichen Selbstständigkeit	gering		stark	
Bindungsintensität	formlos	kapitalmäßig	vertraglich	
Terminiertheit	befristet		unbefristet	
Geografische Ausdehnung	lokal	regional	national	international
Koordination	Preismechanismen		Hierarchie	
Koordinationsmechanismen	gegenseitige Anpassung	Standardisierung	gemeinsame Variable	
Kommunikation	gelegentlich		laufend	
Aktivität der Beteiligten	pro-aktiv		reaktiv	
Wettbewerbswirkung	fördernd	neutral	beschränkend	

Hinsichtlich der Kooperationsrichtung gestaltet sich eine Festlegung schwierig. Lediglich die Ausprägung diagonal/lateral kann im Vorfeld ausgeschlossen werden, da die partizipierenden Unternehmen der gleichen Branche entstammen. Vor der Liberalisierung der Energiemärkte hätte die Ausprägung eindeutig als vertikal festgelegt werden können, da der Flächenversorger in der Regel als Vorlieferant der

Stadtwerke fungierte. Durch die Abschaffung der Demarkationsgebiete besteht jedoch heute für Flächenversorger die Möglichkeit, deutschlandweit den Strom direkt an Endkunden zu verkaufen. Hierdurch können Flächenversorger und Stadtwerke als Unternehmen derselben Wertschöpfungsstufe angesehen werden, was auf eine horizontale Ausprägung der Kooperation hindeutet. Da jedoch bis heute die Flächenversorger lediglich einen geringen Anteil der Endkunden beliefern und primär als Vorlieferanten der Stadtwerke fungieren, wird im Rahmen dieser Arbeit die Kooperationsrichtung als vertikal angesehen. Diese Sichtweise lässt den Schluss zu, dass durch die Kooperation zum Betrieb und zur Errichtung eines Gemeinschaftsheizkraftwerkes eine neutrale Wettbewerbswirkung und keine Wettbewerbsbeschränkung resultiert.

Die Ausprägung des Kriteriums Stabilität ist ebenfalls schwer zu erfassen. Einerseits kann das Gemeinschaftsheizkraftwerk als ein gemeinsames Projekt angesehen werden, auf das sich die Zusammenarbeit beschränkt. Andererseits wird im Rahmen des Betriebs täglich gemeinsam Elektrizität bereitgestellt, also im Rahmen der Kooperation mehrfach eine Aufgabe erfüllt, weshalb die Kooperation als stabil betrachtet wird. Dennoch wird die Dauer der Zusammenarbeit in der Regel auf die Lebensdauer des Gemeinschaftsheizkraftwerks befristet sein und sich die Ressourceneinbringung der Unternehmen auf das Projekt beschränken.

Die Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks wird primär durch hierarchische Strukturen koordiniert. Der Koordinationsmechanismus liegt in der Definition einer gemeinsamen Variablen (z.B. der Auslastung des Gemeinschaftsheizkraftwerks).

## **3.2 Kooperationen basierend auf dem Konzept der unmittelbaren Nähe**

Da bislang keine Erfahrungen mit dem Konzept der unmittelbaren Nähe im Bereich der Entsorgung vorliegen, wird im Rahmen dieses Kapitels auf verwandte Kooperationsansätze eingegangen, bevor eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks beschrieben wird. Als verwandte Ansätze wurden zum einen Verwertungsnetzwerke<sup>54</sup> identifiziert, da in deren Rahmen in einer Region angesiedelte Produktionsunternehmen unter dem Ziel der Verwertung und Vermeidung von Abfällen miteinander kooperieren (vgl. [Wietschel et al. 2000b, S. 37 f.]). Zum anderen wird im Rahmen von Industrieparks die Nähe der beteiligten Akteure zur Erzielung von Synergieeffekten und Effizienzsteigerung genutzt, weshalb auch diese Kooperationen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

### **3.2.1 Existierende Konzepte**

#### **3.2.1.1 Verwertungsnetzwerke**

Verwertungsnetzwerke sind durch die Kooperation mehrerer Produktionsunternehmen gekennzeichnet, wobei die Abfälle eines Unternehmens zur Rohstoff-

---

<sup>54</sup> Die Begriffe Industriesymbiose, Recycling Park, Industrial symbiosis network, Eco-Industrial Park und Resource Recovery Network werden häufig synonym zum Begriff Verwertungsnetzwerk verwendet.

substitution in einem anderen Unternehmen eingesetzt werden. Es wird hierbei versucht, geschlossene Kreisläufe der Natur zu imitieren, indem Stoff- und Energieströme über die Unternehmensgrenzen hinaus vernetzt werden, anstelle diese zu emittieren bzw. der Entsorgungswirtschaft zur Reduktion zuzuführen (vgl. [Schwarz 1998, S. 11 ff.] und [Wietschel et al. 2000b, S. 37 f.]). Beispielsweise entwickelten [Hammerschmid 1990] und [Winkler 1991] technische Entsorgungswege für Reststoffe aus der Rauchgasreinigung in Baden-Württemberg und zeigten Verwertungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Industriezweigen (z.B. Zement-, Gips-, Düngemittelindustrie) auf.

Das primäre Ziel der Netzwerkakteure liegt im Allgemeinen in der Erreichung ökonomischer Vorteile (vgl. [Schwarz et al. 1997, S. 50] und [Graehl et al. 2001, S. 32])<sup>55</sup>. Für Emittenten besteht der Vorteil eines Verwertungsnetzwerkes darin, dass sie einen dauerhaften Rückstandsabnehmer gewinnen und Entsorgungskosten vermeiden können. Eventuell besteht für sie sogar die Möglichkeit, von Abfall- und Abwasserabgaben befreit zu werden oder Erlöse durch den Verkauf der Rückstände zu erzielen. Der Rückstandsverwerter kann durch den Bezug der Reststoffe seine Material- und Energiekosten senken und möglicherweise Erlöse durch die Rückstandsübernahme erzielen (beispielsweise Zementwerke durch die Abnahme von Altreifen) (vgl. [Strebel 1998, S. 3]). Ein weiteres Ziel von Verwertungsnetzwerken ist die Vermeidung von Engpässen durch die Bildung stabiler Zuliefer- und Entsorgungsbeziehungen (vgl. [Schwarz 1994, S. 91]). Hinsichtlich ökologischer Gesichtspunkte sind Ziele von Verwertungsnetzwerken der Schutz von Ressourcen und die Vermeidung von Emissionen (vgl. [Wietschel et al. 2000b, S. 40]).

Ein wesentliches Merkmal von Verwertungsnetzwerken ist ihre regionale oder lokale Ausrichtung<sup>56</sup>. Dies ist dadurch bedingt, dass zum einen aufgrund des häufig geringen Wertes der zu verwertenden Abfälle ein umfangreicher Transport unwirtschaftlich wäre und zum anderen Transportverluste anfallen können, die eine Weiterverarbeitung unrentabel machen (z.B. bei der Nutzung von Abwärme) (vgl. [Krcal 2000, S. 28]). Ein weiterer Grund für die räumliche Nähe der Netzwerkpartner ist ökologisch motiviert, da es durch den Transport über weite Entfernungen zu vermehrten verkehrsbedingten Emissionen kommt, was der Zielsetzung eines solchen Netzwerkes entgegen stehen kann. In der Regel sind die an einem Verwertungsnetzwerk beteiligten Unternehmen gleichberechtigt, sodass von polyzentrisch organisierten Netzwerken gesprochen werden kann (vgl. [Gunn 2000, S. 101]). Im Gegensatz zu vielen anderen Netzwerktypen handelt es sich bei Verwertungsnetzwerken meist um laterale Kooperationsbeziehungen, was darin begründet liegt, dass aufgrund der Heterogenität der beteiligten Akteure die Stoff- und Energieströme besser in Einklang zu bringen sind und Konkurrenzbeziehungen vermieden werden (vgl. [Kaluzza et al. 1998, S. 29] und [Wietschel et al. 2000a, S. 569]). Im Allgemeinen ist die Fristigkeit von Verwertungsnetzwerken nicht beschränkt, sondern es ist in den meisten Fällen zu beobachten, dass eine

---

<sup>55</sup> 12 von 14 der von [Graehl et al. 2001] untersuchten Verwertungsnetzwerken entstanden ausschließlich aufgrund wirtschaftlicher Interessen, lediglich zwei Netzwerke aufgrund von ökonomischen und ökologischen Zielsetzungen.

<sup>56</sup> Vgl. [Desrochers 2000, S. 1], [Wietschel et al. 2000b, S. 40 f.] und [Lambert et al. 2002, S. 472 f.]

langfristige Zusammenarbeit angestrebt wird (vgl. [Schwarz 1998, S. 12] und [Strebel 1998, S. 4]). Eine Besonderheit von Verwertungsnetzwerken ist, dass deren Aufbau häufig institutionell unterstützt wird, da durch ihre ökologische Zielrichtung ein Förderinteresse von Seiten der Gesellschaft und Politik gerechtfertigt ist.

Bei der Analyse von bestehenden Netzwerken lassen sich trotz der dargestellten typischen Merkmalsausprägungen von Verwertungsnetzwerken wesentliche Unterschiede in ihrem Ansatz der Stoff- und Energiestromvernetzung feststellen (siehe Tabelle 10). Aus diesem Grund werden nachstehend zwei Grundtypen von Verwertungsnetzwerken differenziert und anhand ihrer Merkmalsausprägungen voneinander abgegrenzt. In der betrieblichen Praxis sind jedoch auch hybride Formen dieser Grundtypen anzutreffen<sup>57</sup>.

Bei technisch-determinierten Verwertungsnetzwerken kooperieren nur wenige ausgewählte Industrieunternehmen mit großen Mengen an verwertbaren Stoff- und Energieströmen<sup>58</sup>. Die Relevanz der hier auftretenden Massenströme erfordert dabei die Einführung von eigenen Transportsystemen, die oftmals aufgrund des Umstandes, dass in vielen Fällen Energieträger (z.B. Dampf, Gas) oder auch Flüssigkeiten (z.B. Wasser) ausgetauscht werden, leitungsgebunden sind (vgl. [Wietschel et al. 2000a, S. 569]). Zusätzlich müssen bestehende Produktionsabläufe modifiziert bzw. in Neuanlagen zur Harmonisierung der Stoff- und Energieströme investiert werden. Demzufolge ist die Errichtung derartiger Verwertungsnetzwerke in der Regel mit hohen Investitionen verbunden (vgl. [Kaluzza et al. 1996, S. 29]).

**Tabelle 10:** Klassifikation von Verwertungsnetzwerken (vgl. [Rentz et al. 2002, S. 31])

<b>Netzwerktyp</b>	<b>Technisch determinierte Netzwerke</b>	<b>Marktorientierte Netzwerke</b>
<b>Koordination</b>	Kooperation, Netzwerk nach betriebswirtschaftlicher Definition (als hybride Kooperationsform zwischen Markt und Hierarchie)	marktliche Koordination (Markttransaktionen auf Basis kurz- oder längerfristiger Lieferbeziehungen)
<b>Wirtschaftliche Abhängigkeit</b>	hoch	gering
<b>Anzahl der Akteure</b>	gering	hoch
<b>Räumliche Distanz</b>	gering	ausgedehnt
<b>Informationsaustausch/ Kommunikation</b>	direkt oder zwischenbetriebliche Institution	zwischenbetriebliche Institution
<b>Zielsetzung zur Verknüpfung von Stoff- und Energieströmen</b>	Realisierung von technischen Lösungen, oft leitungsgebunden	Zusammenführung von (mehreren) Anbietern und Nachfragern, Logistikkonzepte
<b>Investitionsvolumen</b>	hoch	niedrig

<sup>57</sup> Zu alternativen Klassifizierungen siehe [Kaluzza et al. 1996], [Strebel et al. 1994] und [Strebel 1995].

<sup>58</sup> [Fichtner et al. 2004] differenzieren Verwertungsnetzwerke mit dem Ziel der Energierückgewinnung als eigenständige Sonderform technisch-determinierter Verwertungsnetzwerke.

Eine Indikation für die Bildung von technisch-determinierten Netzwerken liegt in erster Linie dann vor, wenn Unternehmen mit Produktionsstätten in einer räumlich eng begrenzten Region angesiedelt sind. Dies begründet sich in der Tatsache, dass u.a. die Transportentfernung insbesondere bei dem geringen Wert der meisten Abfälle die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit des Zusammenschlusses determiniert (vgl. [Kaluza et al. 1996, S. 29] und [Ehrenfeld et al. 1997, S. 75]). Über eine Funktionsabstimmung zwischen den Netzwerkakteuren hinaus kann es zu einer Funktionszusammenlegung von bestimmten betrieblichen Aufgabenbereichen wie der Energie- oder Wasserversorgung kommen. Im Rahmen einer Funktionszusammenlegung werden in der Regel Gemeinschaftsunternehmen gegründet.

Des Weiteren unterstützt die räumliche Nähe der Netzwerkakteure die Entwicklung persönlicher Beziehungen und somit einer Vertrauensbasis (vgl. [Krcal 2000, S. 33]). Diese Vertrauensbasis bildet eine wichtige Grundlage für die erfolgreiche Existenz eines Verwertungsnetzwerkes, da die Schaffung neuer wirtschaftlicher Strukturen in Form einer solchen Kooperation zu einer Abhängigkeit der Partner führt. Die Koordination technisch-determinierter Verwertungsnetzwerke ist aufgrund der begrenzten Zahl an beteiligten Unternehmen und der lokalen Nähe durch direkten persönlichen Kontakt durchführbar (vgl. [Fichtner et al. 2000]). Allerdings treten aufgrund des in diesen Netzwerken in der Regel fehlenden Zentralorgans hohe Koordinationskosten auf (vgl. [Kaluza 2001, S. 6]).

In marktorientierten Verwertungsnetzwerken werden anfallende Stoffströme von Rückständen unterschiedlicher Unternehmen systematisch erfasst und gebündelt einer Verwertung zugeführt. Bei dieser Art des Netzwerkes ist auch die Integration von Unternehmen der Reproduktionswirtschaft möglich (vgl. [Schwarz et al. 1997]). Für eine erfolgreiche Implementierung eines marktorientierten Netzwerkes müssen die Produktqualität sichergestellt und eine ausreichende Handelsmenge von homogenen Produkt(grupp-)en vorhanden sein (vgl. [Wietschel et al. 2000a, S. 570]).

Im Gegensatz zu technisch-determinierten Verwertungsnetzwerken kann an einem marktorientierten Verwertungsnetzwerk eine große Anzahl von (kleinen und mittelständischen) Unternehmen teilnehmen, da auch kleinere Mengen unternehmensspezifischer Stoffströme in das Konzept integriert werden können (vgl. [Fichtner et al. 2004, S. 137]). Aufgrund der inhomogenen Teilnehmerstruktur (unterschiedliche Unternehmensgröße, Absatzgebiete, Spezialisierungen) ist eine Teilnahme von Unternehmen derselben Wertschöpfungsebene und Branche durchführbar und dadurch ein Erfahrungsaustausch bei branchenspezifischen Entsorgungsproblemen möglich.

Da bestehende Produktionsstrukturen beibehalten werden können und die Errichtung von aufwändigen Transportsystemen entfällt, sind meist keine umfangreichen Investitionen zu tätigen (vgl. [Sterr 2000]). Zur Organisation des Netzwerkes kann oftmals auf eine vertragliche Regelung der Kooperation verzichtet werden und das Netzwerk marktwirtschaftlich auf Basis von Preismechanismen oder kurzfristigen Lieferverträgen koordiniert werden. Infolge der Zusammenführung von Anbietern (stoffliche Quellen) und Nachfragern (sekundärrohstoffliche Senken) leitet sich die Notwendigkeit eines Verwertungsnetzwerkes durch eine informationelle und

logistische Unterstützung her. Die Aufgaben der Koordination sollten durch eine zwischenbetriebliche Institution durchgeführt werden, um der hohen Komplexität durch die Vielzahl von Netzwerkakteuren aus unterschiedlichen Branchen und den möglichen Netzwerkbeziehungen gerecht zu werden. Die Potenziale eines solchen Netzwerkes liegen dabei häufig in der Bündelung von Abfallströmen, wodurch eine Verwertung im Gegensatz zu einzelbetrieblichen Lösungen rentabel wird.

Europas wohl bekannteste Verwertungsnetzwerk ist die Industriesymbiose Kalundborg in Dänemark, das als eines der wenigen Netzwerke gilt, die reibungslos funktionieren (vgl. [Christensen 1998, S. 323 ff.]). Zur Beschreibung dieses und weiterer europäischer Verwertungsnetzwerke sei an dieser Stelle auf [Wildemann 1996a, S. 305 ff.], [Hasler et al. 1998, S. 305 ff.], [Kreikebaum 1998, S. 74 ff.], [Vorbach 1998, S. 223 ff.], [Strebel et al. 1998, S. 1 ff.] und [Wietschel et al. 2000b, S. 36 ff.] verwiesen. Informationen zu Verwertungsnetzwerken in Nordamerika finden sich u.a. in [RTI 1994], [Côté et al. 1998] und [Hollander 2001].

### **3.2.1.2 Industrieparks**

Eine weitere Form der Regionalisierung von Wirtschaftsaktivitäten durch überbetriebliche Zusammenarbeit ist im Konzept der Industrieparks zu sehen, welche zu den „besonderen industriellen Standortgemeinschaften“ zählen<sup>59</sup>. Auch hinsichtlich dieses Terminus weicht das Begriffsverständnis der Autoren teilweise deutlich voneinander ab, weshalb im Folgenden exemplarisch die Definitionen ausgewählter Autoren wiedergegeben werden. Übersichten zu existierenden Definitionsansätzen von Industrieparks finden sich u.a. bei [Niesing 1970, S. 17 ff.], [Hennicke et al. 1986, S. 36 ff.] und [Schorer 1994, S. 11 ff.].

[Müggenborg 2003a, S. 11] definiert Industrieparks als „standortspezifische, industriell genutzte Einrichtungen, bei denen auf engem Raum eine Mehrzahl rechtlich selbständiger Unternehmen in einem engen Verbund von Lieferungen und Leistungen zusammenarbeitet und bei denen die Nutzer des Parks typischerweise verschiedene Struktureinrichtungen wie z.B. die Kanalisation, das Klärwerk, das Rohrleitungsnetz, die Werksstraßen, den Werksschutz, die Werksfeuerwehr usw. gemeinsam nutzen. Industrieparks setzen also eine standortspezifische Einrichtung, in der Regel ein umzäuntes Werksgelände voraus.“ Die Definition von [Hüttermann 1985, S. 16] stimmt mit dieser weitgehend überein, wobei das Konzept hier auf die Ansiedlung kleiner bis mittelgroßer Betriebe fokussiert. [Gareis 2002, S. 21] schränkt das Konzept verglichen hierzu weiter ein, indem sie „unter einem Industriepark ... eine abnehmernahe, gemeinschaftliche Ansiedlung von mehreren Zulieferern in der Regel eines Abnehmers und/oder beauftragten Dienstleistern“ versteht und eine gesamtheitliche Planung bei der Entstehung des Standorts fordert. Analog zu [Müggenborg 2003a] und [Hüttermann 1985] setzt sie die Bereitstellung von gemeinschaftlichen Flächen, Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen in Industrieparks voraus. Im Vergleich zu [Gareis 2002] finden sich ähnliche Definitionen von Industrieparks bei [Bitzer et al. 1995] und [Rinza 1999].

---

<sup>59</sup> Nach [Hüttermann 1985, S. 18] sind besondere Standorte aufgrund ihrer Lage, Ausstattung, Trägerschaft etc. gegenüber anderen Standorten besonders attraktiv.

Bereits diese Definitionen zeigen, dass das Begriffsverständnis verschiedener Autoren bezüglich Industrieparks deutlich voneinander abweicht, wobei übereinstimmend stets das Vorhandensein einer gemeinsamen Infrastruktur von den Autoren herausgestellt wird. Die Definitionsvielfalt lässt sich u.a. auf die Vielzahl der in der Praxis entstandenen Sonderformen von Industrieparks zurückführen<sup>60</sup>:

- Technologieparks werden als Instrument der Wirtschaftspolitik in Regionen mit hohem Forschungs- und Entwicklungspotenzial von Behörden initiiert und von Investorenkonsortien betrieben, um über einen unbefristeten Zeitraum die Ansiedlung Sach- oder Dienstleistungen erbringender, innovativer Unternehmen unterschiedlicher Branchen zu fördern<sup>61</sup>.
- Gründerzentren werden als Instrument der Wirtschafts- und Entwicklungspolitik in Regionen mit hohem Forschungs- und Entwicklungspotenzial von Behörden initiiert und von Investorenkonsortien betrieben, um über einen Zeitraum von drei bis fünf Jahren Sach- oder Dienstleistungen erbringende Existenzgründer unterschiedlicher Branchen anzusiedeln mit dem Ziel, durch die Reduktion des Gründungsrisikos und die Erleichterung des Markteintritts Entwicklungspotenziale in Kommune bzw. Region zu fördern<sup>62</sup>.
- Chemieparks entstehen auf den Standorten von Chemieunternehmen durch Ausgliederung von Unternehmenseinheiten. Das ehemalige Chemieunternehmen transformiert zu einer Betreibergesellschaft und siedelt im Rahmen einer ex-post Nutzungsüberlegung für einen unbefristeten Zeitraum vorwiegend Sach- und Dienstleistungsunternehmen aus der Chemiebranche an<sup>63</sup>.
- Zulieferparks sind gekennzeichnet durch eine in unmittelbarer Nähe eines Abnehmers industriell nutzbare Fläche, die der gemeinschaftlichen Nutzung durch mehrere Zulieferunternehmen dient (vgl. [Pfohl et al. 2000a, S. 53]).

Da das Entsorgerpark-Konzept deutliche Parallelen zu Zulieferparks aufweist, wird in nachstehendem Unterkapitel weiter auf diese Sonderform der Industrieparks eingegangen.

### **3.2.1.3 Zulieferparks**

Zulieferparks wurden bisher überwiegend in der Automobilindustrie implementiert. Sie werden durch die Automobilhersteller initiiert, wobei der Automobilhersteller keine Ansiedlung im Zulieferpark anstrebt, sondern auf die Einrichtung eines Puffers für die Vormontage und ein Instrument zur sequenzgenauen Anlieferung zielt (vgl. [Rinza 1999] und [Klug 2001])<sup>64</sup>.

---

<sup>60</sup> Nachstehende Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Des Weiteren ist anzumerken, dass in der Praxis häufig Hybride der genannten Sonderformen auftreten.

<sup>61</sup> Vgl. [Pett 1994], [Tamásy 1997] und [Strunk 2001].

<sup>62</sup> Vgl. [Franz 1996], [Tamásy 1997] und [Groothuis 1999].

<sup>63</sup> Vgl. [Geiler 1998], [Faupel et al. 2001], [Müggenborg 2003a] und [Müggenborg 2003b].

<sup>64</sup> Eine umfassende Beschreibung des Konzeptes Zulieferparks aus dynamischer Sicht findet sich bei [Gareis 2002], wobei darin der Terminus Industriepark verwendet wird.

Darüber hinaus lassen sich folgende Ziele herausstellen, die mit der Errichtung von Zulieferparks verfolgt werden<sup>65</sup>: Reduzierung der Logistik- und Transportkosten, Erhöhung der Prozesssicherheit, Verringerung der Sicherheitsbestände, Vereinfachung der Kommunikation, Erlangung einer hohen Versorgungssicherheit, gemeinsame Nutzung von Ressourcen, staatliche Förderung von Wirtschaftsstandorten, Verkürzung von Lieferzeiten und Verringerung des internen Werkverkehrs durch den Einsatz automatischer Fördersysteme.

Ein wichtiges Kriterium zur Typologisierung von Zulieferparks und eine Voraussetzung zur Zielerreichung stellt der Standort in unmittelbarer Nähe des Werksgeländes des Automobilherstellers dar (vgl. [Klug 2000, S. 34] und [Pfohl et al. 2000a, S. 52 ff.]). Das Nutzungskonzept sieht vor, dass Sachleistungen erbringende Zulieferunternehmen des Automobilherstellers im Sinne einer Rückwärtsintegration im Zulieferpark angesiedelt werden, wobei die Dauer des Mietvertrags im Allgemeinen an die Dauer des Liefervertrags gekoppelt ist (vgl. [Rentz et al. 2003b, S. 81]). Die benötigte Infrastruktur wird im Vorfeld der Errichtung des Zulieferparks anhand von Prognosen des Materialbedarfs des Automobilherstellers geplant (vgl. [Kersten et al. 2001]). Hierbei lässt sich der Trend zur Errichtung einer multifunktionalen Halle im Gegensatz zu mehreren Gebäudekomplexen erkennen (vgl. [Rinza 1999, S. 34]).

In der Praxis sind im Wesentlichen drei Arten von Zulieferparks anzutreffen. Zum einen solche Parks, in denen der Einbau der Zulieferteile durch das Zulieferunternehmen übernommen wird, wobei dieses auf dem Werksgelände des Abnehmers angesiedelt ist. Eine solche Organisation wird als fraktale bzw. materialisierte Fabrik bezeichnet. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass das Zulieferunternehmen zwar auf dem Werksgelände des Abnehmers angesiedelt ist, der Hersteller jedoch die angelieferten Teile einbaut. Diese Variante wird als angeflanschte Fabrik bzw. In-plant bezeichnet. Im Rahmen eines Zulieferparks der dritten Variante, sind die Zulieferunternehmen unmittelbar in der Nähe des Abnehmers angesiedelt, und die angelieferten Teile werden durch den Hersteller selbst eingebaut (vgl. [Pfohl et al. 2000b, S. 53]).

Tabelle 11 enthält eine Auflistung der mit der Implementierung eines Zulieferparks verbundenen Vor- und Nachteile. Vorteile resultieren in erster Linie aus der Bündelung von Materialströmen, während ein wesentlicher Nachteil in den zusätzlichen Investitionen zur Errichtung eines neuen Standorts besteht. Die Ausprägung der einzelnen Vor- und Nachteile ist u.a. von den jeweiligen Lieferanten abhängig, die in den Zulieferpark integriert werden sollen.<sup>66</sup> Darüber hinaus werden

---

<sup>65</sup> Vgl. [Kiefer et al. 1999, S. 56], [Rinza 1999, S. 34], [Klug 2000, S. 34], [Pfohl et al. 2000a, S. 52 ff.] und [Barth 2002, S. 52].

<sup>66</sup> Zur Ansiedlung der Produktion von Teilegruppen direkt am Standort des Abnehmers bieten sich solche Teile an, die eine hohe Varianz und Komplexität besitzen, da diese Teile höchste Anforderungen an die Steuerungssysteme stellen. Beispielsweise kann ein Innenraumleitungssatz bei Audi in ca. 1,2 Millionen verschiedenen Varianten angefordert werden. Nur durch möglichst späte Variantenbildung unmittelbar vor dem Einbau und durch eine sequenzgenaue Anlieferung solcher Teile können derart komplexe Prozesse handhabbar gemacht werden. Des Weiteren sind großvolumige und transportintensive Teile für die Produktion vor den Werkstoren des Abnehmers geeignet. Durch den Zusammenbau großvolumiger Teile vor Ort lässt sich das Transportvolumen

die Vor- und Nachteile aus Sicht der einzelnen Akteure durch den Betreiber des Zulieferparks beeinflusst. Mögliche Akteure beim Betrieb eines Zulieferparks sind eine Betreibergesellschaft, die angesiedelten Lieferanten, der Abnehmer, ein Logistikdienstleister, der Gebäudeeigentümer oder der Grundstückseigentümer (vgl. [Kersten et al. 2001]). In Tabelle 12 sind vier Betreibermodelle von Zulieferparks und die mit ihnen verbundenen Merkmale nach [Rinza 1999, S. 36] aufgeführt, wobei nicht zwischen einem Zulieferpark auf und einem Zulieferpark in der Nähe des Werksgeländes unterschieden wird.

Wird der Zulieferpark durch den Automobilhersteller betrieben, bleiben die Anlagenwerte im Eigenbesitz des Unternehmens, wodurch sich eine eingeschränkte Flexibilität ergibt. Nutzungsänderungen der Installationen sind zwar möglich, doch müssen hierzu Entscheidungen über die Verwendung der im Zulieferpark errichteten Anlagen getroffen werden. Demgegenüber erreicht der Automobilhersteller hierdurch eine hohe Transparenz von Daten und Prozessen, was eine Einflussnahme auf die Zulieferunternehmen hinsichtlich Prozessoptimierungen ermöglicht. Die Nachteile dieses Konzeptes bestehen zum einen in einem hohen Aufwand für den Automobilhersteller, da sich ein erheblicher Steuerungs- und Verwaltungsaufwand aus den Operations- und Managementaufgaben ergibt. Zum anderen resultiert aus diesem Betreibermodell ein hohes Konfliktpotenzial aufgrund der Einflussnahme des Automobilherstellers gegenüber den Zulieferunternehmen.

**Tabelle 11:** Vor- und Nachteile von Zulieferparks in der Automobilindustrie (vgl. [Klug 2000, S. 34])

Vorteile	Nachteile
Reduzierung der Lieferverkehre	Neuinvestitionen für den Aufbau eines neuen Standortes
Entfall von Handlingstufen	Verlust der Nähe zum Stammwerk
wirtschaftliche Bereitstellung geforderter Ausstattungsvarianten	Kapazitätsauslastung an anderen Standorten
Reduzierung Behälterkosten	räumliche Nähe, d.h. die Zulieferfirmen werden transparent und kontrollierbar
Erleichterung Kommunikation	Zulieferfirmen müssen bereit sein umzusiedeln
Förderung des Wirtschaftsstandortes	hohe Investitionen für Infrastruktur
<b>=&gt; Bündelung von Materialströmen</b>	<b>=&gt; Investitionen in neue Standorte</b>

Der Besitz und Betrieb des Zulieferparks durch mehrere Zulieferunternehmen führt zu einer niedrigen Flexibilität aus Sicht der Automobilhersteller, da er nur einen geringen Einfluss auf die Nutzung der Installation besitzt und sich in eine

---

verringern. Außerdem verringern sich dadurch die Behälterumlaufzeiten. Bei Audi in Ingolstadt beträgt die Umlaufzeit für Spezialbehälter infolgedessen ca. einen halben Tag, wohingegen die durchschnittliche Umlaufzeit sich für solche Behälter in Deutschland auf ca. acht Tage beläuft (vgl. [Gebhardt 1998, S. 17 f.]).

Abhängigkeit von den Zulieferunternehmen begibt. Darüber hinaus besteht lediglich eine geringe Transparenz für den Automobilhersteller, und er verfügt in der Regel über wenige Steuerungsparameter, sodass seine Einflussnahme als gering einzuschätzen ist. Der Vorteil dieses Betreibermodells besteht für den Automobilhersteller in einem geringen Aufwand, da die operativen Tätigkeiten an die Zulieferunternehmen delegiert werden können. Die Aufgaben des Automobilherstellers bestehen primär aus Verhandlungs- und Managementaufgaben. Der Betrieb des Zulieferparks durch Zulieferunternehmen beinhaltet aufgrund der Abhängigkeit des Automobilherstellers von den Zulieferunternehmen ebenfalls ein hohes Konfliktpotenzial.

**Tabelle 12:** Betreibermodelle von Zulieferparks (aus Sicht der Automobilhersteller) (vgl. [Rinza 1999, S. 36])

Betreibermodell	„Automobilhersteller“	„Lieferanten“	„Dienstleister“	„Betreiber-gesellschaft“
<b>Eigentum</b>	100% Besitz und Betrieb des Zulieferparks durch Automobilhersteller	100% Besitz und Betrieb des Zulieferparks durch mehrere Lieferanten	100% Besitz und Betrieb des Zulieferparks durch Logistikdienstleister	verteilter Besitz zwischen Kapitalgebern
<b>Flexibilität</b>	mäßig	niedrig	hoch	mäßig
<b>Transparenz</b>	hoch	gering	mäßig bis hoch	mäßig
<b>Aufwand Automobilhersteller</b>	hoch	gering	mäßig	mäßig
<b>Konfliktpotenzial</b>	hoch	hoch	gering	mäßig

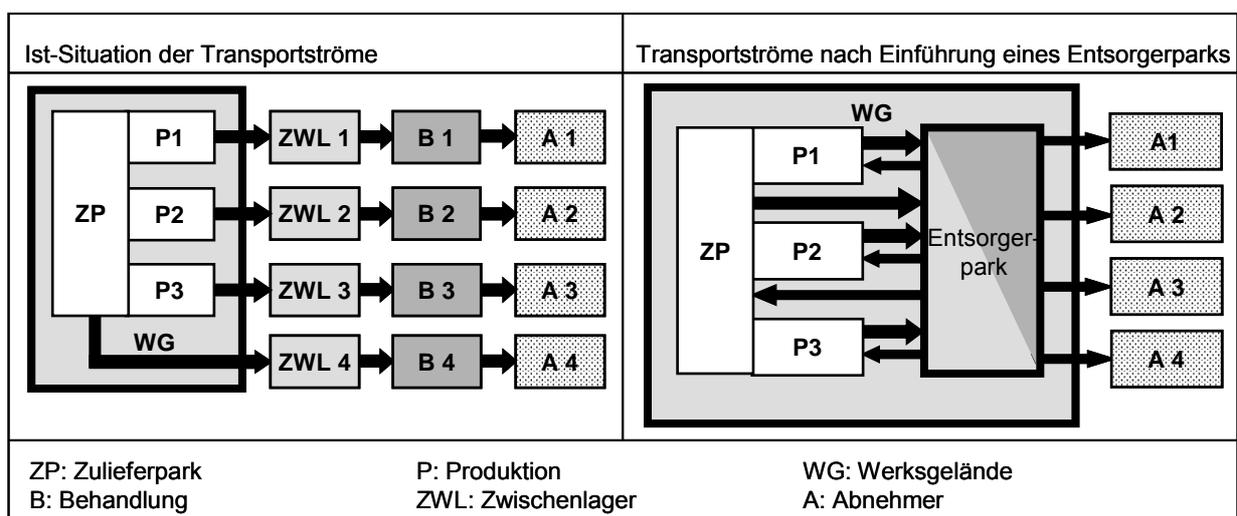
Ein weiteres Betreibermodell sieht den Besitz und Betrieb eines Zulieferparks durch einen Dienstleister vor, was dem aus dem Bereich der Energieversorgung stammenden Contracting<sup>67</sup> entspricht. Hierdurch ergibt sich eine hohe Flexibilität für den Automobilhersteller, da kein Eigenkapital seinerseits in der Installation gebunden ist. Die Transparenz für den Automobilhersteller muss vertraglich geregelt werden, kann aber im Allgemeinen als mäßig bis hoch angesehen werden. Durch die Zwischenschaltung des Dienstleisters werden Prozessoptimierungen in der Regel mit einer zeitlichen Verzögerung weitergegeben. Der Steuer- und Verwaltungsaufwand liegt durch Delegation der operativen Tätigkeit an den Dienstleister in einem mäßigen Bereich. Vom Automobilhersteller werden Managementpflichten (Controlling) durchgeführt. Das Konfliktpotenzial dieses Betreibermodells ist gering, da der Dienstleister als unabhängiger Dritter Mittlerfunktionen erfüllen kann.

<sup>67</sup> [Bemmann et al. 2003, S. 4] definieren Contracting als eine vertraglich fixierte Übertragung von Aufgaben der Energiebereitstellung und/oder der Bewirtschaftung auf ein externes Unternehmen. Der Grundgedanke des Contracting ist dabei die Vorfinanzierung von fixen Kosten der Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung durch den Contractinggeber und die Rückerstattung dieser sowie der anfallenden variablen Kosten der Energiebereitstellung und -lieferung durch den Contractingnehmer über die Energierechnung (vgl. [Jeschke 1998]). Zu den Möglichkeiten von Contracting als Instrument zur umweltorientierten Unternehmensführung im liberalisierten Energiemarkt siehe [Rentz et al. 1998a].

Durch die Gründung einer Betreibergesellschaft werden die Investitionen zwischen den Kapitalgebern aufgeteilt, und ein Zulieferpark kann dann beispielsweise von einem Dienstleister betrieben werden. Hierdurch ergibt sich eine mäßige Flexibilität, da Nutzungsänderungen nur mit Einschränkungen möglich sind. Die Transparenz verschlechtert sich einerseits durch die erhöhte Anzahl der Partner, andererseits kann sie durch Daten-Sharing erhöht werden. Dieses Modell ergibt einen mäßigen Aufwand für den Automobilhersteller, da er primär Management- und Repräsentationsaufgaben wahrzunehmen hat. Das Konfliktpotenzial dieses Betreibermodells ist abhängig von der Beteiligung und der Einflussnahme durch den Automobilhersteller, da die beteiligten Parteien unterschiedliche Interessen besitzen (vgl. [Rinza 1999, S. 36]).

### 3.2.2 Entsorgerparks

Die Grundidee eines Entsorgerparks liegt in der Übertragung des Konzeptes der unmittelbaren Nähe auf die Entsorgungsbranche, indem Entsorgungsdienstleistungen auf dem Werksgelände durchgeführt werden. Abbildung 1 zeigt das Werksgelände eines Produktionsunternehmens mit drei Produktionshallen und einem auf dem Werksgelände angesiedelten Zulieferpark. Im Rahmen derzeitiger Entsorgungskonzepte werden die Abfälle nach der Entstehung zu einem Zwischenlager außerhalb des Werksgeländes transportiert und umgeschlagen. Ausgehend von diesem Zwischenlager werden die Abfälle zu geeigneten Verwertungs- bzw. Beseitigungsanlagen transportiert. Im Anschluss an die Abfallbehandlung gelangen die Abfälle zum Endabnehmer (wobei es sich sowohl um eine Deponie oder Müllverbrennungsanlage handeln kann als auch um eine Firma, welche die Abfälle wieder einsetzt).



**Abbildung 1:** Transportströme im Rahmen der industriellen Abfallentsorgung vor und nach der Einführung eines Entsorgerparks

Mittels der Implementierung eines Entsorgerparks (s. Abbildung 1, rechtes Bild) kann die Entsorgung aus ökologischer und ökonomischer Sicht effizienter gestaltet werden, indem die angefallenen Abfälle innerhalb des Werksgeländes von der

Anfallstelle zum Entsorgerpark transportiert werden, wo sie durch geeignete Verfahren aufbereitet werden. Im Idealfall können Wertstoffe dadurch direkt in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden, wodurch sich die Abfallmenge verringert, die außerhalb des Werksgeländes behandelt wird. Dementsprechend bietet ein Entsorgerpark zwei Ansätze, Transportkilometer und somit auch Transportkosten im Entsorgungsbereich zu reduzieren:

- geringe Distanzen innerhalb des Werksgeländes sowie
- Verringerung der Transporte außerhalb des Werksgeländes durch Veränderung der Abfallströme.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird folgendes unter dem Begriff „Entsorgerpark-Konzept“ verstanden: Die strategische Ausrichtung der industriellen Entsorgung auf die Errichtung dezentraler Entsorgungsanlagen und die Durchführung von Entsorgungsdienstleistungen auf oder in unmittelbarer Nähe des Werksgeländes von Produktionsunternehmen unter der Zielsetzung, die mit der Entsorgung verbundenen Ausgaben und Transporte zu senken.

### **3.2.3 Typologisierung von Kooperationen zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks**

Der Großteil der bisher in der Literatur betrachteten Unternehmensnetzwerke ist dadurch gekennzeichnet, dass verschiedene Unternehmen der Produktionswirtschaft miteinander kooperieren. Im Rahmen eines Entsorgerparks werden dagegen Möglichkeiten einer Kooperation zwischen Unternehmen der Produktions- und der Entsorgungswirtschaft untersucht. Der Unterschied zwischen diesen beiden Arten von Unternehmen liegt in erster Linie im Betriebszweck. Bei Entsorgungsunternehmen liegt der Betriebszweck darin begründet, Abfälle zu verwerten oder beseitigen und nicht neue Güter/Produkte zu erstellen. Außerdem erzielen die Entsorgungsunternehmen ihren Betriebsgewinn im Wesentlichen aus der Abnahme von Abfällen und nicht aus dem Verkauf von Endprodukten. Ein Entsorgungsunternehmen ist also im Gegensatz zu Produktionsunternehmen input- und nicht outputorientiert (vgl. [Wietschel et al. 2000b, S. 41.]).

Nachstehend werden die allgemeinen Typologisierungskarakteristika von Kooperationen aufgegriffen und ihre Ausprägung im Rahmen einer Kooperation zwischen Produktions- und Entsorgungsunternehmen zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks dargestellt. Eine Übersicht wichtiger Charakteristika und ihrer Ausprägung im Rahmen einer solchen Kooperation findet sich in Tabelle 13.

Das Hauptmotiv sowohl der Produktionsunternehmen als auch der Entsorgungsunternehmen ist darin zu sehen, durch einen Entsorgerpark Synergieeffekte nutzen zu können und damit die Gesamtkosten zu reduzieren. Darüber hinaus werden die Entsorgungsunternehmen in ihrem Streben nach Wachstum unterstützt, da sie durch einen Entsorgerpark zusätzliche Dienstleistungen anbieten und so ihre Marktposition stärken können. Durch das Entsorgerpark-Konzept wird der Wettbewerb nicht beeinflusst, sodass eine neutrale Wettbewerbswirkung vorherrscht.

Hinsichtlich des Sachziels der Kooperation kann eine Zusammenarbeit zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks eindeutig den Entsorgungs- und

Recyclingkooperationen zugeordnet werden, da das Sachziel eine langfristig effiziente Entsorgung ist. Demnach stellen Dienstleistungen und nicht Waren oder Produkte das Bezugsobjekt der direkten Zusammenarbeit dar, wobei die Zusammenarbeit über einen Erfahrungsaustausch hinaus geht und bis zur Gründung eines Gemeinschaftsunternehmens reichen kann. Die wirtschaftliche Selbstständigkeit der Unternehmen bleibt hierbei in vollem Umfang bewahrt, was insbesondere für die Entsorgungsunternehmen von zentraler Bedeutung ist.

**Tabelle 13:** Übersicht wichtiger Charakteristika von Kooperationen zwischen Entsorgungs- und Produktionsunternehmen (Ausprägungen für einen Entsorgerpark grau hinterlegt)

Kriterium	Ausprägung der Kooperationen			
	Nutzung von Synergieeffekten		Streben nach Wachstum	
Gegenstand/Sachziel	F&E	...	Entsorgung	Produktion
Intensität	Erfahrungsaustausch	...	Gemeinschaftsunternehmen	
Bezugsobjekt	Produkte/Waren		Dienstleistungen	
Zusammenarbeit	direkt		indirekt	
Dauer	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	
Zielrichtung	operativ	taktisch	strategisch	
Stabilität	stabil		instabil (nur für 1 Projekt)	
Ressourceneinbringung	projektbezogen		unbefristet	
Richtung	horizontal	vertikal	diagonal/lateral	
Anzahl der Partner	bilateral		multilateral	
Aufbau	polyzentrische Struktur		fokales Unternehmen	
Dominanz	initiator dominante Kooperation	ausgewogene Kooperation	partner dominante Kooperation	
Vertragsbasis	vertragsfrei	kurzfristiger Vertrag	langfristiger Vertrag	Gemeinschaftsunternehmen
Funktionsverknüpfung	Funktionszusammenlegung		Funktionsabstimmung	
Erhalt der wirtschaftlichen Selbstständigkeit	gering		stark	
Bindungsintensität	formlos	kapitalmäßig	vertraglich	
Terminiertheit	befristet		unbefristet	
Geografische Ausdehnung	lokal	regional	national	international
Koordination	Preismechanismen		Hierarchie	
Koordinationsmechanismen	gegenseitige Anpassung	Standardisierung	gemeinsame Variable	
Kommunikation	gelegentlich		laufend	
Aktivität der Beteiligten	pro-aktiv		reaktiv	
Wettbewerbswirkung	fördernd	neutral	beschränkend	

Grundsätzlich kann eine Zusammenarbeit zwischen Entsorgungsunternehmen und Produktionsunternehmen sowohl in Form einer hierarchisch-pyramidalen als auch einer polyzentrischen Kooperation existieren. Allerdings ist die Beziehung zwischen Entsorgungsunternehmen und Produzenten von einer wirtschaftlichen Abhängigkeit des Entsorgungsunternehmens gekennzeichnet, da der Verlust des Entsorgungsauftrags für dieses zu wirtschaftlichen Verlusten führt, während für die Produktionsunternehmen durch die Beauftragung eines anderen Entsorgungsunternehmens in der Regel keine finanziellen Nachteile entstehen. Aufgrund der beschriebenen Abhängigkeit des Entsorgungsunternehmens von den Produktionsunternehmen ist demnach mit einer hierarchisch-pyramidalen Kooperation zu rechnen, in der das bedeutendste Produktionsunternehmen als fokales Unternehmen fungiert und die Kooperation dominiert.

Eine Zusammenarbeit zwischen Entsorgungs- und Produktionsunternehmen zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks stellt in erster Linie eine laterale Kooperation dar, da neben Unternehmen einer Wertschöpfungskette oder Branche durch das Entsorgungsunternehmen ein Partner beteiligt ist, der weder der betrachteten Wertschöpfungskette noch derselben Branche entstammt. Daneben bestehen auch horizontale oder vertikale Beziehungen zwischen den Produktionsunternehmen, weshalb ein Entsorgerpark eine Mischform der Zusammenarbeit mit einem Schwerpunkt auf der lateralen Kooperation darstellt.

Aufgrund der notwendigen Voruntersuchungen zur Ausgestaltung eines Entsorgerparks und zur Minimierung der Risiken kann von einer pro-aktiven Aktivität der Beteiligten ausgegangen werden. Je nach Ausgestaltung der Kooperation sind mit der Implementierung Investitionen verbunden, sodass zumindest einer der Partner kapitalmäßig an die Kooperation gebunden ist. Um das Risiko für die kapitalmäßig gebundenen Unternehmen zu senken, werden diese die vertragliche Bindung der weiteren Partner an den Entsorgerpark fordern. Da die Kooperationsdauer mindestens die Amortisationszeit überdauern sollte, ist sie dementsprechend im langfristigen Bereich anzusiedeln. Demnach handelt es sich um die strategische Ausrichtung der industriellen Entsorgung. Ebenso kann aufgrund der notwendigen Investitionen davon ausgegangen werden, dass die Unternehmen nicht nur zur Erfüllung einer Aufgabe kooperieren, sondern viele Aufgaben des gleichen Typs durchgeführt werden sollen und somit eine stabile Kooperation gebildet wird.

Bei einer Kooperation zwischen Abfallerzeugern und Entsorgungsunternehmen mit gemeinschaftlichen Investitionen sind langfristige Verträge zwingend notwendig, da aus abfallrechtlicher Sicht der Besitzer der Abfälle eindeutig zu identifizieren sein muss. Zudem bietet eine langfristige vertragliche Regelung eine Absicherung für den Investitionsgeber.

Da ein Entsorgerpark zu gemeinsamen Kosten und Erlösen führt, handelt es sich um eine Funktionszusammenlegung der Partner. Ob die errichteten Entsorgungseinrichtungen von einem Gemeinschaftsunternehmen, einem der Kooperationspartner oder einem Contractor betrieben wird, ist jedoch von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängig.

Wie bei Verwertungsnetzwerken ist eine Ansiedelung der Partner in einem Wirtschaftsraum vorteilhaft, da bei dem geringen bis negativem Wert der Abfälle ein Transport über große Entfernungen unwirtschaftlich wäre. Demnach ist für eine Kooperation zwischen Entsorgungs- und Produktionsunternehmen eine lokale Ausdehnung charakteristisch.

Ein Entsorgerpark kann sowohl im Rahmen einer bilateralen als auch einer multilateralen Kooperation betrieben werden. Der Nachteil der multilateralen Kooperation liegt in einem höheren Steuerungsaufwand aufgrund der erhöhten Anzahl der Partner. Um eine effiziente Entsorgung langfristig gewährleisten zu können, ist insbesondere bei multilateralen Kooperationen eine kontinuierliche Kommunikation zwischen den Partnern erforderlich. Dies dient einerseits dem Aufbau von Vertrauen zwischen den beteiligten Partnern und sichert andererseits eine genaue Kenntnis der Entsorgungsvorgänge bei allen Beteiligten.

Auch diese Kooperation stellt einen Hybrid zwischen Markt und Hierarchie dar, da die Koordination einerseits auf Preismechanismen als auch auf hierarchischen Strukturen beruht. Darüber hinaus wird die Zusammenarbeit durch die Definition einer gemeinsamen Variablen koordiniert (z.B. dem Lagerbestand auf dem Werksgelände des fokalen Unternehmens).

## **4 Techno-ökonomische Analyse eines unternehmensübergreifenden Systems aus dem Bereich der Energiewirtschaft**

Im Rahmen dieses Kapitels wird anhand einer Fallstudie eine betriebliche Systemgrenzenerweiterung im Bereich der Energiewirtschaft analysiert. Wie bereits im vorigen Kapitel dieser Arbeit dargelegt, liegt hierbei der Fokus auf einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerkes, da eine solche Kooperation unter den gegebenen Rahmenbedingungen eine viel versprechende Möglichkeit zur Erzielung von Kosteneinsparpotenzialen darstellt.

Zu Beginn dieses Kapitels werden kurz grundlegende Aspekte der Energieversorgung aufgezeigt, wobei der Schwerpunkt auf den sich ändernden Rahmenbedingungen und der sich daraus ergebenden Implikationen für Energieversorgungsunternehmen liegt. Auf dieser Basis werden die Anforderungen an ein Modell zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerkes abgeleitet und existierende methodische Ansätze präsentiert sowie deren Eignung für die konkrete Fragestellung diskutiert. Anschließend wird das entwickelte Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP beschrieben, und die verwendete Datenbasis und der Modellaufbau werden dargestellt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Modellanwendung für unterschiedliche Rahmenbedingungen präsentiert.

### **4.1 Grundlegende Aspekte der Energieversorgung**

Gegenwärtig sind der europäische und damit auch der deutsche Energiesektor besonderen strukturellen Umgestaltungen und politischen Steuerungsmaßnahmen ausgesetzt, wodurch sich das Wettbewerbsumfeld der Energieversorgungsunternehmen grundlegend ändert. Aus der zentralen Bedeutung einer gesicherten und ökonomisch effizienten Energieversorgung für die Entwicklung einer industriellen Gesellschaft resultieren eine im Vergleich zu anderen Industriesektoren starke politische Einflussnahme und staatliche Kontrollbestrebungen. Diese wurden früher primär national bestimmt, während in den letzten Jahren die maßgeblichen Initiativen für Veränderungen von der Europäischen Union ausgingen.

Im Folgenden werden die bedeutendsten energie- und klimaschutzpolitischen Strukturveränderungen aufgezeigt. Anschließend werden die zentralen Planungsaufgaben der Energieversorgungsunternehmen dargestellt, die sich u.a. aus den skizzierten Strukturveränderungen ergeben.

#### **4.1.1 Rechtlich-politische Rahmenbedingungen**

Maßgebliche Veränderungen der rechtlich-politischen Rahmenbedingungen ergeben sich durch die Liberalisierung der Strommärkte, da durch diese das Wettbewerbsumfeld von Energieversorgungsunternehmen gewandelt wird (vgl. Kapitel 4.1.1.1). Deutsche Energieversorgungsunternehmen sind darüber hinaus mit Planungsunsicherheiten aufgrund des politisch angestrebten Ausstiegs aus der Kernenergienutzung (vgl. Kapitel 4.1.1.2) konfrontiert. Zusätzliche Unsicherheiten ergeben sich für alle europäischen Energieversorgungsunternehmen durch die sich

ändernden Klimaschutzpolitischen Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 4.1.1.3) wie der Einführung eines europäischen Emissionsrechtehandels.

#### **4.1.1.1 Liberalisierung der europäischen Strommärkte**

Die Liberalisierung der Strommärkte wurde 1996 mit der Binnenmarktrichtlinie „Elektrizität“ [EC 1996a] eingeleitet. Ziel dieser Richtlinie ist die Schaffung eines europäischen Binnenmarktes<sup>68</sup> für Elektrizität durch die Neustrukturierung der monopolistischen Energiemärkte mit abgegrenzten Versorgungsgebieten zu einem freien Wettbewerbsmarkt. Darüber hinaus werden eine Steigerung des Wettbewerbs und damit auch eine Steigerung der Effizienz der Energieversorgung in Europa angestrebt. Zentrale Elemente der Reform des Stromversorgungssektors sind die Gewährleistung eines ungehinderten Netzzugangs u.a. für neue Stromerzeuger<sup>69</sup>, die organisatorisch-rechtliche Trennung des Netzbetriebs von der Stromerzeugung sowie die Gewährleistung der freien Lieferantenwahl durch den Endkunden. Die zeitliche Entwicklung der Marktöffnung wurde von der Europäischen Kommission folgendermaßen vorgesehen: Zuerst wurde die freie Lieferantenwahl für alle Verbraucher mit einem Jahresverbrauch von über 40 Gigawattstunden (GWh) eingeführt. Ab drei Jahren nach Inkrafttreten der Richtlinie (19.02.1997) galt dies auch für Verbraucher über 20 GWh/a, ab sechs Jahren für eine Verbrauchsgrenze ab 9 GWh/a (vgl. [EC 1996a, Artikel 19]).

Im Rahmen des „Zweiten Benchmarkingberichts über die Vollendung des Elektrizitäts- und Erdgasbinnenmarkts“ [EC 2002b] zeigt sich die europäische Kommission weitgehend zufrieden mit der Umsetzung der Richtlinie in den Mitgliedsstaaten. Handlungsbedarf besteht jedoch weiterhin hinsichtlich nachstehender Aspekte:

- Unterschiedliche Marktöffnungsgrade und unterschiedliche Berechnung der Netznutzungstarife erschweren den grenzüberschreitenden Stromhandel.
- Die Entflechtung der Verteilungsnetze von der Erzeugung wurde bisher nur bedingt realisiert.
- Die Entwicklung eines funktionierenden Wettbewerbsmarkts und der Markteintritt neuer Akteure werden durch die teilweise dominierende Marktmacht einzelner Unternehmen behindert.
- Der netzübergreifende Stromaustausch wird durch bestehende Engpässe in der Netzinfrastruktur erschwert.

---

<sup>68</sup> „Der Binnenmarkt umfasst einen Raum ohne Binnengrenzen, in dem der freie Verkehr von Waren, Personen, Dienstleistungen und Kapital gewährleistet ist“ (vgl. [EC 1996a (deutsche Fassung), S. 1]).

<sup>69</sup> Hinsichtlich des diskriminierungsfreien Netzzugangs für alle Marktteilnehmer sind zwei Modelle vorgesehen (vgl. [EC 1996a, Artikel 16-18]): den verhandelten Netzzugang und den regulierten Netzzugang eines Alleinabnehmermodells (zur Darstellung unterschiedlicher Netzzugangsregime bzw. Marktorganisationsformen vgl. [Klopfer et al. 1993]). Deutschland hat sich als einziger Mitgliedsstaat für den verhandelten Netzzugang entschieden, während alle anderen Mitgliedsstaaten das Modell des regulierten Netzzugangs anwenden (vgl. [EC 2002b, S. 3]). Die Probleme, die aus den unterschiedlichen Netzzugangsmodellen resultieren, sollen durch die Einrichtung nationaler Regulierungsbehörden überwunden werden (vgl. [EC 2003c, S. 2]).

Die hier angeführten Probleme – abgesehen von der Netzinfrastrukturentwicklung – sind jedoch für langfristige Betrachtungen weniger bedeutend. Hinsichtlich aller Bereiche können Ansätze der nationalen und europäischen Politik identifiziert werden, die kurz- bis mittelfristig zur Überwindung der noch existierenden Probleme des Strombinnenmarktes dienen. Hinsichtlich langfristiger Fragestellungen von Energieversorgungsunternehmen kann deshalb von einem funktionierenden Strombinnenmarkt ausgegangen werden.

#### **4.1.1.2 Politische Diskussion zum Kernenergieausstieg**

Die Kernenergie stellt derzeit eine der wichtigsten Säulen der europäischen Stromversorgung dar, wobei ihre zukünftige Nutzung Gegenstand kontroverser Diskussionen ist: Die Argumente der Befürworter sind die ökonomische Attraktivität der Kernenergie und die CO<sub>2</sub>-neutrale Möglichkeit der Energieumwandlung. Die Gegner der Kernenergienutzung führen Sicherheitsrisiken als Begründung für ihre strikte Ablehnung an.

Im Jahr 2001 wurden ca. 34 % der Nettostromerzeugung in den 15 EU-Mitgliedsstaaten aus Kernenergie bereitgestellt (vgl. [Enzensberger 2003, S. 12]). Mit einer Jahresproduktion von 401,3 Terrawattstunden (TWh) entsprechend 75,6 % der französischen Nettostromerzeugung ist Frankreich die Nation mit der höchsten Kernenergienutzung in Europa (in Deutschland wurde 2001 ca. ein Drittel der Stromerzeugung aus Kernenergie abgedeckt). Neben Frankreich und Deutschland werden in Großbritannien, Schweden und Spanien signifikante Strommengen aus Kernenergie erzeugt, während die kumulierte Erzeugungskapazität der Kernkraftwerksparks in Belgien, den Niederlanden und Finnland deutlich geringer ist. Die Kernkraftwerke werden in sämtlichen Staaten nahezu ausschließlich in der Grundlast<sup>70</sup> eingesetzt. Der Anteil an der europäischen Gesamtstromerzeugung im Grundlastbereich beträgt ca. 70 %, weshalb der Kernenergie eine zentrale Bedeutung bei der europäischen Stromversorgung zukommt.

Gegenwärtig vertreten die Regierungen der verschiedenen EU-Mitgliedsstaaten konträre Positionen hinsichtlich der zukünftigen Kernenergienutzung. Während u.a. Frankreich weiterhin die Kernenergie als wichtigen Bestandteil ihres Energieträgermixes ansieht, betreiben andere Staaten wie Deutschland einen gezielten Ausstieg aus der Kernenergienutzung<sup>71</sup>. In Deutschland wurde dieser Ausstieg mit der Unterzeichnung der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000“ offiziell beschlossen [BMU 2000b]. Durch diese Vereinbarung wird die ab 01.01.2000 in deutschen Kernkraftwerken zu erzeugende Reststrommenge auf 2623,3 TWh beschränkt und der Neubau zusätzlicher Kernkraftwerke ausgeschlossen. Insgesamt fünf (Deutschland, Schweden, Spanien, die Niederlande und Belgien) der acht Kernenergie nutzenden EU-Mitgliedsstaaten

---

<sup>70</sup> Lediglich in Frankreich kann ein zum Teil etwas stärker zwischen Grund- und Mittellast variierender Betrieb der Kernkraftwerke beobachtet werden, was auf die bestehenden Kernkraftwerksüberkapazitäten zurückgeführt werden kann (vgl. [IEA 2001, S. 105 f.]).

<sup>71</sup> Einen Überblick über Kernkraftwerke in OECD Ländern, die aufgrund politischer Vorgaben bzw. Sicherheitsbedenken stillgelegt wurden, gibt [IEA 2001, S. 226].

haben ein Kernenergiemoratorium beschlossen oder zumindest angekündigt (vgl. [Taylor 2002, S. 2]). Demgegenüber halten sich Frankreich, Finnland<sup>72</sup> und Großbritannien die Kernenergie als Zukunftsoption weiter offen.

Die Kernenergienutzung wird auch im Grünbuch zur Energieversorgungssicherheit ([EC 2000b] und [EC 2002a]) der europäischen Kommission thematisiert. Um eine weiter zunehmende Importabhängigkeit bei Brennstoffen zu vermeiden, wird im Grünbuch die Bedeutung einheimischer Energiequellen hervorgehoben<sup>73</sup>. Des Weiteren wird auch die aus Klimaschutzaspekten gegebene Notwendigkeit einer CO<sub>2</sub>-freien bzw. -armen Stromerzeugung betont. Die Kernenergie stellt bezüglich beider Bereiche eine interessante Option dar. Allerdings kommt das Grünbuch hinsichtlich der zukünftigen Nutzung der Kernenergie zu dem Schluss, dass diese erst nach der Lösung des gegenwärtig noch offenen Entsorgungsproblems eine langfristige Lösung für die europäische Energieversorgung darstellen kann. Darüber hinaus wird im Grünbuch gefordert, dass Europa zur Sicherung des bestehenden technischen Wissens seine bislang führende Rolle in der zivilen Kernenergienutzung beibehalten solle.

#### **4.1.1.3 Entwicklung der klimaschutzpolitischen Rahmenbedingungen**

Aufgrund der Sorge um ökologische und ökonomische Konsequenzen durch anthropogen verursachte Klimaveränderungen wird dem Klimaschutz eine zentrale Bedeutung in der aktuellen Umweltpolitik zugemessen. Zentrales Anliegen der Klimaschutzpolitik ist eine Reduzierung der Gesamtemissionen der sechs Treibhausgase (THG) Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC, insbesondere CF<sub>4</sub> und C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Die Schadenswirkung („Global Warming Potential“) der fünf Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen lässt sich in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ausdrücken (vgl. hierzu auch [Ardone 1999]), wobei in der europäischen Union ca. 82 % der so gewichteten Treibhausgasemissionen auf CO<sub>2</sub> entfallen (vgl. [EEA 2002, S. 18]). Dieser hohe Anteil führt dazu, dass CO<sub>2</sub> häufig in den Mittelpunkt der Klimaschutzpolitikgestaltung gestellt wird.

Das Ziel, die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre zu stabilisieren, wurde 1992 durch die globale Klimarahmenkonvention verankert, die im Rahmen des so genannten Erdgipfels von Rio de Janeiro verabschiedet wurde. 1997 wurde dann in Kyoto auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz das Klima-Protokoll (Kyoto-Protokoll) verabschiedet, in dem sich die Industrieländer erstmals rechtskräftig zu einer Begrenzung ihrer Treibhausgasemissionen verpflichteten: Bis zur ersten Verpflichtungsperiode 2008 bis 2012 ist – bezogen auf das Basisjahr 1990 – eine durchschnittliche Reduktion von 5 % vorgesehen. Die EU geht hierbei eine Minderungsverpflichtung von 8 % ein, wobei sich dieses Ziel lediglich auf die EU-15-

---

<sup>72</sup> Finnland bereitet derzeit den Bau eines fünften Reaktors vor. Der nach dem finnischen Atomgesetz erforderliche Grundsatzantrag zur Errichtung eines neuen Kernkraftwerks wurde im November 2000 von einem finnischen EVU (TVO) bei der Regierung eingereicht. „Im Januar 2002 stimmte das finnische Kabinett mit 10:6 Stimmen für das Projekt. Am 24. Mai 2002 folgte der finnische Reichstag mit 107:92 Stimmen“ (vgl. [ATW 2002, S. 637]).

<sup>73</sup> Zur Abhängigkeit der EU von Brennstoffimporten vgl. [Taylor 2002, S. 2].

Staaten bezieht. Dies bedeutet, dass auch nach der EU-Osterweiterung die Minderungsziele für diese Staatengruppe unverändert bestehen.

Um diese Minderungsverpflichtungen zu flexibilisieren, formuliert das Kyoto-Protokoll drei Mechanismen für internationale Kooperationen im Klimaschutz. Im Bereich der projektbezogenen Mechanismen können durch Joint Implementation (JI) und Clean Development Mechanisms (CDM) die Emissionsminderungen, die in Gastländern realisiert wurden, dem investierenden Annex-I-Land zugeschrieben werden. Das dritte Instrument Emission Trading (ET) sieht einen internationalen Handel mit Emissionsrechten vor.

Das Konzept des Emission Trading hat die Europäische Kommission mit ihrem „Grünbuch zum Handel mit Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union“ [EC 2000c] aufgegriffen und es wurde mit Inkrafttreten der Richtlinie über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten [EC 2003a] am 25.10.2003 für alle Mitgliedsstaaten rechtlich verbindlich. Zur Erreichung des EU-Minderungsziels strebt die Kommission die Einrichtung eines auf die EU begrenzten Emissionsrechtehandelssystems an<sup>74</sup>. Ein zentraler Unterschied des europäischen Politikansatzes im Vergleich zum Kyoto-Protokoll ist, dass der europäische Emissionshandel nicht auf Länder- sondern auf Unternehmensebene stattfinden soll. Hierzu wurden alle Mitgliedsstaaten verpflichtet, bis zum 31.3.2004 nationale Zuteilungspläne (Allokationspläne) zu veröffentlichen, aus denen hervorgeht, wie viele Emissionszertifikate die jeweiligen Mitgliedsstaaten in der ersten Handelsperiode 2005 – 2007 zuzuteilen beabsichtigen und wie diese Zertifikate auf die Anlagen verteilt werden sollen<sup>75</sup>. Die mit dieser Begrenzung einhergehende Bewirtschaftung des bisher freien Produktionsfaktors Emissionsrecht (vgl. hierzu auch [Fichtner 2004]) wird für alle emissions- und energieintensiven Unternehmen dabei eine einschneidende Veränderung ihrer Geschäftsgrundlage mit sich bringen.

Ca. 27 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der EU werden derzeit vom europäischen Energieversorgungssektor verursacht, der damit die größte Emittentengruppe darstellt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Bereich stammen hauptsächlich aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in Heizwerken und (Heiz-)Kraftwerken. Über die Eigenschaften als Hauptemittent kommt dem Energieversorgungssektor auch aufgrund seiner charakteristischen Struktur eine besondere Bedeutung im Rahmen der Politikgestaltung zu: Die Hauptemissionsquellen sind mit den fossil befeuerten Großkraftwerken in ihrer Gesamtzahl überschaubar, die Eigentümer der Anlagen sind bekannt und die jeweiligen Emissionen im Vergleich zu anderen Industrie-sektoren mit relativ geringem Aufwand bilanzierbar. Zudem weisen Studien zur Implementierung eines möglichen internationalen Emissionsrechtehandels besonders günstige Minderungspotenziale im Bereich des Energiesektors aus<sup>76</sup>, weshalb der Energieversorgungssektor in Bezug auf die Implementierung effektiver

---

<sup>74</sup> Dieser Politikansatz ist allerdings zunächst vom weiteren Verlauf der Ratifizierungsverhandlungen des Kyoto-Protokolls losgelöst. Im Falle des In-Kraft-Tretens des Kyoto-Protokolls ist eine Kopplung des europäischen Systems mit dem im Rahmen des Kyoto-Protokolls anvisierten globalen Handel vorgesehen.

<sup>75</sup> Zu einer Beschreibung des deutschen Allokationsplans vgl. Kapitel 4.4.2.3.6.

<sup>76</sup> Vgl. [Krause 1999], [Capros et al. 2000] und [IPTS 2000].

Klimaschutzmaßnahmen im Mittelpunkt des Interesses der politischen Entscheidungsträger steht.

#### **4.1.2 Strategische Planung der Energieversorgungsunternehmen unter den neuen Rahmenbedingungen**

Im Rahmen der strategischen Planung werden zukünftige Veränderungen des relevanten Wettbewerbsumfelds eines Unternehmens antizipiert und geeignete Strategien entwickelt, die das Unternehmen adäquat auf die antizipierten Veränderungen vorbereiten. Kennzeichen der strategischen Planung sind lange Planungszeiträume, hohe Unsicherheit und ihre zentrale Bedeutung für die langfristige Beständigkeit des Unternehmens. Darüber hinaus unterliegt die Planung sektorspezifischen Einflüssen, im Falle des Energieversorgungssektors sind dies im Wesentlichen:

- die hohe Kapitalintensität der Investitionsprojekte mit sehr langen Laufzeiten im Vergleich zu anderen Sektoren,
- die Wechselwirkungen zwischen den Investitionsentscheidungen der verschiedenen Akteure am Markt aufgrund des unternehmensübergreifenden, vermaschten Versorgungssystems, sowie
- die in den vorigen Abschnitten bereits dargestellte starke politische Einflussnahme auf diesen Sektor.

Weitere sektorspezifische Einflüsse auf die Planungsaufgaben der Energieversorgungsunternehmen ergeben sich aus den besonderen Charakteristika der Produkte Strom und Wärme:

- Sowohl Strom als auch Wärme sind leitungsgebundene Medien, d.h. jeder Transport dieser Produkte erfordert entsprechende Netze. Des Weiteren ist Wärme nur über begrenzte räumliche Distanzen transportierbar.
- Die Speicherung von Strom ist im großtechnischen Maßstab nur sehr begrenzt möglich<sup>77</sup>. Zur Einhaltung der technischen Standards hinsichtlich Netzspannung und Frequenz ist deshalb eine exakte Abstimmung von Angebot und Nachfrage notwendig. Eine Abweichung von den für die einzelnen Netzebenen festgelegten Spannungsniveaus bzw. der Netzfrequenz kann zu erheblichen technischen Problemen bei den Endkunden führen (vgl. [Energie Spektrum 2001, S. 33]).
- Die Nachfrage nach Strom und Wärme ist durch Schwankungen im Tages- und Jahresverlauf gekennzeichnet. Zusätzlich unterliegt sie starken stochastischen Einflüssen.

---

<sup>77</sup> Elektrizität kann mit der Hilfe von Pumpspeicherkraftwerken gespeichert werden, indem überschüssige elektrische Energie in potenzielle Energie umgewandelt wird. Wasser wird hierfür in höher gelegene Speicherbecken gepumpt und zu einem späteren Zeitpunkt zur Stromerzeugung aus Wasserturbinen genutzt. Da aus dieser Vorgehensweise allerdings Energieverluste in der Höhe von ca. 30 % resultieren, ist der Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken aus ökonomischer Sicht nur dann sinnvoll, wenn günstig verfügbarer Grundlaststrom zum Aufbau von Energiereserven für eine Strombereitstellung auf hohem Preisniveau zu Spitzenlastzeiten verwendet werden kann. Zur Verwendung von Pumpspeicherkraftwerken vgl. auch [Wagner 1999].

Ziel der klassischen Energiesystemplanung ist die Gewährleistung einer sicheren und ökonomisch günstigen Energieversorgung für ein gegebenes Versorgungsgebiet mit prognostizierten Lastcharakteristika. Sie gliedert sich dabei im Wesentlichen in die beiden Planungsbereiche Systemausbauplanung und Kraftwerkseinsatzplanung<sup>78</sup>. Mit Hilfe der Systemausbauplanung wird eine für die zukünftigen Versorgungsaufgaben ausreichende und bezüglich ihrer Struktur geeignete Energieversorgungsinfrastruktur konzipiert. Wesentliche Inhalte der Systemausbauplanung sind deshalb sämtliche (Des-) Investitionsentscheidungen zum zukünftigen Kraftwerksbestand. Im Rahmen der Kraftwerkseinsatzplanung wird dann auf Basis des vorhandenen Kraftwerksparks ein auf das antizipierte Lastprofil optimal abgestimmtes Produktionsprogramm ermittelt, wobei insbesondere die unterschiedlichen techno-ökonomischen Charakteristika der verschiedenen Kraftwerke zu berücksichtigen sind. Die Systemausbauplanung und Kraftwerkseinsatzplanung sind eng miteinander verknüpft, da die Entscheidungen für oder gegen den Einsatz einer Technologie durch die voraussichtliche Nutzung zukünftig zur Verfügung stehender Kraftwerkskapazitäten wesentlich beeinflusst werden. In der Regel wird die Energiesystemplanung durch den Einsatz von Energiesystemmodellen unterstützt, mit deren Hilfe das reale Versorgungssystem nachgebildet wird. Hierdurch wird eine fundierte Bewertung alternativer Ausbauszenarios unter Berücksichtigung der wesentlichen techno-ökonomischen Charakteristika des realen Versorgungssystems möglich.

In den nachstehenden Unterkapiteln werden die im Vorhergehenden beschriebenen strukturellen Veränderungen aufgegriffen und deren Einfluss auf die strategische Planung von Energieversorgungsunternehmen abgeleitet. Hierbei werden Veränderungen aufgrund energiepolitischer (vgl. Kapitel 4.1.2.1) und Klimaschutzpolitischer Entscheidungen (vgl. Kapitel 4.1.2.2) differenziert. Die energiepolitischen Entscheidungen umfassen die in den Kapiteln 4.1.1.1 und 4.1.1.2 dargestellte Liberalisierung der Strommärkte und den politisch anvisierten Ausstieg aus der Kernenergie. Hinsichtlich der klimaschutzpolitischen Entscheidungen (Kapitel 4.1.1.3) wird - aufgrund seiner zentralen Bedeutung für die Entwicklung des Energieversorgungssektors - der Fokus auf den europäischen Emissionsrechtehandel und den nationalen Allokationsplan für Deutschland gelegt.

#### **4.1.2.1 *Strategische Implikationen aus der Veränderung der energiepolitischen Rahmenbedingungen***

Für die Energieversorgungsunternehmen bedeutet die Liberalisierung der europäischen Strommärkte einen grundsätzlichen Paradigmenwechsel ihrer Geschäftstätigkeit. Während bisher die kostengünstige Versorgung eines abgegrenzten Versorgungsgebiets bei gleichzeitiger Versorgungssicherheit im Vordergrund stand, befinden sich diese Unternehmen jetzt im freien Wettbewerb um die Nachfrage nach dem Produkt Strom. Da die Kunden nicht mehr einem bestimmten Unternehmen zugeordnet sind, ergibt sich für die Energieversorgungsunternehmen die Aufgabe der Kundenwerbung bzw. -haltung. Im Gegensatz zu anderen Sektoren ist die

---

<sup>78</sup> Zu Planungsaufgaben und -modellen bei Energieversorgungsunternehmen vgl. auch [Wietschel 2000, S. 115 ff.].

Anwendung von Produktdifferenzierungsstrategien aufgrund der Homogenität des Produkts Strom nur sehr begrenzt möglich. Preisstrategien zeigen bisher in erster Linie bei Industriekunden Erfolg, da diese ihren Energiebezug unter streng ökonomischen Kriterien beurteilen und daher schneller zu Lieferantenwechseln bereit sind. Im Gegensatz hierzu zeigt der Haushaltssektor bisher eine geringe Wechselbereitschaft<sup>79</sup>, was u.a. auf die Auffassung der Haushaltskunden von Strom als so genanntem „Low-Involvement-Produkt“ zurückgeführt wird (vgl. [Laker et al. 2003, S. 220]).

Durch die Binnenmarktrichtlinie wird darüber hinaus die Trennung des Netzbetriebs von der Erzeugung gefordert. Diese Trennung eliminiert die Möglichkeit einer Quersubventionierung zwischen den beiden Geschäftsbereichen, die in den ehemals vertikal integrierten Unternehmen noch unter gemeinsamer unternehmerischer Leitung standen. Kraftwerke werden zunehmend als einzelne Profit Center betrieben, was sich in einigen Marktformen – insbesondere in Poolmärkten<sup>80</sup> – aus der Art der Einsatzplanung ergibt. Die Kraftwerksbetreiber bieten ihre Kapazitäten in einem standardisierten Bietverfahren einem unabhängigen Systemoperator an. Dieser ruft anschließend in Abhängigkeit der tatsächlich anliegenden Last die Kapazitäten nach dem Merit-Order-Prinzip<sup>81</sup> ab, wobei der Marktpreis der Höhe des zuletzt eingesetzten Angebots entspricht. In diesem Kontext muss die Historie des Energieversorgungssektors berücksichtigt werden. Die derzeit existierenden Kraftwerksparks wurden unter den Rahmenbedingungen der nationalen Energiepolitik geplant und häufig von staatlichen Versorgungsunternehmen implementiert. Neben den unternehmerischen Zielen einer kostengünstigen Energiebereitstellung wurden im Rahmen der Kraftwerksausbauplanung deshalb auch politische Ziele wie das Streben nach Energieautarkie und internationaler Stärke verfolgt (vgl. [Hadjilambros 1999]). Aufgrund der durch die Liberalisierung veränderten Marktstruktur können sich nun mehrere der unter den ursprünglichen Rahmenbedingungen getätigten Investitionen nicht mehr amortisieren. Dies betrifft in besonderem Maße kapitalintensive Technologien wie Kernkraftwerke, weshalb die Unternehmen sich schneller amortisierende Anlagen wie gasbefeuerte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD) den nuklearen oder auch kohlebefeuereten Großkraftwerken vorziehen (vgl. [Gattinger et al. 1999, S. 430]).

Die Favorisierung sich schnell amortisierender Kraftwerksprojekte ist auch vor dem Hintergrund des in Deutschland politisch bedingten Kernenergieausstiegs kritisch zu bewerten. Hierdurch werden Kapazitäten abgebaut, die aufgrund ihres geringen Anteils an variablen Kosten einen bedeutenden Beitrag zur Deckung der Grundlast

---

<sup>79</sup> Schätzungen der Europäischen Kommission gehen im Bereich des Industriekundensegments von einer Wechselrate inkl. Neuverhandlungen mit dem bestehenden Versorger von 50 bis 100 % aus, während im Kleinkundensegment lediglich 12 – 20 % (Werte für Deutschland und Finnland) ihren Versorger gewechselt haben (vgl. [EC 2002b, S. 8]).

<sup>80</sup> Eine detaillierte Beschreibung von Poolmärkten findet sich bei [Klopfer et al. 1993, S. 157 ff.]. In England/Wales und Skandinavien (Nordpool) existieren derzeit Poolmärkte. Zur kritischen Auseinandersetzung mit den Erfahrungen in England und Wales vgl. [Green 1999].

<sup>81</sup> Die „Merit Order“ entspricht einer nach aufsteigendem Preis sortierten Reihe von im Voraus festgesetzten Angebotsmengen, die in Abhängigkeit der tatsächlich auftretenden Last der Reihe nach von einem unabhängigen Marktakteur abgerufen werden.

beigetragen haben. Demgegenüber sind GuD-Anlagen durch einen vergleichsweise hohen Anteil variabler Kosten gekennzeichnet, weshalb sie bisher primär zu Spitzenlastzeiten eingesetzt werden. Durch einen verstärkten Zubau von GuD-Anlagen bei gleichzeitigem Anstieg der Gaspreise könnten sich somit die Energiebereitstellungskosten und damit auch die Strompreise deutlich erhöhen. Darüber hinaus könnte die in den letzten Jahren an Bedeutung gewinnende Klimaschutzdiskussion zu einer Neubewertung der Kernenergie führen. Jedoch müsste zur Sicherstellung eines langfristigen Planungsrahmens für die Energieversorgungsunternehmen die Nuklearpolitik auf europäischer Ebene vereinheitlicht werden, um einheitliche Voraussetzungen für den europäischen Binnenmarkt zu schaffen.

#### **4.1.2.2 Strategische Implikationen aus der Veränderung der klimaschutzpolitischen Rahmenbedingungen**

Die Beschränkung der zulässigen CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>82</sup> führt zu einer politisch induzierten Begrenzung des vormals freien Gutes Emission. Da mit dessen Verknappung notwendigerweise eine Preisbildung einhergeht, erfordert dies von den Energieversorgungsunternehmen die Bewirtschaftung der CO<sub>2</sub>-Emissionen als zusätzlichem Produktionsfaktor. Im Folgenden werden die Eigenschaften dieses Gutes als Produktionsfaktor kurz dargestellt und dessen Einfluss auf die strategische Planung bei Energieversorgungsunternehmen abgeleitet.

Die eingesetzten Technologien besitzen einen wesentlichen Einfluss auf die Bedeutung des Produktionsfaktors Emissionsrecht<sup>83</sup>. Während bezüglich der Kostenstrukturen von Wasser- und Kernkraftwerken zunächst keine Abhängigkeit besteht, können die Emissionsrechte bei fossilen Energieumwandlungsanlagen einen entscheidenden Kostenfaktor darstellen. Für letztgenannte Technologien gilt es, die Kosten für technische Emissionsminderungsmaßnahmen<sup>84</sup> den Kosten des

---

<sup>82</sup> Die anderen Treibhausgase sollen aufgrund ihrer begrenzten Relevanz für den Energiesektor an dieser Stelle nicht betrachtet werden.

<sup>83</sup> Eine allgemeine Diskussion von Umwelt als Produktionsfaktor findet sich u.a. bei [Steven 1991] und [Dyckhoff 1993].

<sup>84</sup> [Rentz et al. 1995] und [Fichtner 1999, S. 9] differenzieren hinsichtlich der wichtigsten technischen Emissionsminderungsmaßnahmen im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung folgende Gruppen:

Effizienzsteigerungsmaßnahmen: Durch eine Erhöhung der Wirkungsgrade bestehender Anlagen werden geringere spezifische Emissionen freigesetzt.

Brennstoffswitch: Der Ersatz von Brennstoffen mit hohem Kohlenstoffgehalt (bezogen auf den Brennwert) mit weniger emissionsintensiven Brennstoffen erzielt ebenfalls eine Emissionsreduktion. Als Beispiel sei die Umstellung von ölbefeuerten Kraftwerken auf Erdgas genannt.

Lastverlagerung in der Einsatzplanung: Aufgrund von Überkapazitäten im Strommarkt und der Möglichkeit die Lastbereiche, in denen Kraftwerke eingesetzt werden, innerhalb bestimmter (system)technischer Grenzen zu variieren, können emissionsarme Technologien anstelle von emissionsintensiven Anlagen stärker eingelastet werden.

Ersatzinvestitionen: Die Substitution bestehender Altanlagen durch effizientere Kraftwerke leistet einen zwar kapitalintensiven zumeist aber auch effektiven Beitrag zur Emissionsminderung

Ausbau regenerativer Energien bzw. der Kernenergie: Eine zunehmende Nutzung CO<sub>2</sub>-neutraler Energiebereitstellungstechnologien führt durch eine Substitution CO<sub>2</sub>-belasteter Erzeugung zu einer Reduktion der Gesamtemissionen.

Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung: Die zusätzliche Nutzung der bei der Strombereitstellung anfallenden Wärme mit dem Ziel, alternative Kesselanlagen zu substituieren, erreicht eine

Produktionsfaktors Emissionsrecht gegenüberzustellen. Abgesehen von der Minderungsoption eines Brennstoffswitchs ist die Substituierbarkeit des Produktionsfaktors Emissionsrecht bei bestehenden fossilen Kraftwerken in der Regel gering. Somit sind eine Neubewertung der verschiedenen Energiebereitstellungsoptionen und eine entsprechende Anpassung des Produktionsprogramms erforderlich.

Die Bewirtschaftung des ehemals freien Guts wirkt sich in den betroffenen Unternehmen auf mehrere Bereiche der strategischen Planung aus. Wie bereits angedeutet wurde, ergeben sich einerseits bedeutende Auswirkungen hinsichtlich der Produktionsplanung und andererseits aufgrund der begrenzten Minderungsoptionen bezüglich bestehender Kraftwerke auch der Investitionsplanung. Die erforderliche Neubewertung der Produktionskapazitäten sowie die resultierende Anpassung der Produktionspläne wird jedoch durch erhebliche Unsicherheiten bezüglich der zukünftig zu erwartenden Zertifikatpreise erschwert (vgl. [Enzensberger 2003, S. 22]). Darüber hinaus entsteht durch die Kuppelproduktion von Elektrizität, gegebenenfalls Wärme und CO<sub>2</sub>-Emissionen eine Interdependenz der verschiedenen Märkte, was die Anforderungen an die Planung der Energieversorgungsunternehmen weiter erhöht. Aus systemtechnischer Sicht besteht eine Konkurrenz der Anlagen untereinander in definierten Lastbereichen, woraus eine Untergliederung dieser Interdependenz in unterschiedliche Lastbereiche resultiert. Eine weitere Wechselwirkung ergibt sich durch die Kraft-Wärme-Kopplung, die zwei mit unterschiedlicher Laststruktur nachgefragte und nur begrenzt speicherbare Produkte koppelt.

Neben einer effizienten unternehmensinternen Bewirtschaftung des Produktionsfaktors Emissionsrecht existieren folgende Beschaffungsmöglichkeiten, um eine ausreichende Menge an Emissionsrechten bereithalten zu können:

- Bezug<sup>85</sup> über den Handel,
- Beantragung der Gutschrift von im Ausland im Rahmen von Joint Implementation oder Clean Development Mechanism Projekten realisierten Emissionsminderungen oder
- die Delegation der Emissionsrechtebeschaffung an einen qualifizierten Pool.

Aus der politisch induzierten Verknappung des ehemals freien Produktionsfaktors ergibt sich für die betroffenen Energieversorgungsunternehmen somit ein zusätzlicher Analysebedarf. Für alle Geschäftsbereiche ist zu prüfen, wie sich die oben bereits erwähnte Bewirtschaftung des neuen Produktionsfaktors Emissionsrecht auf das strategische Unternehmensumfeld und damit auf die Geschäftstätigkeit des Unternehmens auswirkt. Insbesondere müssen die finanziellen Konsequenzen der Einhaltung der Minderungsverpflichtung durch unternehmensinterne Minderungs-

---

Erhöhung des durchschnittlichen Brennstoffausnutzungsgrads und damit eine Emissionsreduzierung.

CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien: Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Rauchgasen und die anschließende Verflüssigung und Endlagerung ist mit dem heutigen Stand der Technik realisierbar. Jedoch stehen dieser Emissionsminderungsmaßnahme gegenwärtig die vergleichsweise hohen Kosten entgegen.

<sup>85</sup> Im Gegenzug ist ebenfalls der Verkauf von Emissionsrechten über den Handel möglich.

optionen bewertet werden. Hierbei kommt dem zukünftigen Zertifikatspreis eine bedeutende Rolle zu, da er einen wichtigen Kostenfaktor bei der Bewertung bestehender Anlagen sowie Neuanlagen bzw. Ersatzinvestitionen darstellt.

#### **4.2 Anforderungen an ein Modell zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks**

Die Modellanforderungen zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks können in Anforderungen gegliedert werden, die aus den kooperativen sowie den energiewirtschaftlichen Aspekten des Untersuchungsgegenstandes resultieren. Während sich aus den kooperativen Aspekten primär die Anforderung ergibt, dass eine Analyse der Auswirkungen auf das Gesamtsystem nicht ausreicht, sondern die Veränderungen auf Unternehmensebene nachvollziehbar sein müssen, lassen sich die wesentlichen Anforderungen aus energiewirtschaftlichen Aspekten mit folgenden Punkten beschreiben (vgl. [Tietze-Stöckinger et al. 2004c]):

- Um die Nachvollziehbarkeit der in den Modellergebnissen enthaltenen Veränderungsprozesse (z.B. Ersatzinvestitionen, Änderungen des Produktionsprogramms, abweichende Einlastung der Kraftwerke) erreichen zu können, sollen im Modell die relevanten techno-ökonomischen Charakteristika des realen Systems hinreichend genau erfasst werden. Dieser Anforderung kommt eine doppelte Bedeutung zu, da sie sich nicht nur aus den energiewirtschaftlichen Aspekten ergibt, sondern darüber hinaus auch eine zentrale Anforderung bei der Abbildung unternehmensübergreifender Systeme darstellt.
- Zur Berücksichtigung bzw. zur Analyse des Einflusses verschiedener Politikansätze wie beispielsweise dem Kernenergieausstieg, der Förderung der Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und der Beschränkung des zuvor freien Produktionsfaktors Emissionsrecht muss insbesondere die Kuppelproduktion von Strom, gegebenenfalls Wärme und CO<sub>2</sub> adäquat abgebildet werden.
- Aus den langen Nutzungs- und Amortisationsdauern der Anlagen in Verbindung mit deren hoher Kapitalintensität ergibt sich die Notwendigkeit eines langfristigen Betrachtungshorizonts von mindestens zwanzig Jahren. Daraus wiederum resultiert, dass sich über den Betrachtungszeitraum ergebende Veränderungen exogen vorgegebener Eingangsdaten und Rahmenbedingungen angemessen berücksichtigt werden müssen.
- Aufgrund der Interdependenzen zwischen den einzelnen Kraftwerken müssen bei der Identifikation von wirtschaftlich und technisch optimalen Investitionsprojekten deren Auswirkungen auf den bestehenden bzw. zukünftigen Kraftwerkspark beachtet werden. Einzelentscheidungen bezüglich der Investitionsprojekte auf der Basis einer Investitionsplanung mit vorgegebener Anlagenauslastung wird den Anforderungen demnach nicht gerecht, sondern es gilt, die Auslastung jeder Anlage entsprechend ihrer technischen und wirtschaftlichen Charakteristika sowie ihrer Wechselwirkungen mit dem gesamten Energiesystem endogen im Rahmen einer kombinierten Investitions-

und Produktionsprogrammplanung<sup>86</sup> zu bestimmen. Im Rahmen dieser kombinierten Investitions- und Produktionsprogrammplanung kann darüber hinaus eine adäquate Berücksichtigung des Fremdbezugs von Elektrizität aus externen Quellen (EVU oder Strombörsen) gewährleistet werden.

### **4.3 Energiemodelle und ihre Einsatzmöglichkeiten zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks**

Quantitative Modelle zur Entscheidungsunterstützung zielen einerseits auf die Bewältigung der Planungsaufgaben von Unternehmen ab, andererseits werden sie zur Politikberatung eingesetzt. Hinsichtlich der für die beiden Anwendungsfälle eingesetzten Modelle bestehen allerdings wesentliche Unterschiede: Im Rahmen der Politikberatung kommen vorwiegend makroökonomische Ansätze zum Einsatz, während in Unternehmen ingenieurwissenschaftlich und betriebswirtschaftlich geprägte Modelle dominieren.

In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze zur Klassifikation von Energiemodellen dargestellt<sup>87</sup>. Ein weit verbreiteter Ansatz zur Klassifikation ist die Zweiteilung der Energiemodelle in Bottom-Up-Modelle und Top-Down-Modelle, wobei diese Unterteilung eher auf unterschiedlichen Stärken, Schwächen und Untersuchungsgegenständen basiert als auf einer wissenschaftlichen Abgrenzung anhand eindeutig bestimmbarer Kriterien.

Kennzeichen der Top-Down-Modelle sind ein hoher Aggregationsgrad und die Betrachtung der gesamten Volkswirtschaft. Es werden unterschiedliche Sektoren differenziert, zwischen denen Güter ausgetauscht werden. Hochaggregierte Produktionsfunktionen werden zur Abbildung technischer Prozesse hinterlegt, wobei in der Regel keine einzelnen Technologien differenziert werden. Schwerpunkte der Analysen sind die Preisentwicklungen auf verschiedenen Güter- und Faktormärkten sowie die Austauschbeziehungen zwischen den Sektoren unter Berücksichtigung alternativer Rahmenbedingungen.

Demgegenüber basieren Bottom-Up-Modelle auf prozessanalytischen Modellansätzen, in deren Rahmen wesentliche (system)technische Charakteristika des realen Energieversorgungssystems berücksichtigt werden. Aufgrund der Abbildung der Produktionsprozesse durch techno-ökonomische Parameter sowie der unterschiedlichen Technologien können die technischen Anpassungsprozesse eines gegebenen Systems an Veränderungen der exogen vorgegebenen Rahmenbedingungen nachvollzogen werden. Da es sich bei Bottom-Up-Modellen in der Regel um Partialmodelle handelt, werden Rückkopplungen mit anderen Märkten bzw. intersektorale Verflechtungen im Allgemeinen in den Analysen vernachlässigt.

---

<sup>86</sup> Zur Umsetzbarkeit einer simultanen Investitions- und Produktionsprogrammplanung für Energieversorgungsunternehmen vgl. [Wietschel 2000, S. 216 ff.].

<sup>87</sup> Vgl. beispielsweise [Beaver 1993], [Bunn et al. 1997a], [Bossello et al. 1998], [IEA 1998a, S. 29 ff.], [Zhang et al. 1998], [Messner et al. 1999], [Henning 1999, S. 26 ff.], [Koch et al. 2000], [Vögele 2000, S. 37 ff.] und [FEES 2002, S. 27 ff.].

Die im Folgenden dargestellten Modellansätze entstammen sämtlich dem Bereich der Bottom-Up-Modelle, da bereits aus der allgemeinen Kurzdarstellung der Top-Down-Modelle abgeleitet werden kann, dass diese sich u.a. aufgrund ihrer Zielsetzung und des hohen Aggregationsgrades nicht zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks eignen<sup>88</sup>. Des Weiteren wird von der Darstellung rein ingenieurwissenschaftlich geprägter Modelle zur isolierten Betrachtung einzelner Subsysteme (z.B. Netzmodelle oder Modelle der reinen Kraftwerkseinsatzplanung) abgesehen, da diese zwar zur detaillierten Analyse einzelner Aspekte, nicht jedoch zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks herangezogen werden können.

### 4.3.1 Marktsimulationsmodelle

#### 4.3.1.1 Systemdynamische (system dynamics) Modelle

Systemdynamische Modellierungsansätze zielen auf die Abbildung von Wirkungszusammenhängen zwischen einzelnen Komponenten eines realen Systems unter Berücksichtigung des Faktors Zeit. Hierdurch kann in Marktmodellen das Verhalten einzelner Modelleinheiten (z.B. der einzelnen Akteure) in Abhängigkeit verschiedener Marktinformationen dargestellt werden. Differentialgleichungssysteme bilden hierbei in der Regel die Basis für die mathematische Beschreibung der Wirkungszusammenhänge. Im Rahmen der Energiemodellierung werden systemdynamische Modelle primär zur Analyse liberalisierter Märkte herangezogen<sup>89</sup>.

Eine Stärke systemdynamischer Modelle ist die Abbildung von Marktmechanismen durch differenziert beschriebene Wirkungszusammenhänge, anstelle der Vorgabe einer einheitlichen Zielfunktion. Reale Märkte können somit differenziert abgebildet werden, da Marktunvollkommenheiten, strategisches Verhalten und zeitliche Verzögerungen bei Anpassungsprozessen in den Analysen berücksichtigt werden können. Ein weiterer Vorteil dieses Modellierungsansatzes ergibt sich aus der Notwendigkeit, alle Wirkungszusammenhänge des abzubildenden Systems detailliert zu analysieren und zu diskutieren, wodurch ein gesteigertes Problembewusstsein und Marktverständnis bei allen beteiligten Partnern erzielt wird<sup>90</sup>.

Schwächen des Modellierungsansatzes begründen sich aus methodischen Problemen bei der Validierung der im Modell hinterlegten Wirkungszusammenhänge und der Notwendigkeit der Kalibrierung des entwickelten Modells anhand geeigneter Daten<sup>91</sup>. Darüber hinaus werden gegenwärtig am Strommarkt beobachtete Wirkungs-

---

<sup>88</sup> Hinsichtlich einer aktuellen Übersicht unterschiedlicher Energiemodelle vgl. [Enzensberger 2003, S. 43 ff.].

<sup>89</sup> Vgl. [Ford 1997] und [Lyneis 1997] (USA), [Dyner et al. 1997] (Kolumbien) und [Bunn et al. 1997b] (England/Wales). Ein allgemeiner Überblick über die Verwendung systemdynamischer Modelle im Energiebereich im angelsächsischen Raum findet sich bei [Dyner et al. 1997, S. 261 ff.].

<sup>90</sup> [Lane 1997] und [Morecroft et al. 1997] verwenden in diesem Zusammenhang den Begriff „Capacity Building Tool“.

<sup>91</sup> Beispielsweise verwenden [de Vries et al. 1999] Energiedaten des Zeitraums 1900 bis 1990 zur Kalibrierung eines hoch aggregierten Weltmodells mit einem Betrachtungszeitraum bis 2100.

zusammenhänge maßgeblich vom aktuellen strategischen Verhalten der beteiligten Akteure bestimmt. Somit ergibt sich für längerfristige Betrachtungen zusätzlich die Problematik hinsichtlich einer geeigneten Basis zur Ableitung des zukünftigen (strategischen) Verhaltens der Akteure.

#### **4.3.1.2 Multi-Agenten-Systeme**

In Multi-Agenten-Systemen werden die einzelnen Marktteilnehmer von so genannten Agenten repräsentiert, deren am Markt verfolgte Bietstrategien durch die für jeden Agenten hinterlegte Zielfunktion bestimmt werden. Die Agenten verfügen über eigene Anlagenparks, wobei der Detaillierungsgrad der Abbildung dem der Energiesystemmodelle (vgl. Kapitel 4.3.2) entsprechen kann (vgl. [Bower et al. 2001]). Zwischen den Agenten findet Kommunikation statt, wobei es im Gegensatz zu spieltheoretischen Modellen nicht des Austausches konkreter Strategien bedarf. Als Reaktion auf Marktsignale (z.B. Preissignale) passen die Agenten ihre jeweilige Strategie dem Marktgeschehen an (teilintelligente Systeme) (vgl. [Krishna et al. 1998a, S. 1103]). Basis dieser Strategieanpassung bzw. des Lernens der Agenten sind für jeden Agenten separat hinterlegte Entscheidungsregeln<sup>92</sup>. Der Markt wird durch sich wiederholende Bietrunden dargestellt, zwischen denen die Agenten ihre Strategieanpassung durchführen können.

Im Energiebereich werden Multi-Agenten-Systeme zur Analyse des strategischen Verhaltens der Marktteilnehmer im liberalisierten Strommarkt eingesetzt<sup>93</sup>. Während der Fokus der Analysen in der Regel auf das individuelle Verhalten der einzelnen Akteure gerichtet ist, stellen [Krishna et al. 1998b] die Möglichkeit zur Bildung von Koalitionen in den Vordergrund. Gewöhnlich wird ein kurzfristiger Betrachtungszeitraum (bis zu einem Jahr) gewählt und (Des-)Investitionsentscheidungen werden nicht berücksichtigt. [Weinhardt et al. 2000] stellen ein Konzept eines europäischen Multi-Agenten-Strommarktmodells mit langfristigem Betrachtungshorizont vor. Basis dieser Modellkonzeption ist die Energiesystemmodellfamilie PERSEUS und die Multi-Agenten-Architektur ADAMCO.

#### **4.3.1.3 Supply Function Equilibria Modelle**

Supply Function Equilibria Modelle zählen zu den spieltheoretischen Modellierungsansätzen, welche bisher vergleichsweise selten im Energiebereich angewendet wurden. Jedoch wurde das von [Klemperer et al. 1989] entwickelte methodische Grundgerüst zur Analyse des Bietverhaltens von Anbietern homogener Güter in unvollkommenen Märkten mehrfach zur Untersuchung unterschiedlicher Ausgestaltungsalternativen eines Spotmarkts für Elektrizität angewendet (vgl. [Bolle 1992, S. 94] und [Green et al. 1992, S. 933]). Zentrales Anliegen ist hierbei die Untersuchung der Bedeutung von Marktmacht in oligopolistischen Strukturen<sup>94</sup>.

---

<sup>92</sup> Zu einer detaillierten Darstellung der hinterlegten Entscheidungsregeln vgl. [Bower et al. 2000].

<sup>93</sup> Zur EDV-technischen Umsetzung eines solchen Modells vgl. [Harp et al. 2000].

<sup>94</sup> Bei den meisten der zitierten Autoren bildet ein allgemein beschriebenes, symmetrisches Duopol die Basis der methodischen Entwicklung und die Anwendbarkeit auf symmetrische Oligopole wird

Dieses Verfahren zur Ermittlung eines Nash-Gleichgewichts auf Grundlage von Angebotskurven wird primär zur vorgelagerten Analyse alternativer Marktausgestaltungsformen genutzt.

Das Nash-Gleichgewicht wird jeweils für einzelne Zeitpunkte ermittelt. Nicht berücksichtigt werden Zeitschritt übergreifende Aspekte (u.a. mehrperiodige Investitionsentscheidungen, technische Restriktionen wie Laständerungskosten), stattdessen müssen diese in die Bestimmung geeigneter Angebotskurven in vorangestellten Berechnungen einfließen. Durch Anwendung dieses Modellierungsansatzes können sich einstellende Marktpreise und Absatzmengen einzelner Anbieter bestimmt werden. Die Zielsetzung der Modellanwendung ist, eine skizzierte bzw. gegebene Marktsituation hinsichtlich möglicher wettbewerbsverzerrender Kooperationsstrategien zwischen einzelnen Anbietern zu bewerten. Zusätzlich zur Marktmacht der Oligopolisten werden in aktuellen Arbeiten weitere Marktspezifika deregulierter Energiemärkte integriert<sup>95</sup>.

Eine wesentliche Schwäche der skizzierten Verfahren sind die teilweise sehr restriktiven Annahmen zur Ableitung der Angebotskurven (vgl. [Bunn 2000, S. 167]). Demgegenüber liegt die wesentliche Stärke der Modelle in der Möglichkeit der Simulation von Preiseffekten in oligopolistischen Marktstrukturen. Diese Modelle dienen somit vornehmlich zur (politischen) Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Bewertung alternativer Ausgestaltungsformen zukünftiger Strommärkte, weshalb Supply Function Equilibria Modelle meist im Vorfeld geplanter Marktstrukturierungen entwickelt wurden<sup>96</sup>. Jedoch sind konkrete Anwendungsmöglichkeiten für den Einsatz bei Energieversorgungsunternehmen gering.

#### 4.3.2 Optimierende Energiesystemmodelle

Optimierende Energiesystemmodelle werden häufig zur Unternehmensplanung bei Energieversorgungsunternehmen und auch in der Politikberatung eingesetzt. Sie sind gekennzeichnet durch eine stark technologiebasierte Abbildung des realen Energieversorgungssystems. Gewöhnlich wird dieses in den eingesetzten Energie- und Stoffflussmodellen in Form eines gerichteten Graphen modelliert, wobei die Kanten die unterschiedlichen Energie- und Stoffflüsse des Systems darstellen und die Knoten die Umwandlungsanlagen beinhalten bzw. Netzknoten nachbilden. Aufgrund der detaillierten Abbildung der Energieumwandlungsprozesse anhand techno-ökonomischer Charakteristika können die durch exogene Einflüsse (wie Politikmaßnahmen oder variierende Brennstoffpreise) ausgelösten technischen Veränderungsprozesse im Detail nachvollzogen werden.

In diesen Modellen wird im Rahmen einer systemübergreifenden Optimierung die Produktionsentscheidung im Hinblick auf die Nutzung zur Verfügung stehender Anlagen getroffen. Optimale Produktionspläne werden unter Berücksichtigung

---

nachgewiesen. Der Transfer der skizzierten Methodik auf asymmetrische Duo- oder Oligopole ist jedoch problembehaftet.

<sup>95</sup> Beispielsweise Stromlieferverträge und Preisobergrenzen (vgl. [Anderson et al. 2002]) oder sog. Stranded Costs (vgl. [del Castillo et al. 2000]).

<sup>96</sup> Vgl. z.B. [Green et al. 1992] für die Anwendung auf England/Wales, [del Castillo et al. 2000] für Spanien, [Rudkevich et al. 1998] für die USA und [Anderson et al. 2002] für Australien.

unterschiedlicher Lastbereiche sowie der Kostenstruktur und Laständerungsmöglichkeiten einzelner Anlagen(-typen) ermittelt. Die Berücksichtigung von (Des-)Investitionsentscheidungen in langfristigen Betrachtungen gestattet eine simultane Investitions- und Produktionsprogrammplanung.

Ausgehend von den drei Basismodellen EFOM (vgl. [van der Voort et al. 1984]), MARKAL (vgl. [Fishbone et al. 1981]) und MESSAGE (vgl. [Messner 1984]) wurden im Rahmen europäischer Forschungsvorhaben in verschiedenen Forschungseinrichtungen zahlreiche Weiterentwicklungen durchgeführt<sup>97</sup>. In Deutschland zählen hierzu die Modelle IKARUS (vgl. [Martinsen et al. 1997]), E<sup>3</sup>-Net (vgl. [Fahl et al. 2002]), EMS (vgl. [Gerdey et al. 2002]), EIREM/EUDIS (vgl. [Hoster 1996]) und [Kreuzberg 1998]) sowie die PERSEUS-Modelle (vgl. Kapitel 4.3.4).

Der methodische Ansatz der Energiesystemmodelle ist meist die lineare Programmierung mit der Zielsetzung, die Systemausgaben zu minimieren. Des Weiteren werden auch vereinzelt Zielfunktionen zur Gewinnmaximierung sowie eine um weitere Terme erweiterte Zielfunktion (im Sinne des Goal-Programming-Ansatzes) verwendet. Das Ziel dieses Modellansatzes ist, ein unter den gegebenen Rahmenbedingungen optimales Energieversorgungssystem zu bestimmen, wobei den Analysen in der Regel ein mittel- bis langfristiger Betrachtungshorizont zugrunde liegt. Nicht berücksichtigt wird in diesem Modellansatz das strategische Verhalten der Akteure. Im Rahmen der Energiesystemmodelle wird von einem perfekten Wettbewerb ausgegangen und (Des-)Investitionsentscheidungen basieren auf rein ökonomischen Kriterien unter perfekter Voraussicht.

Eine Einschränkung des Modellansatzes ist der Umstand, dass Energiesystemmodelle Partialmodelle darstellen, d.h. dass sie nur einen begrenzten Teil der durch sektorale Interdependenzen gekennzeichneten Volkswirtschaft abbilden. Die fehlende Rückkopplung zwischen dem analysierten Energieversorgungssystem und exogen vorgegebenen Parametern wie z.B. Brennstoffpreisen oder Energienachfrage müssen deshalb bei der Szenariodefinition berücksichtigt werden. Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus dem methodischen Ansatz der linearen Programmierung. Insbesondere muss auf eine geeignete Modellierung zur Vermeidung der so genannten Bang-Bang-Effekte<sup>98</sup> geachtet werden.

Wichtige Kennzeichen der Energiesystemmodelle sind die Ergebnistransparenz, der hohe Detaillierungsgrad bei der Abbildung des realen Energieversorgungssystems und ihre Flexibilität in der Modellstruktur. Aufgrund dieser Vorteile wurden sie zu einem wichtigen Standardtool, das sowohl in der energiewirtschaftlichen Forschung als auch in den Planungsabteilungen der Energieversorgungsunternehmen weit verbreitet ist.

---

<sup>97</sup> Zu Modellentwicklungen innerhalb der MARKAL-Modellgruppe vgl. [Seebregts et al. 2002], Weiterentwicklungen der PERSEUS-Modellfamilie beschreiben [Wietschel et al. 1997b].

<sup>98</sup> Im Rahmen der linearen Programmierung wird bei marginalen ökonomischen Vorteilen einer technischen Option diese vollkommen ausgeschöpft bevor weitere technische Optionen berücksichtigt werden. Eine geringe Variation der Eingangsparameter kann so zu deutlichen Unterschieden in der resultierenden Systemstruktur führen (Synonym: Penny-Switching).

### 4.3.3 Eignung der diskutierten Modellansätze zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks

Im Folgenden werden die in den vorangegangenen Kapiteln skizzierten Modellierungsansätze nochmals kurz aufgegriffen und ihre Eignung zur techno-ökonomischen Analyse von Gemeinschaftsheizkraftwerken diskutiert. Analog zur Reihenfolge der Modellvorstellung wird zuerst auf die Eignung der Marktsimulationsmodelle eingegangen bevor die Anwendungsmöglichkeit der optimierenden Energiesystemmodelle dargestellt wird.

Der Einsatz systemdynamischer Modellierungsansätze dient insbesondere der Abbildung von Marktmechanismen. Ein Vorteil der systemdynamischen Modelle im Vergleich zu reinen Optimierungsmodellen ist die Möglichkeit, Marktimperfectionen und einfache Mechanismen strategischen Verhaltens detailliert berücksichtigen zu können<sup>99</sup>. Maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse besitzen die für die einzelnen Akteure hinterlegten Entscheidungsregeln. Das komplexe Wechselspiel dieser Entscheidungsregeln kann insbesondere im Rahmen langfristiger Betrachtungen und bei der Berücksichtigung von Strukturveränderungen des betrachteten Systems zu unplausiblen Ergebnissen führen. Da jedoch im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks eine langfristige Betrachtung erforderlich ist, wird vom Einsatz systemdynamischer Modelle abgesehen.

Ähnliche Einschränkungen gelten auch bezüglich der Multi-Agenten-Systeme. Sie werden ebenfalls primär für kurzfristige Betrachtungen herangezogen. Für längerfristige Betrachtungen ergibt sich die Problematik, geeignete langfristige Strategien für die einzelnen Akteure abzuleiten. Beispielhaft hierfür ist das von [Weinhardt et al. 2000] präsentierte Konzept, in dem ein optimierendes Energiesystemmodell zur Ableitung der langfristigen Strategien für den Multi-Agenten-Ansatz genutzt werden soll. Dies zeigt, dass auch der Ansatz der Multi-Agenten-Systeme nicht zur techno-ökonomischen Analyse von Gemeinschaftsheizkraftwerken dienen kann.

Die Einsatzmöglichkeiten von Supply Function Equilibria Modellen im Rahmen der in dieser Arbeit behandelten Fragestellung sind begrenzt. Aufgrund des geringen technischen Detaillierungsgrads bei der Abbildung des realen Systems und der Vernachlässigung von Zeitschritt übergreifenden Aspekten wie beispielsweise mehrperiodigen Investitionsentscheidungen werden diese Modelle den in Kapitel 4.2 aufgestellten Modellanforderungen nicht gerecht. Sowohl dieser Modellansatz als auch Multi-Agenten-Systeme könnten jedoch für eine nachgelagerte Analyse der Auswirkungen einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks auf den Strom- bzw. Energiemarkt eingesetzt werden.

Optimierende Energiesystemmodelle eignen sich zur Ermittlung eines optimalen Kraftwerksparks unter Berücksichtigung unterschiedlicher (exogen vorgegebener) Rahmenbedingungen. Zwar werden in der Realität auftretende Zeitverzögerungen der Akteursentscheidungen vernachlässigt, jedoch können resultierende technische

---

<sup>99</sup> Zu einer Diskussion der Unterschiede zwischen Optimierungs- und systemdynamischen Modellen siehe [Bunn et al. 1997b].

Veränderungsprozesse im System detailliert nachvollzogen werden. Im Gegensatz zu den Marktsimulationsmodellen werden die Veränderungsprozesse nicht durch ein vom Modellanwender hinterlegtes Entscheidungsverhalten der abgebildeten Akteure beeinflusst, weshalb der Modellanwender wertvolle Hinweise bezüglich eines an die gegebenen Rahmenbedingungen optimal ausgerichteten Energieversorgungssystems erhält. Während die Marktsimulationsmodelle auf die Analyse der Auswirkungen eines festgelegten Entscheidungsverhaltens am Markt fokussieren, leisten optimierende Energiesystemmodelle eine Entscheidungsunterstützung hinsichtlich einer geeigneten Systemanpassung an exogen vorgegebene Rahmenbedingungen. Letzteres kongruiert stärker mit den Zielsetzungen bzw. den Modellanforderungen dieser Arbeit, weshalb optimierende Energiesystemmodelle die Grundlage der Modellentwicklung darstellen.

Im Rahmen dieser Arbeit kommt dem von [Fichtner 1999] entwickelten Energiesystemmodell PERSEUS-EVU besondere Bedeutung zu. Diese Arbeit bildet die Basis für die durchgeführten Erweiterungen und Weiterentwicklungen für den Einsatz zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks, weshalb vor der Präsentation des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modells LINK<sup>opt</sup>-JPP (siehe Kapitel 4.4) im folgenden Kapitel das PERSEUS-Modellsystem kurz dargestellt wird<sup>100</sup>.

#### 4.3.4 Kurzdarstellung des PERSEUS-Modellsystems

Das technologiebasierte Energie- und Stoffflussmodell PERSEUS<sup>101</sup> wurde auf der Basis des Modells EFOM-ENV im Rahmen von zahlreichen Arbeiten am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) entwickelt<sup>102</sup>. Eine strikte Trennung von Modellfunktionalität und Daten des abzubildenden Energiesystems ermöglicht eine einfache Realisierung methodischer Modifikationen. Das PERSEUS-Modellsystem setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen<sup>103</sup>:

- Daten-Management-System (DMS): Die Modelldaten einzelner Anwendungsfälle bzw. Energiesysteme werden mittels einer relationalen Datenbank verwaltet. Des Weiteren stellt das Daten-Management-System die Schnittstelle zu anderen Programmen dar (z.B. Spreadsheet-Programme) und gewährleistet somit eine einfache Handhabung großer Inputdatenmengen.
- PERSEUS-Modell: Mittels des in der Programmiersprache GAMS<sup>104</sup> umgesetzten linearen Optimierungsmodells werden die zu betrachtenden Energiesysteme abgebildet und optimiert. Das mathematische Gleichungssystem des Modells wird in Kapitel 4.4.2 beschrieben. Zur Lösung des Optimierproblems werden unterschiedliche Solver eingesetzt, wobei für (gemischt-ganzzahlige)

---

<sup>100</sup> Die Namensänderung dient nicht einer Abgrenzung des hier entwickelten Modells LINK<sup>opt</sup> von den bestehenden PERSEUS-Modellen, sondern wurde vielmehr eingeführt, um die in dieser Arbeit entwickelten Modellvarianten unter einem einheitlichen Namen führen zu können.

<sup>101</sup> Program Package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply

<sup>102</sup> Vgl. [Oder 1994], [Wietschel 1995], [Lüth 1997], [Schöttle 1998], [Fichtner 1999] und [Ardone 1999].

<sup>103</sup> Vgl. hierzu auch [Göbel 2001].

<sup>104</sup> General Algebraic Modelling System (vgl. [Brooke et al. 1998]).

lineare Probleme meist der kommerzielle Solver CPLEX<sup>105</sup> verwendet wird. Die Ergebnisdateien werden ebenfalls durch diese Systemkomponente erzeugt.

- **Auswertungstools:** In Abhängigkeit der Problemstellung werden unterschiedliche Anforderungen an die Auswertung der Modellergebnisse gestellt, weshalb auch hier eine Schnittstelle zu Spreadsheet-Programmen implementiert wurde.

Das PERSEUS-Modellsystem wird primär zur Planung und Optimierung von Energiesystemen unter sich ändernden Rahmenbedingungen genutzt, wobei es sich zur Analyse einer Vielzahl unterschiedlicher Fragestellungen in diesem Kontext anwenden lässt. Traditionell wird das Modell für mittel- bis langfristige Betrachtungen mit dem Schwerpunkt der Kraftwerksausbau- (bzw. Kraftwerksrückbau-) und Energieeinsatzplanung eingesetzt. Wesentliche methodische Unterschiede der bislang entwickelten PERSEUS-Modelle sind der Einsatz verschiedener Optimierungsverfahren, die Verwendung modifizierter Zielfunktionen und das unterschiedliche Aggregationsniveau der Inputdaten bzw. der Abbildung des realen Systems. Des Weiteren können die Modelle anhand der unterschiedlichen Fragestellungen sowie des betrachteten Bilanzraums differenziert werden (siehe Tabelle 14).

**Tabelle 14:** Überblick ausgewählter Module der PERSEUS Modellfamilie (in Anlehnung an [Dreher 2001])

	Anwendungen	Quellen
<b>Methodische Module</b>		
<b>Optimierungsverfahren</b>		
Lineare Programmierung	Verschiedene Länder, Stadtwerke Karlsruhe und Rottweil, RWE Energie AG, Wingas GmbH	u.a. [Fichtner 1999]
Dekompositions-Algorithmus	u.a. Deutschland, Russland, Indonesien	u.a. [Ardone 1999]
Iterative Optimierung	Deutschland	[Wietschel 1995]
Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung	u.a. Stadtwerke Karlsruhe und Rottweil, RWE Energie AG, Industriegebiet Rheinhafen Karlsruhe	[Fichtner 1999], [Göbelt et al. 2000], [Frank 2003]
Stochastische lineare Programmierung	Energieversorgungsunternehmen (EVU)	[Göbelt et al. 2000]

<sup>105</sup> Vgl. hierzu auch [GAMS 2004].

	Anwendungen	Quellen
<b>Zielfunktion</b>		
Ausgabenminimierung	Verschiedene Länder, Regionen u. EVU	[Wietschel et al. 1997a]
Gewinnmaximierung	Energieversorgungsunternehmen	[Göbelt et al. 2000]
Goal-Programming	Frankreich	[Rentz et al. 2003a]
<b>Aggregationsniveau</b>		
Disaggregierte Modellierung von Umwandlungsprozessen und Lastverläufen	Norddeutschland, Baden-Württemberg, Stadtwerke Karlsruhe und Rottweil, RWE Energie AG	u.a. [Rentz et al. 1998b]
Aggregierte Modellierung	Verschiedene Länder, Nationenübergreifend	[Ardone 1999], [Enzensberger 2003]
<b>Anwendungsorientierte Module</b>		
<b>Einsatzschwerpunkt</b>		
Emissionsminderungsstrategien	Verschiedene Länder	[Ardone 1999]
LCP/IRP-Strategien	Stadtwerke Karlsruhe und Rottweil	[Schöttle 1998]
Analyse flexibler Instrumente zum Klimaschutz	Deutschland, Russland, Indonesien, Indien	[Ardone 1999]
Externe Kosten	Deutschland, Slowenien, Frankreich	u.a. [Lüth 1997]
Kapazitätsausbau- und -rückbauplanung	Stadtwerke Karlsruhe und Rottweil, RWE Energie AG, Wingas GmbH	[Fichtner 1999]
Anlagen-Contracting	Stadtwerke Karlsruhe und Rottweil	[Wietschel et al. 1999]
Bewertung umweltpolitischer Instrumente	Deutschland, Baden-Württemberg	[Rentz et al. 2001]
Entwicklung von Nachhaltigkeitsstrategien	Frankreich	[Rentz et al. 2003a]
Ausgestaltung von Energienetzwerken	Industriegebiet Rheinhafen Karlsruhe	[Frank 2003]
<b>Bilanzraum</b>		
Nationenübergreifend	Europa	[Enzensberger 2003]
Nation	Verschiedene Länder	[Ardone 1999]
Region	Norddeutschland, Baden-Württemberg	[Dreher et al. 2000]
Sektor	Holzoberflächenbehandlung	[Wietschel et al. 1997a]
Unternehmen	Stadtwerke Karlsruhe und Rottweil, RWE Energie AG, Wingas GmbH	[Fichtner 1999]
Unternehmensübergreifend	Industriegebiet Rheinhafen Karlsruhe	[Frank 2003]

## 4.4 Modellbeschreibung LINK<sup>opt</sup>-JPP

### 4.4.1 Einführung

Auf Basis des bestehenden PERSEUS-Modellinstrumentariums (vgl. [Fichtner 1999]) wurde im Rahmen dieser Arbeit das Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP<sup>106</sup> entwickelt. LINK<sup>opt</sup>-JPP ist ein Energie- und Stoffflussmodell zur Analyse und Abbildung des Kraftwerksparks eines Flächenversorgers und eines Stadtwerks unter alternativen Rahmenbedingungen, wobei Auswirkungen einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb

<sup>106</sup> LINK<sup>opt</sup> steht für to link (engl. verbinden) und to optimise (engl. optimieren). JPP: Joint Power Plant.

eines Gemeinschaftsheizkraftwerks den Schwerpunkt der Analysen darstellen. Die einzelnen Kraftwerksparks sind über Austauschleitungen verbunden, sodass neben der Entwicklung der Anlagenparks auch der Stromaustausch zwischen den Unternehmen einen integralen Bestandteil der Systemoptimierung darstellt.

Im Rahmen des gewählten Optimierungsansatzes werden Systemausbauplanung und Kraftwerkseinsatzplanung integriert. Sämtliche Zubauentscheidungen für Neuanlagen sowie Stilllegungsentscheidungen für bestehende Anlagen sind Bestandteil der Systemausbauplanung. Hingegen legt die Kraftwerkeinsatzplanung den Beitrag der zur Verfügung stehenden Anlagen zur Energienachfragedeckung hinsichtlich Zeitpunkt, Betriebsmodus und Umfang fest. Die simultane Berücksichtigung der Stromaustauschoptionen zwischen den einzelnen Unternehmen sowie die Möglichkeit des Stromfremdbezugs von anderen Unternehmen oder über eine Strombörse<sup>107</sup> stellen wichtige Funktionalitäten eines Energiesystemmodells für langfristige Planungszeiträume dar. Der Betrachtungszeitraum kann flexibel gewählt werden, in der Regel beträgt er jedoch 20 - 30 Jahre.

Im Wesentlichen dient das entwickelte Modell der Analyse der folgenden Fragestellungen:

- Welche techno-ökonomischen Auswirkungen ergeben sich durch eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks für das Gesamtsystem und die einzelnen Akteure?
- Wie wirken sich Veränderungen der exogen vorgegebenen Rahmenbedingungen wie Brennstoffpreise oder Vorgaben hinsichtlich eines minimalen Anteils der Eigenerzeugung auf das Energiesystem aus, insbesondere auf eine mögliche Kooperation?
- Inwieweit ergeben sich durch den europäischen Emissionsrechtelandel zusätzliche Anreize zur Implementierung eines Gemeinschaftsheizkraftwerks?

LINK<sup>opt</sup>-JPP ist wie auch die PERSEUS-Modellfamilie in der Programmiersprache GAMS<sup>108</sup> implementiert. Zur Lösung wird der kommerzielle Solver CPLEX 9.0<sup>109</sup> verwendet. Der methodische Ansatz des Modells basiert auf einer mehrperiodigen, gemischt-ganzzahligen, linearen Optimierung. Zielfunktion ist die Minimierung aller auf das Basisjahr diskontierten entscheidungsrelevanten Systemausgaben. Durch diese übergreifende Optimierung wird das Gesamtoptimum des Systems (und nicht die lokalen Optima der einzelnen Akteure) ermittelt. Technische, ökonomische und ökologische Restriktionen dienen der problemadäquaten Erfassung wesentlicher systemtechnischer Charakteristika des realen Energieversorgungssystems.

Die jeweils für den Flächenversorger und das Stadtwerk exogen vorgegebene Strom- und Wärmenachfrage (Last) stellt die treibende Größe des Modells dar. Sowohl bestehende Anlagen als auch Neuanlagen (ebenso einzelbetriebliche als auch unternehmensübergreifende Zubauoptionen) können zur Deckung dieser Nachfrage eingesetzt werden. Die unterschiedlichen Betriebsweisen der Anlagen sind in

---

<sup>107</sup> Beispielsweise die in Leipzig angesiedelte European Energy Exchange (EEX).

<sup>108</sup> General Algebraic Modelling System (vgl. [Brooke et al. 1998]).

<sup>109</sup> Vgl. hierzu auch [GAMS 2004].

LINK<sup>opt</sup>-JPP anhand von technischen und ökonomischen Parametern abgebildet. Unter der Beachtung gegebener systemtechnischer Restriktionen wird im Rahmen der Systemoptimierung eine ausgabenminimale, unternehmensübergreifende Versorgungsstruktur zur Deckung der vorgegebenen Energienachfrage ermittelt.

Mittels einer Graphenstruktur (siehe Kapitel 4.4.2.1) wird das reale Energieversorgungssystem in LINK<sup>opt</sup>-JPP abgebildet, wobei diese die wesentlichen Charakteristika leitungsgebundener Medien widerspiegelt. Die differenzierte Parametrisierung der Versorgungsstrukturen bezieht sich sowohl auf die Bereitstellung und den Transport von Energieträgern als auch auf die Übertragung von höheren Energieformen wie Strom und Wärme.

Eine realitätsnahe Wiedergabe der tatsächlichen Produktionsmöglichkeiten ist im Rahmen der adressierten Fragestellungen von zentraler Bedeutung. Die einzelnen Anlagen weisen nicht nur unterschiedliche spezifische fixe und/oder variable Betriebsausgaben auf, sondern besitzen auch verschiedene technische Charakteristika. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Laständerungsfähigkeit, der Flexibilität zur Nutzung unterschiedlicher Brennstoffe und der Möglichkeiten zur Kraft-Wärme-Kopplung der abgebildeten Anlagen. Diese Unterschiede werden im Modell mittels der Integration entsprechender technischer Restriktion in das Modellgleichungssystem berücksichtigt (siehe Kapitel 4.4.2.3.3).

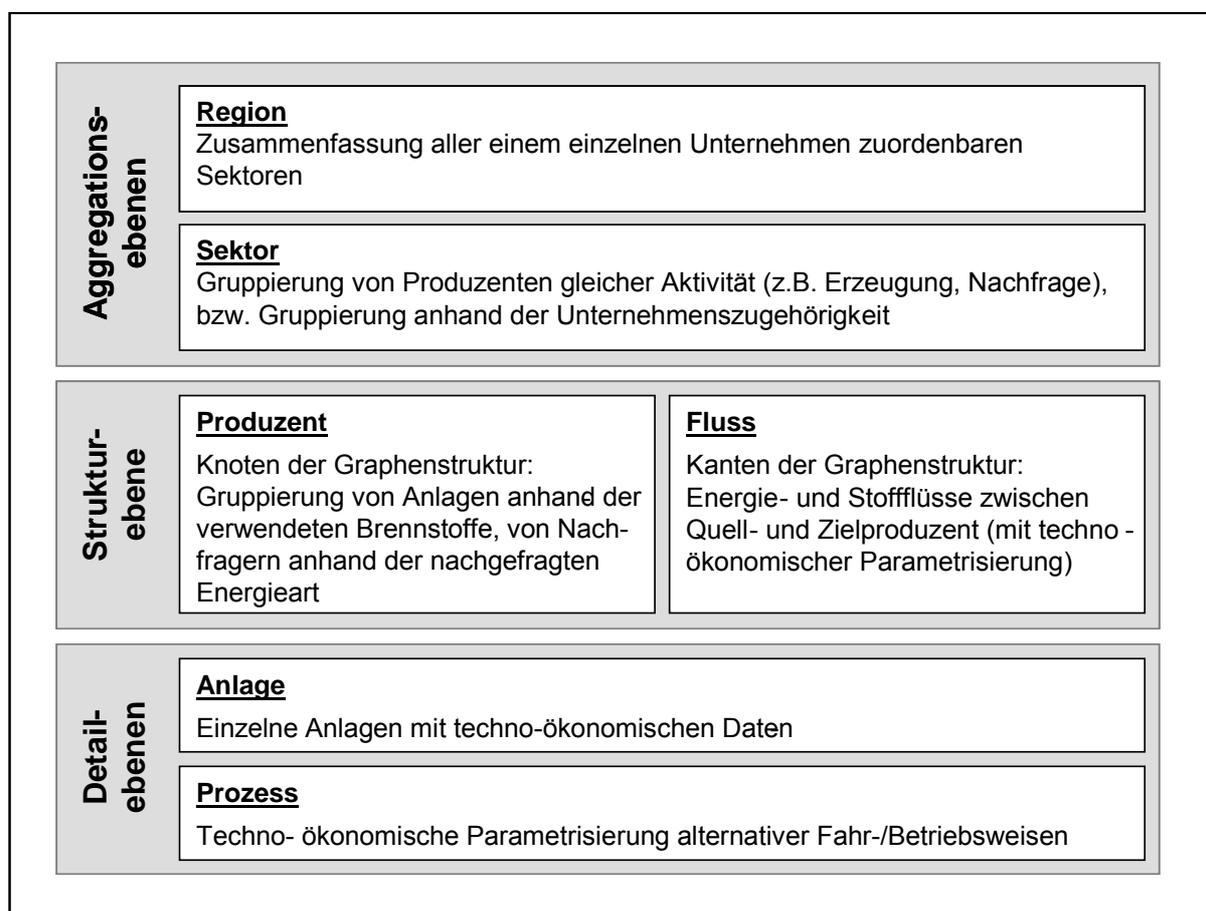
Die Optimiervariablen des Modells können in zwei Gruppen differenziert werden: Fluss- und Kapazitätsvariablen. Flussvariablen umfassen sämtliche Entscheidungen hinsichtlich des Anlageneinsatzes, der eingesetzten Brennstoffe und der Weiterleitung der verschiedenen Energieformen. Zubau- sowie ökonomisch motivierte Rückbauentscheidungen werden hingegen von den Kapazitätsvariablen erfasst. Wesentliches Merkmal der mehrperiodigen Bottom-Up-Modellierung ist die Berücksichtigung intertemporaler Zusammenhänge. Im Rahmen des hier betrachteten Anwendungsbeispiels sind dies z.B. der Einfluss einer Investitionsentscheidung auf die in Folgeperioden zur Verfügung stehenden Kraftwerkskapazitäten oder periodenübergreifende Restriktionen wie eine Begrenzung der Restnutzung von Kernkraftwerken.

## **4.4.2 Mathematische Beschreibung des LINK<sup>opt</sup>-JPP Modells**

### **4.4.2.1 Modellelemente, Parameter und Variablen**

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt wurde, entspricht die Abbildung des realen Energieversorgungssystems LINK<sup>opt</sup>-JPP einem gerichteten Graphen, in dem die Kanten die Energie- und Stoffflüsse und die Knoten verschiedene „Produzenten“ darstellen. Produzenten können als abstrakte Akteure aufgefasst werden, die Energie- bzw. Stoffformen bereitstellen, umwandeln, nachfragen oder zusammenführen. Bezogen auf das abgebildete Energiesystem repräsentieren sie unterschiedliche Endenergienachfrager oder jeweils eine Menge von Energiebereitstellungsanlagen eines Energieversorgungsunternehmens, die denselben Primärenergieträger nutzen. Insgesamt werden in LINK<sup>opt</sup>-JPP sechs Grundelemente auf verschiedenen Hierarchieebenen differenziert (vgl. Abbildung 2).

Regionen (Index  $reg$ , Indexmenge  $REG$ ) und Sektoren (Index  $sec$ , Indexmenge  $SEC$ ) sind der Strukturebene des Modells übergeordnete Aggregationsebenen. Im hier betrachteten Anwendungsfall wurde für jedes Unternehmen eine eigene Region definiert, die sämtliche einem einzelnen Unternehmen zuordenbaren Einheiten enthält. Sektoren gruppieren Produzenten zu höher aggregierten, aus der spezifischen Fragestellung abgeleiteten Einheiten. Im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks stellen die einzelnen Sektoren die unterschiedlichen Kraftwerke der Unternehmen, d.h. des Flächenversorgers und des Stadtwerks, sowie die Endenergienachfrage dar. Darüber hinaus wurde ein Sektor generiert, der zur Abbildung der überbetrieblichen Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen dient.



**Abbildung 2:** Modellelemente und Hierarchieebenen des Modells LINK<sup>opt</sup>-JPP

Die Strukturebene des Modells differenziert Produzenten (Index  $prod$  (bzw.  $prod'$ ,  $prod''$ ), Indexmenge  $PROD$  (bzw.  $PROD'$ ,  $PROD''$ ) und Flüsse. Die einzelnen Produzenten sind durch Flüsse verbunden und entsprechen somit den Knoten der Graphenstruktur. Produzenten können Anlagen beinhalten, denen eine mögliche Prozesstätigkeit (z.B. Energieumwandlung) zugeordnet ist. Jeder Produzent ist eindeutig einem einzigen Sektor zugeordnet, sowie jede Anlage einem einzigen Produzenten (streng hierarchischer Aufbau).

Flüsse sind anhand des Quellproduzenten  $prod$ , des Zielproduzenten  $prod'$  und der transportierten bzw. übertragenen Stoff- oder Energieart (Index  $mt$ , Indexmenge  $MT$ ) eindeutig definiert. Die transportierte bzw. übertragene Stoff- bzw. Energiemenge ist Gegenstand der Systemoptimierung und wird mit der Variablen  $FL_{prod,prod',mt,t}$  ( $mt$ -Fluss von  $prod$  nach  $prod'$  in Periode  $t$ ), im Falle von Energieformen mit saisonal differenzierter Betrachtung<sup>110</sup> mit der Variablen  $FL_{prod,prod',mt,seas,t}$  ( $mt$ -Fluss von  $prod$  nach  $prod'$  in der Zeitscheibe  $seas$  der Periode  $t$ ) beschrieben. Die techno-ökonomische Parametrisierung der Flüsse umfasst

- variable Transportkosten  $Cvar_{prod,prod',mt,t}$ ,
- Flussobergrenzen  $FLMax_{prod,prod',mt,t}$  (Übertragungskapazität),
- Flussuntergrenzen  $FLMin_{prod,prod',mt,t}$  (Minstdurchleitung),
- exogen determinierte Übertragungsmengen  $FLLev_{prod,prod',mt,t}$  und
- zur Erfassung von Übertragungsverlusten den Flusswirkungsgrad  $_{prod,prod',mt,t}$ .

Anlagen (Index  $unit$ , Indexmenge  $UNIT$ ) entsprechen den Kraftwerken des abzubildenden realen Energiesystems. Die Variablen  $Cap_{unit,t}$  (installierte Kapazität einer Anlage  $unit$  in der Periode  $t$ ) und  $NewCap_{unit,t}$  (Zubau oder Kapazitätzuwachs der Anlage  $unit$  in der Periode  $t$ ) beschreiben die bestehenden und zugebauten Kapazitäten einer Anlage. Darüber hinaus dienen folgende Parameter zur Abbildung der Anlagenkapazitäten:

- $MaxCap_{unit,t}$  beschreibt die maximal zulässige, installierte Leistung einer Anlage  $unit$  in Periode  $t$  zur Begrenzung des Zubaus.
- $MinCap_{unit,t}$  stellt die minimale, installierte Leistung dar und dient zur Begrenzung des Rückbaus von Anlagen.
- $ResCap_{unit,t}$  ist die zur Verfügung stehende, gegenwärtig bereits installierte Leistung einer Anlage (berechnet auf Basis der Altersstruktur des existierenden Kraftwerksparks und dessen maximaler technischer Lebensdauer).
- $FacCap_{unit,t}$  stellt die Kapazität einer Anlage (eines Anlagenblocks) dar, dessen ganzzahliges Vielfaches zugebaut werden kann.

Weitere techno-ökonomische Parametrisierungen der Anlagen umfassen

- die fixen Leistungsausgaben  $Cfix_{unit,t}$  einer Anlage  $unit$  in Periode  $t$ ,
- für den Fall eines Anlagenzubaus die spezifischen Investitionen  $Cinv_{unit,t}$ ,
- die technische Verfügbarkeit  $Avai_{unit,t}$ ,
- minimale und maximale Volllaststunden  $VlhMin_{unit,t}$  und  $VlhMax_{unit,t}$ ,
- im Falle der Einlastung einer Anlage  $unit$  in der Zeitscheibe  $seas$  in Periode  $t$  eine exogen vorgegebene minimal anliegende Last  $MinUL_{unit}$  (unter Zuhilfenahme der binären Variablen  $Acti_{unit,seas,t}$ , die den Aktivitätszustand der Anlage darstellt, wobei 1 einem Betrieb der Anlage  $unit$  in der Zeitscheibe  $seas$  in Periode  $t$  entspricht), sowie

<sup>110</sup> Der Ausdruck „saisonale Betrachtung“ beschreibt die Differenzierung der Zeitscheiben charakteristischer Tage, wodurch zusätzlich zu den Jahreswerten systemtechnische Zusammenhänge im Modell und somit auch in den Ergebnissen entsprechend ihrer Struktur im Tagesverlauf dargestellt werden können.

- für Kernkraftwerke die nach der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000 (vgl. [BMU 2000b]) vereinbarte Reststrommenge  $Rest_{unit}$ .

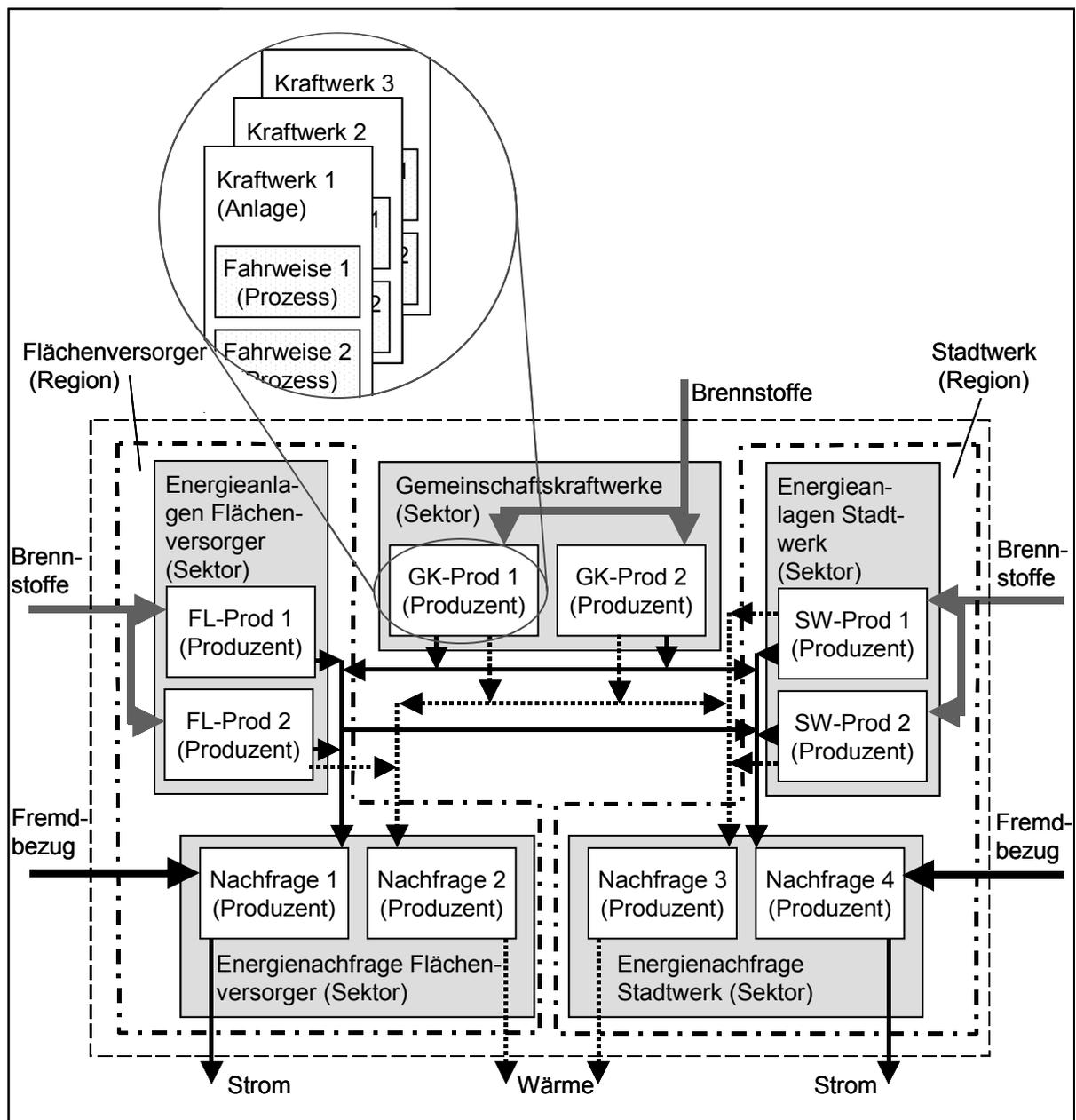
Jeder Anlage sind ein oder mehrere Prozesse zugeordnet (Index  $proc$ , Indexmenge  $PROC$ ), die der Abbildung alternativer Betriebsmodi einer installierten Anlage dienen. Sowohl die Wahl zwischen alternativ nutzbaren Prozessen als auch deren zeitliche Einlastung werden optimiert. Die Auslastung der Prozesse wird mit der Variablen  $PL_{proc,t}$  bzw. bei saisonal differenzierter Betrachtung mit der Variablen  $PL_{proc,seas,t}$  (Aktivitätsniveau eines Prozesses  $proc$  in der Zeitscheibe  $seas$  in Periode  $t$ ) beschrieben. Wesentliche Parameter zur Darstellung der Prozesse sind

- der Netto-Wirkungsgrad  $proc,t$
- die variablen Ausgaben  $Cvar_{proc,t}$
- die Anteile der verschiedenen Inputstoffe am Gesamtinput (z.B. bei Kombifeuerungen) sowie die Anteile verschiedener Energieformen am Gesamtoutput (z.B. Strom und Wärme bei Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen)  $proc,mt$  (Inputanteile werden negative, Outputanteile positive Werte zugewiesen) und
- exogene Vorgaben hinsichtlich der Prozessnutzung durch minimale oder maximale Volllaststunden,  $VlhMin_{proc,t}$  bzw.  $VlhMax_{proc,t}$ .

Abbildung 3 enthält eine vereinfachte Darstellung der Grundstruktur des Modells  $LINK^{opt}$ -JPP, die sich aus den vorab beschriebenen Grundelementen zusammensetzt.

Die Produzenten in den Sektoren Stadtwerk, Flächenversorger und Gemeinschaftskraftwerke beziehen aus den Quellen des Graphen (unterschiedliche) Brennstoffe. Ein jeder dieser Produzenten, z.B. FL-Prod 1, verfügt über verschiedene Bestandsanlagen und Zubauoptionen (welchen wiederum die entsprechenden Einsatzmöglichkeiten, d.h. die jeweiligen Prozesse hinterlegt sind). Diese Anlagen wandeln die Brennstoffe in die höheren Energieformen Strom- und/oder Wärme um.

Die Nachfrageproduzenten können aus unterschiedlichen Quellen innerhalb und außerhalb des Systems die notwendigen Energiemengen zur Deckung der Last beziehen. Die Nachfrageprozesse werden mittels detaillierter Lastkurven beschrieben, die die jährlich vorgegebene Energienachfrage auf die einzelnen Zeitscheiben umlegen. Treibende Größe des Modells ist die vom Benutzer vorgegebene und zwingend zu befriedigende Strom- und Wärmenachfrage der einzelnen Unternehmen. Im Rahmen der Systemoptimierung wird diejenige Systemstruktur und -nutzung bestimmt, die eine Befriedigung dieser exogen vorgegebenen Nachfrage bei minimalen Gesamtausgaben und unter Berücksichtigung aller gegebenen Restriktionen ermöglicht.



**Abbildung 3:** Vereinfachte Darstellung der Modell-Grundstruktur des Modells LINK<sup>opt</sup>-JPP

#### 4.4.2.2 Zielfunktion

Die Minimierung der Summe aller auf das Basisjahr diskontierten, entscheidungsrelevanten Systemausgaben (siehe Gleichung (4.1)) zur Befriedigung der exogen vorgegebenen Nachfrage bildet die Basis der Systemoptimierung im Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP. Alle in der Zielfunktion berücksichtigten Ausgaben werden vom 31. Dezember des Jahres, in dem der jeweilige Ausgabenbestandteil anfällt, auf den 1. Januar des ersten Jahres des Betrachtungszeitraumes (Basisjahr) diskontiert.

Der erste Term der Zielfunktion umfasst Ausgaben für Brennstoffe und Durchleitungsentgelte sowie sonstige flussabhängige Ausgaben. Hierunter fällt auch die bis zum Jahr 2010 erzielbare Vergütung für die Einspeisung von Strom aus Kraft-

Wärme-Kopplungs-Anlagen [KWKG-Gesetz 2002], die durch Zuweisung entsprechender negativer Werte für den Parameter  $Cvar_{prod,exp,KWK-elect,t}$  zu einer Verringerung des Zielfunktionswertes führt. Der zweite Term der Zielfunktion umfasst die variablen Ausgaben der Energieumwandlung und der dritte Term enthält die anlagenspezifischen fixen Ausgaben und Investitionen. Ausgaben durch Elektrizitätsfremdbezug von der Börse oder anderen Energieversorgungsunternehmen sowie Einnahmen aus der Elektrizitätsabgabe werden im vierten Term der Zielfunktion erfasst. Des Weiteren beinhaltet die Zielfunktion Ausgaben bzw. Einnahmen, die sich aus dem Bezug bzw. dem Verkauf von Emissionsrechten ergeben.

$$\min \sum_{t \in T} \alpha_t \cdot \left( \begin{aligned} & \left( \sum_{imp \in IMP} \sum_{mt \in MT} \sum_{prod' \in PROD'_{imp,mt}} (FL_{imp,prod',mt,t} \cdot Cfuel_{imp,prod',mt,t}) \right) \\ & + \left( \sum_{prod \in PROD} \sum_{mt \in MT} \sum_{prod' \in PROD'_{prod,mt}} (FL_{prod,prod',mt,t} \cdot Cvar_{prod,prod',mt,t}) \right) \\ & + \left( \sum_{exp \in EXP} \sum_{mt \in MT} \sum_{prod \in PROD_{exp,mt}} (FL_{prod,exp,mt,t} \cdot Cvar_{prod,exp,mt,t}) \right) \\ & + \sum_{proc \in GENPROC} (PL_{proc,t} \cdot Cvar_{proc,t}) \\ & + \sum_{unit \in UNIT} \left( \begin{aligned} & (Cap_{unit,t} \cdot Cfix_{unit,t}) \\ & + (NewCap_{unit,t} \cdot Cinv_{unit,t}) \end{aligned} \right) \\ & + \sum_{seas \in SEAS} \sum_{prod \in PROD_{demand}} \left( \begin{aligned} & (OBbase_{prod,elec,seas,t} \cdot Cobbase_{seas,t}) \\ & - (OSbase_{prod,elec,seas,t} \cdot Cosbase_{seas,t}) \\ & + (OBpeak_{prod,elec,seas,t} \cdot Cobpeak_{seas,t}) \\ & - (OSpeak_{prod,elec,seas,t} \cdot Cospeak_{seas,t}) \end{aligned} \right) \\ & + \sum_{sec \in SEC} \left( \begin{aligned} & (ERightsB_{sec,CO_2,t} \cdot Crb_{CO_2,t}) \\ & - (ERightsS_{sec,CO_2,t} \cdot Crs_{CO_2,t}) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \quad (4.1)$$

#### 4.4.2.3 Restriktionen

Mit der Integration der im Folgenden dargestellten technischen, ökologischen und ökonomischen Nebenbedingungen des Modells LINK<sup>opt</sup>-JPP wird die realitätsnahe Abbildung des betrachteten Energieversorgungssystems gewährleistet. Zentrale

Bedeutung kommt einerseits dem Umgang mit Nicht-Linearitäten zu, die für den gewählten Ansatz linear approximiert werden müssen, sowie andererseits der Wahl eines problemadäquaten Detaillierungsgrades. Hierbei ist anzumerken, dass durch die Integration ganzzahliger Variablen die Abbildung stückweise linearer Funktionen gestattet ist, wodurch gegenüber rein linearen Modellen eine Verbesserung bei der Abbildung von Nicht-Linearitäten erreicht wird. Darüber hinaus können durch ganzzahlige Variablen die einzelnen Anlagen des bestehenden Kraftwerksparks modelliert werden, was zu einer Verkleinerung der Lücke zwischen modelltechnischer Abbildung und Realität beiträgt. In diesem Zusammenhang muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass eine der hauptsächlichen Herausforderungen in der Gestaltung des Kompromisses zwischen Detaillierungsgrad und Modellgröße liegt, die durch die heutige Rechnerleistung auf einen maximal zulässigen bzw. lösbaren Umfang begrenzt wird.

#### 4.4.2.3.1 Energie- und Stoffflussbilanzgleichungen

Im Rahmen der Abbildung der Energie- und Stoffströme ist die problemadäquate Berücksichtigung der realen systemtechnischen Zusammenhänge von maßgeblicher Bedeutung. Wesentlich ist hierbei die Sicherstellung korrekter Energie- und Stoffflussbilanzen in den Produzenten, welche in Abhängigkeit der Aufgaben der unterschiedlichen Produzenten sowie der zeitlichen Differenzierung durch fünf Gleichungen abgebildet wird. Alle fünf Gleichungen basieren auf dem Grundsatz, dass sämtliche in einen Knoten eingehenden Stoff- bzw. Energiemengen abzüglich der umgewandelten bzw. verbrauchten Energie- und Stoffmengen den ausgehenden Stoff- und Energiemengen entsprechen. Somit wird entsprechend der Realität eine Speicherung von Wärme und Elektrizität für den Regelfall ausgeschlossen. Eine Sonderstellung nehmen in diesem Zusammenhang Pumpspeicherkraftwerke ein, deren modelltechnische Abbildung in Kapitel 4.4.2.3.4 beschrieben wird.

Die Gleichungen (4.2) gewährleisten für Produzenten ohne Nachfrageprozesse, dass die von den Quellen  $IMP$  des Graphen und anderen Produzenten innerhalb des Systems  $PROD_{prod,mt}$  eingehenden Stoff- bzw. Energieströme des Typs  $mt$  zuzüglich der im Produzenten  $prod$  in  $mt$  umgewandelten Stoff- bzw. Energiemengen gleich der Summe der aus dem Produzenten  $prod$  abfließenden Menge zu anderen Produzenten und/oder zu den Senken der Graphenstruktur ist. Der Verbrauch von  $mt$  in einem Produzenten, d.h. die Umwandlung von  $mt$  zu  $mt'$ , wird ebenfalls in diesen Gleichungen erfasst, indem  $_{proc,mt}$  negative Werte für in einen Knoten eingehende Stoffarten zugewiesen werden. Während die Gleichungen (4.2) die Energie- und Stoffflussbilanzen auf Jahresebene erfassen, dienen die Gleichungen (4.3) zur Gewährleistung der Energie- und Stoffflussbilanzen für Produzenten ohne Nachfrageprozesse für Stoffe bzw. Energieträger mit saisonal differenzierter Betrachtungsweise.

$$\begin{aligned}
& \sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,mt,t} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,mt}} FL_{prod',prod,mt,t} \\
& + \sum_{proc \in GENPROC_{prod,mt}} PL_{proc,t} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \\
= & \sum_{exp \in EXP} \frac{FL_{prod,exp,mt,t}}{\eta_{prod,exp,mt,t}} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,mt}} \frac{FL_{prod,prod',mt,t}}{\eta_{prod,prod',mt,t}} \\
& \forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD_{non-demand}; \quad \forall mt \in MT_{non-seas};
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,mt,t,seas} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,mt}} FL_{prod',prod,mt,t,seas} \\
& + \sum_{proc \in GENPROC_{prod,mt}} PL_{proc,t,seas} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \\
= & \sum_{exp \in EXP} \frac{FL_{prod,exp,mt,t,seas}}{\eta_{prod,exp,mt,t}} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,mt}} \frac{FL_{prod,prod',mt,t,seas}}{\eta_{prod,prod',mt,t}} \\
& \forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD_{non-demand}; \quad \forall mt \in MT_{seas}; \quad \forall seas \in SEAS;
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Die Gleichungen (4.4) beschreiben die oben dargestellten Zusammenhänge zwischen eingehenden, ausgehenden und umgewandelten Stoff-/Energienmengen auf Jahresebene für Produzenten mit Nachfrageprozessen. Zuzüglich zu den ausgehenden Stoffströmen werden im rechten Term der Gleichungen der Verbrauch des Stoffes  $mt$  in Nachfrageprozessen berücksichtigt. Analog hierzu sind die Gleichungen (4.5) aufgebaut, die, abgesehen von Elektrizität  $elec$ , für alle Stoff- und Energieströme mit saisonal differenzierter Betrachtung gelten. Zur Abbildung der Nachfrage auf saisonaler Ebene wird hierbei der Faktor  $f_{proc,t,seas}$  verwendet, der zur Aufteilung der Gesamtjahresnachfrage entsprechend der hinterlegten Lastkurve auf die einzelnen Zeitintervalle dient.

$$\begin{aligned}
& \sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,mt,t} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,mt}} FL_{prod',prod,mt,t} \\
& + \sum_{proc \in GENPROC_{prod,mt}} PL_{proc,t} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \\
= & \sum_{exp \in EXP} \frac{FL_{prod,exp,mt,t}}{\eta_{prod,exp,mt,t}} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,mt}} \frac{FL_{prod,prod',mt,t}}{\eta_{prod,prod',mt,t}} \\
& + \sum_{proc \in DEMPROC_{prod,mt}} PL_{proc,t} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \\
& \forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD_{demand}; \quad \forall mt \in MT_{non-seas};
\end{aligned} \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,mt,t,seas} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,mt}} FL_{prod',prod,mt,t,seas} \\
& + \sum_{proc \in GENPROC_{prod,mt}} PL_{proc,t,seas} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \\
= & \sum_{exp \in EXP} \frac{FL_{prod,exp,mt,t,seas}}{\eta_{prod,exp,mt,t}} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,mt}} \frac{FL_{prod,prod',mt,t,seas}}{\eta_{prod,prod',mt,t}} \\
& + \sum_{proc \in DEMPROC_{prod,mt}} PL_{proc,t} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \cdot f_{proc,t,seas} \\
& \forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD_{demand}; \quad \forall mt \in MT_{seas}; \quad \forall seas \in SEAS; \quad \neg \forall elec;
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Für Produzenten mit Nachfrageprozessen nach Elektrizität *elec* wurden die Gleichungen (4.6)<sup>111</sup> in LINK<sup>opt</sup>-JPP eingeführt. Zusätzlich zu den in den Gleichungen (4.5) erfassten Stoff- und Energieströmen sowie –umwandlungen wird in den Gleichungen (4.6) mittels der Variablen  $OBbase_{prod,elec,seas,t}$  sowie  $OBpeak_{prod,elec,seas,t}$  die Möglichkeit des Elektrizitätsfremdbezugs von der Börse und anderen Energieversorgungsunternehmen bzw. durch die Variablen  $OSbase_{prod,elec,seas,t}$  sowie  $OSpeak_{prod,elec,seas,t}$  die Stromabgabe erfasst. Die Abbildung dieser Zu- und Abflüsse ist prinzipiell auch über Flüsse von den Quellen bzw. zu den Senken des gerichteten Graphen möglich, wozu jedoch maßgeblich Änderungen des Strukturelements Flüsse notwendig sind. Um die grundlegende Strukturierung des Modells nicht unnötig durch diese Spezialfälle zu beeinträchtigen, wurde eine Abbildung des Elektrizitätsfremdbezugs sowie der Elektrizitätsabgabe an Einheiten außerhalb des betrachteten Systems mittels Variablen gewählt. Eine ausführliche Beschreibung des Strombezugs bzw. der Stromabgabe findet sich in Kapitel 4.4.2.3.5.

<sup>111</sup> Da Elektrizität aufgrund der spezifischen Nachfragestruktur grundsätzlich saisonal differenziert wird, erübrigt sich eine entsprechende Gleichung auf Jahresebene.

$$\begin{aligned}
& \sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,elec,t,seas} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,elec}} FL_{prod',prod,elec,t,seas} \\
& + \sum_{proc \in GENPROC_{prod,elec}} PL_{proc,t,seas} \cdot \frac{\lambda_{proc,elec}}{\eta_{proc,mt}} \\
& + OBbase_{prod,elec,seas,t} + OBpeak_{prod,elec,seas,t} \\
= & \sum_{exp \in EXP} \frac{FL_{prod,exp,elec,t,seas}}{\eta_{prod,exp,elec,t}} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,elec}} \frac{FL_{prod,prod',elec,t,seas}}{\eta_{prod,prod',elec,t}} \\
& + \sum_{proc \in DEMPROC_{prod,elec}} PL_{proc,t} \cdot \frac{\lambda_{proc,elec}}{\eta_{proc,elec}} \cdot f_{proc,t,seas} \\
& + OSbase_{prod,elec,seas,t} + OSpeak_{prod,elec,seas,t} \\
& \forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD_{demand}; \quad \forall seas \in SEAS;
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Hinsichtlich der Energie- und Stoffströme mit saisonal differenzierter Betrachtung ( $MT_{seas}$ ) werden im Gleichungssystem des beschriebenen Modells die jeweiligen Fluss- und Prozessvariablen zum einen auf Jahresebene, zum anderen auch auf saisonal differenzierter Ebene entsprechend der Zeitscheiben charakteristischer Tage verwendet. Die Gleichungen (4.7) gewährleisten für die Prozessnutzung, die Gleichungen (4.8) für die Flussnutzung, dass die Summe der Werte der einzelnen Zeitintervalle eines Jahres dem zugehörigen Jahreswert entspricht.

$$\sum_{seas \in SEAS} PL_{proc,t,seas} = PL_{proc,t} \tag{4.7}$$

$\forall t \in T; \quad \forall proc \in PROC;$

$$\sum_{seas \in SEAS} FL_{prod,prod',mt,t,seas} = FL_{prod,prod',mt,t} \tag{4.8}$$

$\forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD; \quad \forall prod' \in PROD'; \quad \forall mt \in MT;$

#### 4.4.2.3.2 Kapazitätsrestriktionen

Die Optimierung der Kapazitätsentwicklung stellt einen wichtigen Bestandteil der mit dem beschriebenen Modell durchgeführten Systemoptimierung dar. Für alle Anlagen  $unit$  gilt, dass sich die in einer Periode  $t$  installierte Kapazität  $Cap_{unit,t}$  aus dem Kapazitätsbestand  $ResCap_{unit,t}$  und sämtlichen Kapazitätserweiterungen  $NewCap_{unit,t}$ , die bis einschließlich der betrachteten Periode durchgeführt wurden, zusammensetzt (siehe Gleichungen (4.9)). Für die Kapazitätserweiterungen stellen des Weiteren die Gleichungen (4.10) sicher, dass lediglich der Zubau des ganzzahligen Vielfachen einer vorgegebenen Anlagen(-block-)größe  $FacCap_{unit,t}$  zulässig ist.

$$Cap_{unit,t} = ResCap_{unit,t} + \sum_{t'=(t-TLT_{unit})}^t NewCap_{unit,t'} \quad (4.9)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T;$$

$$NewCap_{unit,t} = FacCap_{unit,t} \cdot NCap_{unit,t} \quad (4.10)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T;$$

Im Rahmen der Optimierung der Kapazitätsentwicklung werden im beschriebenen Modell Bestandsanlagen und Zubauoptionen differenziert. Diese Unterscheidung wirkt sich in erster Linie auf die Verwendung der Bestandsparameter  $ResCap_{unit,t}$  und  $MaxCap_{unit,t}$  aus.

$ResCap_{unit,t}$  dient zur Festlegung der in einer Periode zur Verfügung stehenden installierten Kapazität einer Anlage. Im Regelfall handelt es sich hierbei um Anlagen, die vor dem Betrachtungszeitraum errichtet wurden, deren Zubauentscheidung also nicht mehr Gegenstand der Optimierung ist, weshalb für diese Anlagen keine Investitionen im Modell berücksichtigt werden. Solche Anlagen werden aufgrund bekannter Stilllegungsentscheidungen des Anlagenbetreibers oder nach Ablauf einer auf Basis des Errichtungszeitpunkts angenommenen technischen Lebensdauer stillgelegt. Demgegenüber wird der maximal zulässige Ausbau einer bestehenden Anlage bzw. Zubau einer Neuanlage in Periode  $t$  durch den Parameter  $MaxCap_{unit,t}$  festgelegt.

Werden  $ResCap_{unit,t}$  und  $MaxCap_{unit,t}$  identische Werte zugewiesen, ist für eine bestehende Anlage eine Kapazitätserweiterung ausgeschlossen. Weist  $MaxCap_{unit,t}$  einen höheren Wert als  $ResCap_{unit,t}$  auf, ist ein auf die Differenz zwischen diesen Parametern begrenzter Zubau im Rahmen der Optimierung zulässig (solange die Differenz mindestens dem dem Parameter  $FacCap_{unit,t}$  zugewiesenen Wert entspricht). Im Regelfall ist für Bestandsanlagen ( $MaxCap_{unit,t} = ResCap_{unit,t}$ ), für Zubauoptionen ( $ResCap_{unit,t} = 0$ ) gesetzt.

Neben der Kapazitätserweiterung wird auch der mögliche Rückbau von Bestandsanlagen vor Erreichen des Endes ihrer technischen Lebensdauer in LINK<sup>opt</sup>-JPP optimiert. Die Einhaltung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Konvention ( $MaxCap_{unit,t} = ResCap_{unit,t}$ ) ist hierfür zwingend notwendig, da der optimierbare Rückbau über folgenden Kunstgriff modelliert ist: Sämtlichen Bestandsanlagen, deren verbleibende technische Lebensdauer mittels der Bestandsparameter  $MaxCap_{unit,t}$  und  $ResCap_{unit,t}$  abgebildet ist, werden spezifische Investitionen von Null zugeordnet sowie eine fiktive technische Lebensdauer von einer Periode für Ersatzinvestitionen. Bestandsanlagen, für die ( $MaxCap_{unit,t} = ResCap_{unit,t} > 0$ ) gilt, werden somit grundsätzlich am Ende einer Betrachtungsperiode stillgelegt, können jedoch ohne Investitionen wieder für die Folgeperiode errichtet werden. Diese fiktive Ersatzinvestition unterbleibt (bzw. es wird lediglich ein Teil der installierten Kapazität für die Folgeperiode wieder bereitgestellt), sobald der

Weiterbetrieb einer Anlage aus ökonomischen Gründen nicht sinnvoll ist. Mit Hilfe der Ungleichungen (4.11) wird nun sichergestellt, dass eine einmal (teilweise) rückgebaute Anlage in den Folgeperioden mit maximal der Kapazität genutzt werden kann, auf die sie mit der Rückbauteilscheidung reduziert wurde.

$$\left( ResCap_{unit,t} + \sum_{t' > (t-LLT_{unit})}^t NewCap_{unit,t'} \right) \geq \left( ResCap_{unit,[t+1]} + \sum_{t' > ([t+1]-LLT_{unit})}^{[t+1]} NewCap_{unit,t'} \right) \quad (4.11)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in \{T \mid MaxCap_{unit,[t+1]} \leq MaxCap_{unit,t}\};$$

Im Rahmen der Szenarioanalysen können für die beiden wesentlichen Kapazitätsvariablen  $Cap_{unit,t}$ , die die im Jahr  $t$  installierte Gesamtkapazität einer Anlage  $unit$  beschreibt, und  $NewCap_{unit,t}$ , die den Anlagenzubau erfasst, Begrenzungen festgelegt werden.  $MinCap_{unit,t}$  gewährleistet hinsichtlich der installierten Gesamtkapazität  $Cap_{unit,t}$  einen minimalen Anlagenbestand,  $MaxCap_{unit,t}$  stellt die bereits erwähnte Kapazitätsobergrenze dar. Der Kapazitätzzubau  $NewCap_{unit,t}$  kann durch Vorgabe eines maximal in einer Periode  $t$  zulässigen Kapazitätzzuwachses  $MaxAdd_{unit,t}$  beschränkt werden. Diese Nebenbedingungen sind in dem hier beschriebenen Modell nicht als eigene Gleichungen, sondern über Variablenbounds implementiert, die in der Programmiersprache GAMS direkt gesetzt werden können.

Zusätzliche Restriktionen bezüglich der Kapazitätsentwicklung einzelner Technologien oder eines ganzen Kraftwerksparks können aus systemtechnischen Sachzwängen resultieren. Besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der Vorhaltung von Reservekapazität zu, die zur Gewährleistung wichtiger Systemdienstleistungen wie der Frequenzstützung dient. Da im hier betrachteten Anwendungsfall jedoch lediglich ein Teil des deutschen bzw. europäischen Kraftwerksparks abgebildet wird, ist eine umfassende Analyse der notwendigen Reservekapazitäten des gesamten Energieversorgungssystems nicht möglich. In LINK<sup>opt</sup>-JPP kann dieser Aspekt zum einen durch die Forderung eines Sicherheitsaufschlags bezüglich der Kapazitäten und zum anderen durch die Vorgabe der Verfügbarkeit einer Anlage im Gleichungssystem berücksichtigt werden (siehe hierzu auch die Ungleichungen (4.13) und (4.14) in Kapitel 4.4.2.3.3).

Die Verfügbarkeit der Anlage wird im Rahmen des beschriebenen Modellansatzes als deterministische Rahmenbedingung formuliert (vgl. auch [Ortjohann 1989, S. 54]). Werden keine weiteren Restriktionen vorgegeben, kann die Verfügbarkeit einer Anlage von kleiner eins ausgeglichen werden, indem die Anlage um den Kehrwert des vorgegebenen Anteils größer ausgelegt bzw. bei Betrachtung einzelner Anlagen die nächst größere Standardkapazität installiert wird.

Zur Vorgabe eines Sicherheitsaufschlags wird ein Reservefaktor  $Reserve$  definiert. Die Ungleichungen (4.12) fordern, dass die installierte Leistung gesichert zur Verfügung stehender Anlagen zu jedem Zeitpunkt die kumulierte Last in einer

Region<sup>112</sup> um den Faktor  $(1 + Reserve)$  übersteigt. Für jede Anlage kann vorgegeben werden, ob der Output aus dieser Anlage gesichert zur Verfügung steht, sodass Stromerzeugungskapazitäten auf Basis fluktuierender Primärenergieträger in dieser Ungleichung nicht berücksichtigt werden.

$$\frac{(1 + Reserve)}{h_{seas}} \cdot \left( \sum_{proc \in DEMPROC_{reg,elec}} PL_{proc,seas,t} \cdot \Omega_{proc,t} \right) \leq \sum_{unit \in GENUIT_{reg}} (Cap_{unit,t} \cdot Avai_{unit,t}) \quad (4.12)$$

$$\forall seas \in SEAS; \quad \forall t \in T; \quad \forall reg \in REG;$$

#### 4.4.2.3 Anlagenfahrweisen

Jegliche Prozesstätigkeit wird durch die installierte Kapazität sowie die angenommene durchschnittliche Verfügbarkeit  $Avai_{unit,t}$  der entsprechenden Anlage beschränkt. Dieser Zusammenhang wird für Prozesse ohne saisonal differenzierte Betrachtungsweise durch die Ungleichungen (4.13) sichergestellt, die Ungleichungen (4.14) gewährleisten Analoges für Prozesse mit saisonaler Differenzierung.

$$Cap_{unit,t} \cdot Avai_{unit,t} \cdot h_{year} \geq \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,t} \cdot \Omega_{proc,t}) \quad (4.13)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

$$Cap_{unit,t} \cdot Avai_{unit,t} \cdot h_{seas} \geq \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,seas,t} \cdot \Omega_{proc,t}) \quad (4.14)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT; \quad \forall seas \in SEAS;$$

Des Weiteren lässt sich die Nutzung der Anlagen als auch der Prozesse durch die Vorgabe minimaler und/oder maximaler Volllaststunden begrenzen. Im Folgenden werden die Ungleichungen für die Volllaststundenvorgaben auf Anlagenebene dargestellt. Des Weiteren existieren im Modell entsprechende Ungleichungen zur Vorgabe minimaler und/oder maximaler Volllaststunden auf Prozessebene.

Die Ungleichungen (4.15) stellen auf Jahresebene sicher, dass im Fall der Vorgabe maximaler Volllaststunden die Jahresarbeit aller einer Anlage zugehörigen Prozesse den definierten Anteil der theoretisch möglichen Jahresarbeit auf Basis der installierten Leistung nicht übersteigt. Eine Unterschreitung bei Vorgabe minimaler Volllaststunden wird entsprechend mittels der Ungleichungen (4.16) ausgeschlossen.

<sup>112</sup> Im hier betrachteten Anwendungsbeispiel entsprechen die Regionen den einzelnen Energieversorgungsunternehmen, für die sich der Sicherheitsaufschlag auf ca. 5 bis 10 % der Last bemisst (vgl. [Röthig 1997, S. 10]).

$$\frac{VlhMax_{unit,t}}{h_{year}} \cdot Cap_{unit,t} \geq \sum_{proc \in PROC_{unit}} PL_{proc,t} \cdot \Omega_{proc,t} \quad (4.15)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T;$$

$$\frac{VlhMin_{unit,t}}{h_{year}} \cdot Cap_{unit,t} \leq \sum_{proc \in PROC_{unit}} PL_{proc,t} \cdot \Omega_{proc,t} \quad (4.16)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T;$$

Zur detaillierteren Betrachtung der Anlagenfahrweisen wurde neben der Vorgabe von maximalen bzw. minimalen Volllaststunden auf Jahresebene in LINK<sup>opt</sup>-JPP die Möglichkeit zur Vorgabe einer Volllaststundenbegrenzung für einzelne Jahreszeiten *temp* integriert. Insbesondere die Auswirkungen geplanter Stillstände von Anlagen aufgrund notwendiger Revisionen können hierdurch in den Analysen besser erfasst werden. Analog zu den beiden vorangegangenen Ungleichungen stellen die Ungleichungen (4.17) und (4.18) sicher, dass die Summe sämtlicher Prozess-tätigkeiten einer Anlage in allen der Jahreszeit *temp* zugeordneten Zeitscheiben *SEAS<sub>temp</sub>*, die vorgegebenen Volllaststunden nicht über- bzw. unterschreiten.

$$\frac{VlhMax_{unit,temp,t}}{h_{temp}} \cdot Cap_{unit,t} \geq \sum_{seas \in SEAS_{temp}} \sum_{proc \in PROC_{unit}} PL_{proc,t} \cdot \Omega_{proc,t} \quad (4.17)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T; \quad \forall seas \in SEAS_{temp};$$

$$\frac{VlhMin_{unit,temp,t}}{h_{temp}} \cdot Cap_{unit,t} \leq \sum_{seas \in SEAS_{temp}} \sum_{proc \in PROC_{unit}} PL_{proc,t} \cdot \Omega_{proc,t} \quad (4.18)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T; \quad \forall seas \in SEAS_{temp};$$

Aufgrund des gewählten linearen Ansatzes des Modells LINK<sup>opt</sup>-JPP ist der Wirkungsgrad eines Prozesses bzw. einer Anlage für sämtliche Auslastungsgrade als Konstante abgebildet. Da dies jedoch abhängig von der Anlagentechnologie und deren Teillastverhalten nur bedingt den Verhältnissen der Realität entspricht, wurde für Anlagen mit schlechtem Teillastverhalten, d.h. einem deutlich verschlechterten Wirkungsgrad bei Teillast, der Parameter *MinUL<sub>unit</sub>* zur Vorgabe einer minimalen Leistung einer Anlage eingeführt.

Mittels der Ungleichungen (4.19) wird gewährleistet, dass das Produkt aus Aktivitätszustand *Acti<sub>unit,seas,t</sub>*, Anlagen(-block-)größe *FacCap<sub>unit,t</sub>*, Dauer der Zeitscheibe *h<sub>seas</sub>* und vorgegebener Mindestlast *MinUL<sub>unit</sub>* geringer ist als die in dieser Zeitscheibe verrichtete Arbeit aller der Anlage zugeordneten Prozesse. Den binären Variablen

Aktivitätszustand  $Acti_{unit,seas,t}$ , wird durch die Ungleichungen (4.20) der Wert eins zugewiesen, sobald eine Prozesstätigkeit in einer Anlage stattfindet (hierzu muss dem Parameter  $M$  ein Wert zugewiesen werden, der die maximal verrichtbare Arbeit einer Anlage in allen Zeitscheiben überschreitet)<sup>113</sup>.

$$FacCap_{unit,t} \cdot MinUL_{unit} \cdot Acti_{unit,seas,t} \cdot h_{seas} \leq \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,seas,t} \cdot \Omega_{proc,t}) \quad (4.19)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT; \quad \forall seas \in SEAS;$$

$$Acti_{unit,seas,t} \cdot M \geq \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,seas,t} \cdot \Omega_{proc,t}) \quad (4.20)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT; \quad \forall seas \in SEAS;$$

Ähnlich wie auch hinsichtlich des Teillastverhaltens weisen Strom- und Wärme-erzeugungsanlagen deutliche Unterschiede bezüglich ihrer Laständerungs-geschwindigkeit auf. Beispielsweise ist eine kurzfristige und insbesondere häufigere Drosselung bei vielen Grundlastkraftwerkstechnologien wie Kernkraftwerken oder Braunkohlekraftwerken im Regelfall nicht möglich. Aufgrund der fehlenden groß-technischen Speicherbarkeit von Strom ist zur Sicherstellung der Nachfrage-befriedigung jedoch ein exaktes Nachfahren der stochastischen Einflüssen unterworfenen Gesamtlast zwingend notwendig. Hierzu werden so genannte Spitzen- und Mittellastanlagen wie Gasturbinen bzw. gasbefeuerte GuD-Anlagen sowie mit Einschränkungen bestimmte Steinkohlekraftwerke eingesetzt.

Die Gleichungen (4.21) beschreiben einen Ansatz<sup>114</sup> zur Abbildung der Lastcharakteristika für Grundlastanlagen, für die eine Lastvariation weitgehend ausgeschlossen werden kann bzw. soll: es wird gefordert, dass die Leistung, mit der eine bestimmte Anlage in einer bestimmten Betriebsweise (Prozess) gefahren wird, innerhalb einer Jahreszeit konstant gehalten wird.

$$\frac{PL_{proc,seas,t}}{h_{seas}} = \frac{PL_{proc,temp,t}}{h_{temp}} \quad (4.21)$$

$$\forall proc \in BASEPROC; \quad \forall seas \in SEAS_{temp}; \quad \forall temp \in TEMP;$$

<sup>113</sup> Zu einer ausführlichen Beschreibung der Integration logischer Restriktionen für Nebenbedingungen vgl. [Kallrath et al. 1997, S. 184 ff.].

<sup>114</sup> [Fichtner 1999] bildet diese Zusammenhänge mittels der Laständerungsgeschwindigkeiten einzelner Anlagen ab, [Enzensberger 2003] verwendet unterschiedliche Laständerungskosten für die jeweiligen Anlagentypen.

Aus den politischen Zielvorgaben des Kernenergieausstiegs ergibt sich die Notwendigkeit, die aus Kernkraftwerken noch zu produzierende Strommenge zu begrenzen. Die Ungleichungen (4.22) gewährleisten, dass die von Kernkraftwerken produzierte Strommenge den auf Basis der vom Gesetzgeber vorgegebenen Reststrommengen und der produzierten Strommenge vor dem Betrachtungszeit errechneten Wert  $Rest_{unit}$  nicht überschreiten.

$$\sum_{t \in T} \sum_{proc \in PROC_{unit}} PL_{proc,t} \cdot \lambda_{proc,elec} \cdot years_t \leq Rest_{unit} \quad (4.22)$$

$\forall unit \in UNIT_{nuc};$

Eine weitere Restriktion hinsichtlich der Anlagenfahrweisen ergibt sich aus dem Umstand, dass im Rahmen der Analysen die Kraftwerksparks zweier Energieversorgungsunternehmen im Modell abgebildet werden. Um zu verhindern, dass die Energienachfrage des einen Unternehmens größtenteils bzw. vollständig von Anlagen des anderen Unternehmens befriedigt wird, wurden die Ungleichungen (4.23) integriert. Diese gewährleisten, dass ein vom Benutzer vorgegebener Mindestanteil der Eigenerzeugung eines Unternehmens  $MinSelf_{reg,t,mt}$  nicht unterschritten wird. Diese Ungleichungen ermöglichen somit auch die Analyse unterschiedlicher Strategien der Unternehmen in einzelnen Szenarios, indem der Wert der angestrebten Eigenerzeugung variiert wird und somit die Auswirkungen unterschiedlicher Eigenerzeugungsanteile auf die Entwicklung des Energieversorgungssystems nachvollzogen werden können.

$$\sum_{proc \in GENPROC_{reg,elec}} PL_{proc,t} \cdot \lambda_{proc,mt} \geq Dem_{reg,mt,t} \cdot MinSelf_{reg,mt,t} \quad (4.23)$$

$\forall t \in T; \quad \forall reg \in REG; \quad \forall prod \in PROD_{demand};$

#### 4.4.2.3.4 Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke treten im realen Versorgungssystem sowohl als Stromerzeuger als auch als Nachfrager auf, wobei diese Doppelrolle durch die Speicherfunktion dieser Anlagen in direktem Zusammenhang steht. Als Nachfrager von Elektrizität dienen Pumpspeicherkraftwerke zur Umwandlung kostengünstig bezogenen Grundlaststroms zu höherwertigem Spitzenlaststrom. Im Rahmen der Stromerzeugung stellen sie aufgrund ihrer schnellen Regelbarkeit und insbesondere ihrer kurzen Anfahrzeiten wichtige Systemdienstleistungen wie Reservekapazitäten bereit.

In der Realität stellen das Pumpen und Turbinieren in den Pumpspeicherkraftwerken die unterschiedlichen Betriebsmodi einer Anlage dar. Aufgrund der im Modell

gewählten Graphenstruktur ist eine künstliche Trennung dieser beiden Funktionen in zwei fiktive Anlagenteile notwendig. Der fiktive Anlagenteil „Turbine“ ist als Kraftwerksanlage einem Erzeugungsproduzenten zugeordnet und wird aus den Quellen der Graphenstruktur mit dem Stoffstrom „gespeichertes Wasser“ gespeist. Der zugehörige zweite fiktive Anlagenteil „Pumpe“ ist als Stromnachfrager bei den Verbrauchern angesiedelt und „pumpt“ Wasser in eine Senke des Graphen (fiktiver Speicher außerhalb der Systemgrenzen). Die beiden fiktiven Anlagenteile werden durch Zuordnung der die Anlagenteile enthaltenden Produzenten in der Tabelle  $PMAP$  zugeordnet. Mittels der Gleichungen (4.24) wird nun gewährleistet, dass die Jahreswerte des in die Graphensenke geleiteten Speicherwassers mit den Jahreswerten des aus den Graphenquellen bezogenen Speicherwassers übereinstimmen.

$$\sum_{exp \in EXP} FL_{prod', exp, to-storage, t} = \sum_{imp \in IMP} FL_{imp, prod, from-storage, t} \quad (4.24)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall (prod; prod') \in PMAP_{PROD, PROD'}$$

#### 4.4.2.3.5 Strombezug/Stromabgabe

Neben der Kapazitätsentwicklung und der Anlagenfahrweise werden auch die Elektrizitätsabgabe an Einheiten außerhalb des Systems (Börse, andere Energieversorgungsunternehmen) und der Elektrizitätsfremdbezug von solchen Einheiten optimiert. Im Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP sind hierzu Möglichkeiten zum Stromaustausch im Grund- und Mittellastbereich integriert worden.

Grundlaststrom wird als kontinuierliches 24-Stundenband bezogen bzw. abgegeben. Die Gleichungen (4.25) stellen die Kontinuität für den Elektrizitätsbezug  $OBbase_{prod, elec, base, t}$  im Zeitraum  $base$ , die Gleichungen (4.26) für die Elektrizitätsabgabe  $OSbase_{prod, elec, base, t}$  sicher, indem das Verhältnis aus Gesamtbezug bzw. -abgabe zur Gesamtdauer des Austauschs  $h_{base}$  (24 Stunden) dem Verhältnis aus Strombezug  $OBbase_{prod, elec, seas, t}$  bzw. -abgabe  $OSbase_{prod, elec, seas, t}$  in einer Zeitscheibe  $seas$  zu deren Dauer  $h_{seas}$  entsprechen muss<sup>115</sup>. Mittellaststrom wird ebenfalls als kontinuierliches Stundenband bezogen bzw. abgegeben, wobei zwischen 8.00 Uhr und 20.00 Uhr ausgeliefert wird. Da Beginn und Ende des Auslieferungszeitraums nicht notwendigerweise mit dem Beginn bzw. dem Ende der entsprechenden Zeitscheiben übereinstimmen, wurde in die, ansonsten mit den Gleichungen für den Stromaustausch von Grundlaststrom identischen, Gleichungen (4.27) für den Bezug sowie Gleichungen (4.28) für die Abgabe von Mittellaststrom zusätzlich der Faktor  $p_{seas}$  integriert. Diesem Parameter wird für jede Zeitscheibe  $seas$  ein Wert

<sup>115</sup> Die Abbildung des Strombezugs und der Stromabgabe durch zwei positive Variablen anstelle einer freien Variablen ist aufgrund der hierbei unterschiedlichen spezifischen Einnahmen bzw. Ausgaben notwendig (vgl. hierzu auch Kapitel 4.5.5).

zugewiesen, der dem Anteil der Dauer des in diese Zeitscheibe fallenden Peakzeitraums im Verhältnis zur Gesamtdauer der Zeitscheibe entspricht<sup>116</sup>.

$$\frac{OBbase_{prod,elec,base,t}}{h_{base}} = \frac{OBbase_{prod,elec,seas,t}}{h_{seas}} \quad (4.25)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall seas \in SEAS_{base}; \quad \forall base \in BASE; \quad \forall prod \in PROD_{demand};$$

$$\frac{OSbase_{prod,elec,base,t}}{h_{base}} = \frac{OSbase_{prod,elec,seas,t}}{h_{seas}} \quad (4.26)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall seas \in SEAS_{base}; \quad \forall base \in BASE; \quad \forall prod \in PROD_{demand};$$

$$\frac{OBpeak_{prod,elec,peak,t}}{h_{peak}} = \frac{OBpeak_{prod,elec,seas,t}}{h_{seas}} \cdot p_{seas} \quad (4.27)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall seas \in SEAS_{peak}; \quad \forall peak \in PEAK; \quad \forall prod \in PROD_{demand};$$

$$\frac{OSpeak_{prod,elec,peak,t}}{h_{peak}} = \frac{OSpeak_{prod,elec,seas,t}}{h_{seas}} \cdot p_{seas} \quad (4.28)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall seas \in SEAS_{peak}; \quad \forall peak \in PEAK; \quad \forall prod \in PROD_{demand};$$

Um den Stromaustausch mit Einheiten außerhalb des betrachteten Systems zu begrenzen, wurden die Ungleichungen (4.29) in das beschriebene Modell integriert. Durch Vorgabe eines maximal zulässigen Gesamtstromaustauschs  $MaxO_{reg,elec,seas,t}$  für jede Region  $reg$  (entsprechend den abgebildeten Unternehmen) und jede Zeitscheibe  $seas$  wird so u.a. verhindert, dass bei niedrigem Strompreis die Nachfrage zu unrealistisch großen Teilen über Fremdbezug gedeckt wird, bzw. dass bei hohem Strompreis Kapazitäten primär aufgrund der Möglichkeit der Stromabgabe zugebaut werden.

<sup>116</sup> Mittels der Gleichungen (4.27) und (4.28) können des Weiteren sämtliche an der EEX gehandelten Blöcke abgebildet werden, indem entsprechende Zeiträume und Faktoren im Modell hinterlegt werden (vgl. hierzu auch [Tietze-Stöckinger et al. 2004e]). Aufgrund der Problematik der langfristigen Prognose der Strompreise an der EEX wurde auf die Abbildung aller handelbaren Blöcke in LINK<sup>opt</sup>-JPP jedoch verzichtet.

$$\sum_{prod \in PROD_{reg}} \left( OBbase_{prod,elec,seas,t} + OBpeak_{prod,elec,seas,t} + OSbase_{prod,elec,seas,t} + OSpeak_{prod,elec,seas,t} \right) \leq MaxO_{reg,elec,seas,t} \quad (4.29)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall seas \in SEAS; \quad \forall prod \in PROD_{demand}; \quad \forall reg \in REG;$$

#### 4.4.2.3.6 Emissionsrechtezuteilung

Neben der Abbildung des Strombezugs und der Stromabgabe an der Börse ist eine der wesentlichen Neuerungen im hier beschriebenen Gleichungssystem die Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels auf Unternehmensebene. Die Gleichungen (4.30a) gewährleisten, dass die in einem Sektor *sec* (Unternehmen) vorgehaltenen Emissionsrechte  $ERights_{sec,CO_2,t}$  mindestens den in diesem Sektor emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen (siehe Gleichungen (4.31)) entsprechen müssen. In den Gleichungen (4.30b) ist diese sektorale Trennung aufgehoben, sodass die Bedingung lediglich aussagt, dass sämtliche anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen niedriger sein müssen, als die von allen betrachteten Unternehmen vorgehaltenen Emissionsrechte. Somit wird durch die Gleichungen (4.30b) eine betriebsübergreifende Zusammenarbeit im Bereich des Emissionsrechtehandels ermöglicht.

$$ERights_{sec,CO_2,t} = \sum_{unit \in UNIT_{sec}} Em_{unit,CO_2,t} \quad (4.30a)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall sec \in SEC;$$

$$\sum_{sec \in SEC} ERights_{sec,CO_2,t} = \sum_{unit \in UNIT} Em_{unit,CO_2,t} \quad (4.30b)$$

$$\forall t \in T;$$

$$Em_{unit,CO_2,t} = \sum_{proc \in PROC_{unit}} PL_{proc,t} \cdot ProcEmiss_{CO_2,proc,t} \quad (4.31)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

Die CO<sub>2</sub>-Emissionsrechte  $ERights_{sec,CO_2,t}$  eines Sektors *sec* setzen sich zusammen aus den für alle in diesem Sektor befindlichen Anlagen zugeteilten Emissionsrechten  $ERights_{unit,CO_2,t}$  und den vom Markt bezogenen Emissionsrechten  $ERightsB_{sec,CO_2,t}$  abzüglich der am Markt verkauften Emissionsrechte  $ERightsS_{sec,CO_2,t}$  (Gleichungen (4.32)). Durch eine Beschränkung der vom Markt beziehbaren Emissionsrechte kann eine Emissionsminderung im betrachteten System erzwungen werden, d.h. dass in diesem Fall die Emissionen im System nicht (nur) aufgrund ökonomischer Vorteile, sondern aufgrund einer Beschränkung der maximal zulässigen CO<sub>2</sub>-Emissionen gemindert werden. Im Gegensatz zu einer direkten Beschränkung der zulässigen

CO<sub>2</sub>-Emissionen wird mittels dieser Vorgehensweise lediglich gefordert, dass die Emissionen entsprechend den Vorgaben des nationalen Allokationsplans verringert werden, während durch die direkte Emissionsbeschränkung eine über diese Vorgaben hinausgehende Emissionsminderung festgeschrieben werden kann.

$$ERights_{sec,CO_2,t} = \left( \begin{array}{l} \sum_{unit \in UNIT_{sec}} (ERights_{unit,CO_2,t}) \\ + ERightsB_{sec,CO_2,t} \\ - ERightsS_{sec,t,CO_2,t} \end{array} \right) \quad (4.32)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall sec \in SEC;$$

Hinsichtlich der Emissionsrechte für Energieumwandlungsanlagen werden im Gesetz über den nationalen Zuteilungsplan für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 bis 2007 [ZuG 2007] folgende Grundregeln unterschieden:

- Zuteilung für bestehende Anlagen auf Basis historischer Emissionen: Anlagen, die vor 2003 in Betrieb genommen wurden, erhalten Berechtigungen in einer Anzahl, die dem Produkt der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Basisperiode (2000 bis 2002), dem Erfüllungsfaktor und der Dauer der Zuteilungsperiode entspricht. In Abhängigkeit der tatsächlichen Emissionen in der Zuteilungsperiode wird die Zuteilungsmenge verringert, wenn das Produktionsniveau unter 60 % der Basisperiode fällt, bzw. erhöht, wenn das Emissionsniveau der Zuteilungsperiode das der Basisperiode aufgrund besonderer Umstände (beispielsweise Wartung) um 20 % übersteigt.
- Zuteilung für bestehende Anlagen auf Basis angemeldeter Emissionen: Die Zuteilung der Emissionsrechte für Anlagen, die in den Jahren 2003 und 2004 in Betrieb genommen wurden, entspricht dem Produkt der angemeldeten durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Dauer der Zuteilungsperiode. Ein Erfüllungsfaktor soll die ersten zwölf Jahre keine Anwendung finden. Da diese Regelung nur auf sehr wenige Anlagen angewendet werden kann, wird sie im Modell nicht berücksichtigt. Anlagen dieses Typs werden wie zusätzliche Neuanlagen behandelt.
- Einstellung des Betriebes von Anlagen: Emissionsrechte stillgelegter Anlagen werden widerrufen bzw. in der folgenden Periode nicht mehr ausgegeben, sofern sie nicht auf Neuanlagen übertragen werden.
- Zuteilung für Neuanlagen als Ersatzanlagen: Die Rechte stillgelegter Anlagen können für vier Jahre auf Neuanlagen übertragen werden, die innerhalb von drei Monaten nach Stilllegung der alten Anlage in Betrieb genommen werden. Die Übertragung der Rechte kann auf mehrere Anlagen verteilt werden, bzw. die Rechte mehrerer stillgelegter Anlagen auf eine oder mehrere Anlagen übertragen werden. Maßgeblich ist hierbei das Kapazitätsverhältnis zwischen

stillgelegten und neuen Anlagen. Übersteigen die stillgelegten Kapazitäten die neu installierten Kapazitäten, so werden die übertragbaren Rechte proportional verringert. Im gegensätzlichen Fall können für die zusätzlichen Kapazitäten neuer Anlagen Rechte nach dem Zuteilungsschema für zusätzliche Neuanlagen beantragt werden. Nach vier Jahren werden für diese Anlagen Emissionsrechte auf der Basis historischer Emissionen in der nach dem jeweils gültigen Zuteilungsgesetz zugrunde zu legenden Basisperiode ausgegeben, wobei 14 Jahre lang kein Erfüllungsfaktor angewendet wird.

- Zuteilung für zusätzliche Neuanlagen: Neuanlagen erhalten Zertifikate in der Höhe des Produkts aus der zu erwartenden durchschnittlichen jährlichen Produktionsmenge, dem Emissionswert der Anlage sowie der Dauer des Betriebs in der jeweiligen Periode. Ist eine Bestimmung eines Emissionswerts je Produkteinheit nicht möglich, da in der Anlage unterschiedliche Produkte hergestellt werden, bemisst sich die Zuteilung nach den zu erwartenden jährlichen Emissionen bei Anwendung der besten verfügbaren Technik. Die Zuteilungsregel für zusätzliche Neuanlagen gilt für die ersten 14 Betriebsjahre einer Anlage. Auf Antrag des Anlagenbetreibers kann diese Regel auch auf bestehende Anlagen angewendet werden.

Darüber hinaus sind besondere Zuteilungsregeln für frühzeitige Emissionsminderungen, prozessbedingte Emissionen, Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung und die Einstellung des Betriebs von Kernkraftwerken vorgesehen. Von diesen Sonderregeln wird im Modell lediglich die Sonderzuteilung für KWK-Strom berücksichtigt, da frühzeitige Emissionsminderungen vor dem Betrachtungszeitraum im Modell nicht nachzuvollziehen sind, prozessbedingte Emissionen von untergeordneter Bedeutung sind und die Sonderzuteilung für die Einstellung des Betriebs von Kernkraftwerken vorerst nur für im Zeitraum zwischen den Jahren 2003 und 2007 stillgelegte Kernkraftwerke gilt.

Die Emissionsrechte von Anlagen  $ERights_{unit,CO_2,t}$  setzen sich im Modell somit aus Rechten bestehender Anlagen  $ERightsHP_{unit,CO_2,t}$ , Sonderrechten für KWK-Strom  $ERightsSA_{unit,CO_2,t}$ , übertragenen Rechten  $ERightsTP_{unit,CO_2,t}$  und Rechten für zusätzliche Neuanlagen  $ERightsAP_{unit,CO_2,t}$  zusammen (Gleichungen (4.33)).

$$ERights_{unit,CO_2,t} = \begin{pmatrix} ERightsHP_{unit,CO_2,t} \\ +ERightsSA_{unit,CO_2,t} \\ +ERightsTP_{unit,CO_2,t} \\ +ERightsAP_{unit,CO_2,t} \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

Die Emissionsrechte bestehender Anlagen auf Basis historischer Emissionen  $ERightsHP_{unit,CO_2,t}$  werden im Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP durch die Multiplikation des Quotienten aus den Emissionen  $EBP_{unit,CO_2}$  und der Produktionsmenge der

Basisperiode  $PLBP_{unit}$  mit der Produktionsmenge der betrachteten Periode und dem Erfüllungsfaktor  $ff_{unit,t}$  der Anlage in der betrachteten Periode berechnet (Ungleichungen (4.34)). Mittels der Ungleichungen (4.35) wird ausgeschlossen, dass eine im Vergleich zur Basisperiode erhöhte Anzahl von Emissionsrechten zugeteilt wird, da dies nur für ausgewiesene Sonderfälle zulässig ist.

Diese vereinfachte Umsetzung der Zuteilungsregel auf der Basis historischer Emissionen erlaubt die Berücksichtigung der Reduktion der Zuteilung in Abhängigkeit der tatsächlichen Emissionen der Zuteilungsperiode, wobei auf eine detailliertere Abbildung der Zuteilung bei Reduktion der Produktionsmenge verzichtet wurde. Dies ist zwar prinzipiell im Rahmen des vorgestellten Modells möglich, jedoch müssten zur Berücksichtigung dieser Details zusätzliche binäre Variablen eingeführt werden, mit denen eine deutliche Komplexitätserhöhung und damit auch eine Erhöhung der Rechenzeit des Modells einhergeht.

$$ERightsHP_{unit,CO_2,t} \leq \frac{EBP_{unit,CO_2}}{PLBP_{unit}} \cdot \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,t}) \cdot ff_{unit,t} \quad (4.34)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

$$ERightsHP_{unit,CO_2,t} \leq EBP_{unit,CO_2} \cdot PLBP_{unit} \cdot ff_{unit,t} \quad (4.35)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

Die Sonderzuteilung für Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung  $ERightsSA_{unit,CO_2,t}$  bemisst sich nach dem Produkt der KWK-Nettostromerzeugung einer Periode und 27 Tonnen Kohlendioxidäquivalent je Gigawattstunde KWK-Nettostrom ( $\lambda_{proc,KWK-elec}$  entspricht dem Anteil der KWK-Nettostromerzeugung eines Prozesses).

$$ERightsSA_{unit,CO_2,t} \leq 27t \text{ CO}_2 - \text{Äquivalente} / \text{GWH} \cdot \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,t} \cdot \lambda_{proc,KWK-elec}) \quad (4.36)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

Zur Ermittlung der in einer Periode übertragbaren Rechte  $ERightsTP_{sec,CO_2,t}$  werden die Emissionen der Basisperiode von in der betrachteten Periode stillgelegten Anlagen aufsummiert. Da die Emissionsrechte stillgelegter Anlagen lediglich im Verhältnis der neuen zu den stillgelegten Kapazitäten übertragen werden können, müssen im Falle eines Überschreitens der stillgelegten Kapazitäten die übertragbaren Rechte entsprechend verringert werden (Gleichungen (4.37)). Hierzu wird die Variable  $\Delta CapDec_{sec,t}$  eingeführt, der – solange die stillgelegten Kapazitäten die der Neuinstallationen in dieser Periode übersteigen – die Höhe der Differenz zwischen den Kapazitäten zugewiesen wird (Gleichungen (4.38)). Der Faktor  $EmCap_{t,CO_2}$  stellt

einen durchschnittlichen Emissionsfaktor pro stillgelegtem Megawatt Leistung dar. Durch die Ungleichungen (4.39) wird gewährleistet, dass die Anzahl der übertragbaren Rechte größer ist als die Summe der auf die einzelnen Anlagen übertragenen Rechte  $ERightsTP_{unit,CO_2,t}$ . Die Ungleichungen (4.40) dienen der Gewährleistung, dass Rechte stillgelegter Anlagen nur auf Anlagen übertragen werden können, die in der betrachteten Periode errichtet werden.

$$\sum_{sec \in SEC} ERightsTP_{sec,CO_2,t} = \left( \begin{array}{l} \sum_{unit \in UNIT_{dec}} (EBP_{unit,CO_2} \cdot PLBP_{unit} \cdot ff_{unit,t}) \\ - \sum_{sec \in SEC} (\Delta CapDec_{sec,t}) \cdot EmCap_{CO_2,t} \end{array} \right) \quad (4.37)$$

$$\forall t \in T;$$

$$\sum_{unit \in UNIT_{sec}} (Cap_{unit,t-1}) - \sum_{unit \in UNIT_{sec}} (Cap_{unit,t}) + \Delta CapNew_{sec,t} = \Delta CapDec_{sec,t} \quad (4.38)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall sec \in SEC;$$

$$\sum_{sec \in SEC} ERightsTP_{sec,CO_2,t} \geq \sum_{unit \in UNIT} ERightsTP_{unit,CO_2,t} \quad (4.39)$$

$$\forall t \in T;$$

$$ERightsTP_{unit,CO_2,t} \leq NCap_{unit,t} \cdot M \quad (4.40)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

Die Emissionsrechte für zusätzliche Neuanlagen  $ErighsAP_{unit,CO_2,t}$  werden ermittelt, indem die in einer Neuanlage produzierte Energiemenge mit dem spezifischen Emissionswert  $EmBM_{unit,mt,t}$  für diesen Output der Anlage multipliziert wird (Ungleichungen (4.41)). Dieser Zusammenhang wird als Ungleichung multipliziert, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die Emissionsrechte einer zugebauten Anlage sich aus übertragenen Rechten und Emissionsrechten für zusätzliche Neuanlagen zusammensetzen können. Da hierfür ebenfalls das Kapazitätsverhältnis die Höhe der jeweiligen Rechte bestimmt, wird durch die Ungleichungen (4.42) ein Abgleich der Kapazität einer Neuanlage mit den jeweiligen Quotienten aus Emissionsrechten für zusätzliche Neuanlagen bzw. übertragenen Rechten und einem durchschnittlichen Emissionsfaktor pro Megawatt installierter Leistung durchgeführt.

Gegenüber den Vorgaben des Allokationsplans existieren somit folgende Unterschiede bei der Abbildung der Übertragung stillgelegter Anlagen: Zum einen werden im Anschluss an die Übertragung der Rechte stillgelegter Anlagen die Emissionsrechte nicht auf der Basis historischer Emissionen sondern auf der Basis der Regel für zusätzliche Neuanlagen zugeteilt. Dies wurde angenommen, da einerseits die zugrunde zu legenden Basisperioden bisher nicht bekannt sind und

andererseits diese Zusammenhänge nur durch nichtlineare Gleichungen exakt abgebildet werden können. Eine weitere Vereinfachung betrifft die Dauer der Übertragung, die im Modell mit der Dauer der Periode (in der Regel fünf Jahre) übereinstimmt.

$$ERightsAP_{unit,CO_2,t} \leq \sum_{mt \in MT} \left( EmBM_{unit,mt,t} \cdot \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,t} \cdot \lambda_{proc,mt}) \right) \quad (4.41)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

$$NCap_{unit,t} \cdot FacCap_{unit,t} \geq \frac{ERightsTP_{unit,CO_2,t}}{EmCap_{CO_2,t}} + \frac{ERightsAP_{unit,CO_2,t}}{EmCap_{unit,CO_2,t}} \quad (4.42)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

Während übertragene und neue Rechte sowie Rechte auf der Basis historischer Emissionen und Sonderrechte für KWK gleichzeitig für eine Anlage beantragt werden können, schließen sich diese beiden Paare jeweils gegenseitig aus. Zur Abbildung dieses Zusammenhangs in LINK<sup>opt</sup>-JPP wird die binäre Hilfsvariable  $Al_{unit}$  eingeführt, wodurch lediglich eines dieser Paare einen Wert größer Null besitzen kann (Ungleichungen (4.43) und (4.44)).

$$\left( \begin{array}{l} ERightsHP_{unit,CO_2,t} \\ +ERightsSA_{unit,CO_2,t} \end{array} \right) \leq Al_{unit} \cdot M \quad (4.43)$$

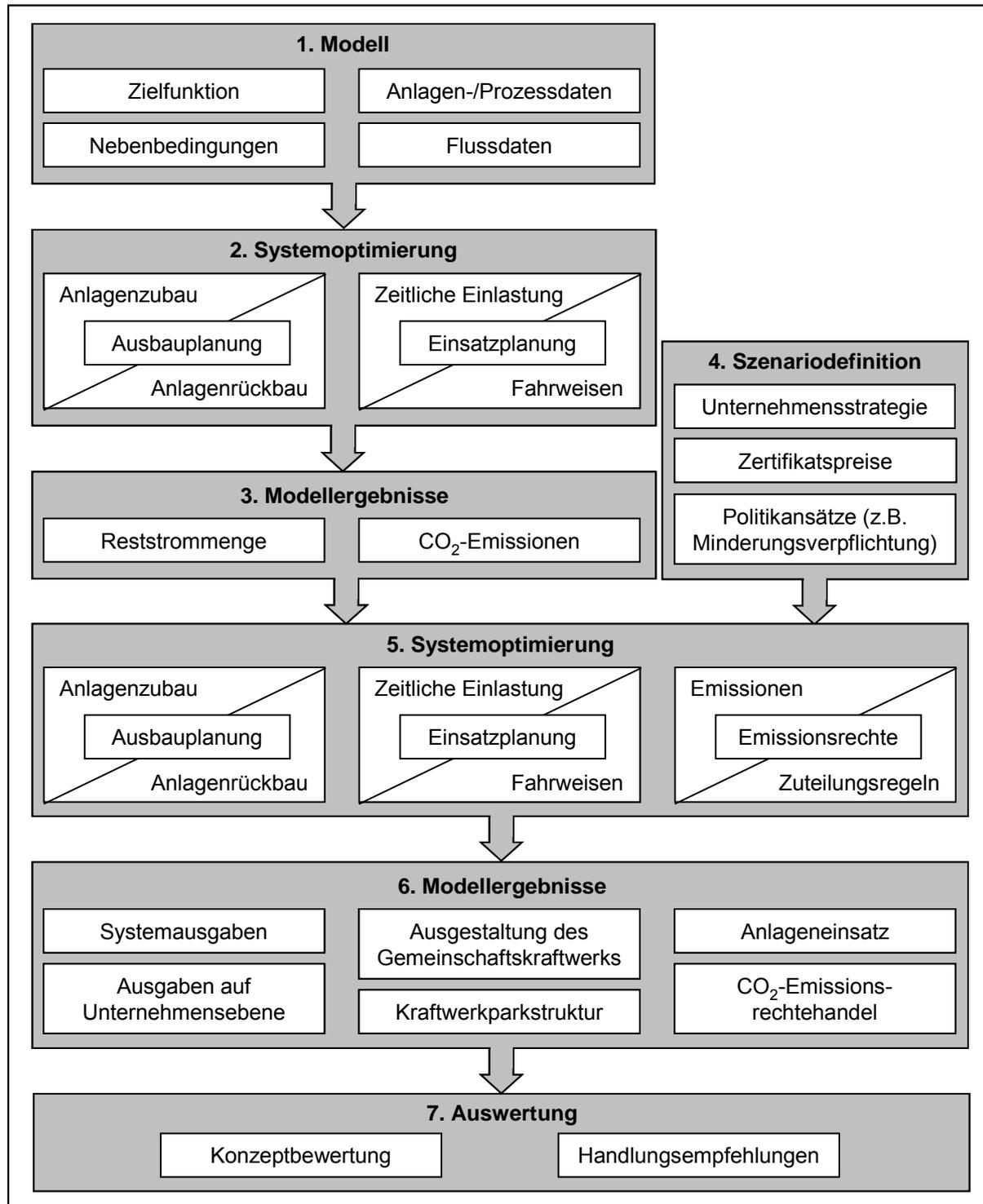
$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

$$\left( \begin{array}{l} ERightsTP_{unit,CO_2,t} \\ +ERightsAP_{unit,CO_2,t} \end{array} \right) \leq (1 - Al_{unit}) \cdot M \quad (4.44)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

#### 4.4.3 Modelleinsatz im Rahmen einer Szenarioanalyse

LINK<sup>opt</sup>-JPP dient zum einen der Bewertung der ökonomischen Potenziale einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks und zum anderen zur Quantifizierung der Auswirkungen sich ändernder Rahmenbedingungen sowohl auf die Kooperation als auch auf die einzelnen Unternehmen (vgl. Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Ablaufschritte der Szenarioanalyse mit LINK<sup>opt</sup>-JPP

Die Zielfunktion und Nebenbedingungen, die datenseitige Systembeschreibung (Anlagen-, Prozess- und Flussdaten) sowie die hinterlegten Allokationsregeln determinieren dabei das Grundmodell. Vor der eigentlichen Systemoptimierung für den Betrachtungshorizont ab dem Jahr 2005 wird eine vorgelagerte Systemoptimierung für den Betrachtungshorizont 2000 bis 2004 durchgeführt. Ziel dieser vorgelagerten Optimierung ist die Ermittlung der

- für den nachstehenden Betrachtungszeitraum noch zur Verfügung stehenden Reststrommenge der Kernkraftwerke sowie der
- durchschnittlichen Emissionen und Produktionsmengen in der Basisperiode 2000 bis 2002 für die Zuteilung der Emissionsrechte auf der Basis historischer Emissionen<sup>117</sup>.

Diese Ergebnisse gehen neben möglichen Parametervariationen oder der Deaktivierung ausgewählter Nebenbedingungen im Rahmen unterschiedlicher Szenarios in die zweite, maßgebliche Systemoptimierung ein. Die Energiesystemoptimierung ermittelt dann für die verschiedenen Rahmenbedingungen die optimale Lösung bezogen auf die ausgabenminimale Deckung der exogen vorgegebenen Nachfrage. Durch eine Gegenüberstellung der Modellergebnisse der unterschiedlichen Szenarios können Ausgabenveränderungen und Struktur- anpassungen in Abhängigkeit der variierten Parameter bzw. deaktivierten Neben- bedingungen erfasst werden.

**Tabelle 15:** Analyseoptionen des Modells LINK<sup>opt</sup>-JPP<sup>118</sup>

Themenbereich	Modellergebnis
Ausgestaltung und Einsatz des Gemeinschafts- heizkraftwerks	Wahl des Kraftwerktyps (Primärenergieträger)
	Umfang und Zeitpunkt des Zubaus
	zeitliche Einlastung und Fahrweise
	Produktionsmenge je Unternehmen
	CO <sub>2</sub> -Emissionen je Unternehmen
	Herkunft der für dieses Kraftwerk vorgehaltenen Emissionsrechte
Kraftwerkspark- struktur	Umfang und Zeitpunkt des Zubaus und der Stilllegung von Kraftwerken
	Entwicklung der Kapazitätsanteile verschiedener Energieträger am Gesamtkraftwerksbestand
Anlageneinsatz	zeitliche Einlastung unterschiedlicher Anlagen
	Fahrweisen der Anlagen in jedem Zeitintervall
	Anteil bestimmter Anlagen(-typen) an der Gesamterzeugung (z.B. nach Energieträgern getrennt)
CO <sub>2</sub> -Emissions- rechthehandel	CO <sub>2</sub> -Emissionen je Anlage
	Auswahl der Allokationsregel(n) für jede Anlage
	Kauf und Verkauf von Emissionsrechten

Die Ergebnisse der Systemoptimierung für den Betrachtungszeitraum ab 2005 stellen die Grundlage für die ökonomische Bewertung einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks dar (vgl. Tabelle 15).

<sup>117</sup> Zu den Gründen für diese Trennung vgl. Kapitel 4.5.8.2.

<sup>118</sup> Die Ergebnisse bezüglich der Ausgestaltung und des Einsatzes eines Gemeinschaftsheiz- kraftwerks stellen größtenteils eine Teilmenge der weiteren aufgelisteten Ergebnisse dar. Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für diese Arbeit werden sie in Tabelle 15 jedoch separat aufgeführt.

Jedoch sind die Ergebnisse nicht auf diesen Aspekt des analysierten Energiesystems beschränkt, sondern beinhalten ebenfalls allgemeine strukturelle Anpassungen des Kraftwerksparks sowie die Ausgabenentwicklung der betrachteten Unternehmen.

#### **4.4.4 Kritische Reflexion der gewählten Methodik**

Durch die Wahl eines bestimmten methodischen Ansatzes werden bereits wichtige Modelleigenschaften determiniert. Somit ist eine kritische Reflexion dieser im Vorfeld bzw. im Verlauf der Modellentwicklung getroffenen Entscheidungen unerlässlich. Insbesondere ist eine kritische Auseinandersetzung bezüglich der im Modell implizit getroffenen Annahmen erforderlich. Wichtige Aspekte in diesem Zusammenhang betreffen

- das zugrundegelegte Akteursverhalten,
- die Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen im Modell und
- den Einfluss der vom Modellentwickler gesetzten Systemgrenzen auf die Modellergebnisse.

##### **4.4.4.1 Zugrundegelegtes Akteursverhalten**

Aus der unternehmensübergreifenden Minimierung der entscheidungsrelevanten Systemausgaben der Planungsbereiche Systemausbauplanung, Anlageneinsatzplanung und CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel ergeben sich wichtige Konsequenzen bezüglich des angenommenen Verhaltens der Akteure. Während in anderen Modellen diese Optimierungsprobleme häufig getrennt betrachtet werden, erlaubt die integrierte Betrachtung mit LINK<sup>opt</sup>-JPP die Berücksichtigung gegenseitiger Einflüsse. So werden durch die Systemausbauplanung der Anlagenzubau bzw. deren Stilllegung festgelegt und dadurch auch die der Einsatzplanung zur Verfügung stehenden Anlagen. Die im Rahmen der Anlageneinsatzplanung optimierte Einlastung der unterschiedlichen Anlagen determiniert wiederum die freigesetzten Emissionen, was sich direkt auf die Anzahl zu beziehender bzw. zu verkaufender Emissionsrechte auswirkt. Eine Emissionsminderung ist wiederum neben einer veränderten Prozessnutzung durch Ersatzinvestitionen zur Substitution von emissionsintensiven Altanlagen durch effiziente Neuinstallationen möglich. Somit ermöglicht nur eine integrierte Betrachtung der drei interdependenten Planungsaspekte die Sicherstellung einer optimalen Lösung. Diese Integration wird mit der beschriebenen Zielfunktion durch eine Summierung der jeweils relevanten Ausgaben aus allen drei Planungsbereichen erreicht.

Durch die Minimierung der entscheidungsrelevanten Systemausgaben über die einzelnen Unternehmensgrenzen hinweg werden die Systemgrenzen erweitert, wodurch betriebsübergreifende Optimallösungen ermittelt werden können. Dennoch müssen wichtige unternehmensspezifische Unterschiede wie abweichende Brennstoffbezugsmöglichkeiten und Subventionen adäquat berücksichtigt werden<sup>119</sup>. Den einzelnen Akteuren wird im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse ein

---

<sup>119</sup> Beispielsweise ist die Förderung von Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung anlagenspezifisch.

rationales Verhalten unterstellt, d.h. dass alle Maßnahmen, die zu einer Verringerung des Zielfunktionswertes führen, umgesetzt werden. Ein Abgleich mit der Realität zeigt allerdings, dass die Annahme eines solchen Verhaltens eine Idealisierung darstellt, da die einzelnen Akteure nicht nur auf der Basis „ökonomischer“ Kriterien entscheiden<sup>120</sup>. Eine Operationalisierung dieser nicht-monetären Kriterien und somit auch eine Integration in Modelle zur Entscheidungsunterstützung gestalten sich jedoch schwierig.

#### **4.4.4.2 Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen im Modell**

Maßgeblicher Vorteil der dem Modell zugrunde gelegten Methodik der gemischt-ganzzahligen Optimierung ist darin zu sehen, dass zur Bestimmung relaxierter Lösungen<sup>121</sup> mit den verschiedenen Varianten des Simplex-Verfahrens exakte Lösungsverfahren verfügbar sind. Diese gewährleisten die Identifikation der optimalen Lösung und erleichtern damit auch wesentlich die Lösung des gemischt-ganzzahligen Problems. Darüber hinaus erlaubt die Abbildung stückweise linearer Funktionen eine hinreichend genaue Modellierung nicht-linearer Zusammenhänge, was zu einer deutlichen Steigerung der Ergebnisqualität gegenüber rein linearen Modellen führt.

Ein grundsätzliches Problem linearer Optimiermodelle ist der so genannte Bang-Bang-Effekt. Dies bedeutet, dass kleine Variationen der Eingangsparameter extreme Veränderungen der Modellergebnisse hervorrufen können. Grund hierfür ist, dass von zwei substituierbaren Alternativen stets diejenige ausgewählt wird, die im Vergleich zur anderen Alternative zu einem niedrigeren Zielfunktionswert führt. Ein typisches Beispiel in linearen Optimiermodellen ist eine Situation, in der die Stromgestehungskosten zweier substituierbarer Technologien in einem bestimmten Lastbereich nur geringfügig voneinander abweichen. Werden nun die Energieträgerpreise derart variiert, dass sich die absoluten Kosten nur geringfügig verändern, sich die relative Vorteilhaftigkeit der beiden Technologien jedoch umkehrt, resultieren Fälle, in denen in zwei Szenarios vollkommen unterschiedliche Investitionsentscheidungen getroffen werden, obwohl sich die jeweiligen Zielfunktionswerte der Szenarios lediglich geringfügig unterscheiden.

Im Rahmen der hier analysierten Fallstudie könnte aufgrund des beschriebenen Effekts somit nach einer altersbedingten Stilllegung bestehender Anlagen ein Kraftwerkspark resultieren, der von einer einzigen Energieumwandlungstechnologie dominiert wird, bzw. in dem das Stadtwerk seinen vollständigen Energiebedarf aus einer Gemeinschaftslösung bezieht. Ein solches Ergebnis steht im Widerspruch zu einer praxisgerechten Entscheidungsunterstützung, da Energieversorgungsunternehmen u.a. aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Rahmenbedingungen in der Regel auf eine ausgewogene Kraftwerksparkstruktur zielen. Ein wichtiger Grund hierfür sind die mit dem Zubau von Kraftwerken verbundenen hohen Investitionen. Zubauentscheidungen, die sich aufgrund veränderter Rahmen-

---

<sup>120</sup> Vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 2.5 und die Diskussion bezüglich der Implementierungsbarrieren in den Fallstudien in Kapitel 6.

<sup>121</sup> Ohne Ganzzahligkeitsbedingung.

bedingungen zu einem späteren Zeitpunkt als Fehlentscheidung erweisen, führen deshalb zu hohen Verlusten. Eine solche Änderung der Rahmenbedingungen kann u.a. eine Brennstoffpreisentwicklung oder Energiepolitik darstellen, die stark von der zum Planungszeitpunkt antizipierten Entwicklung abweicht.

Das Problem des Bang-Bang-Effekts kann auf verschiedene Arten reduziert werden. Aufgrund der detaillierten Abbildung wichtiger technischer Zusammenhänge wie z.B. dem Laständerungsverhalten sowie der Hinterlegung nach Energieformen und Unternehmen bzw. Regionen differenzierter Lastkurven entstehen in LINK<sup>opt</sup>-JPP Lastbereiche, in denen nur noch eine reduzierte Zahl relevanter Anlagen im Wettbewerb zueinander stehen. Darüber hinaus wurden die einzelnen Technologien in Abhängigkeit der Anlagengröße durch eine Vielzahl von Parametern abgebildet, sodass sich in Verbindung mit der Vorgabe einer Mindestlast auch innerhalb der einzelnen Lastbereiche die Zahl der relevanten Anlagen reduziert. Der Einsatz von LINK<sup>opt</sup>-JPP ergibt deshalb in der Regel einen Anlagenpark, der im Vergleich zu höher aggregierten Modellen stärker diversifiziert ist.

Des Weiteren können für den Fall politisch gesetzter oder anderer exogen motivierter Beschränkungen einer freien Optimierung durch zusätzliche Restriktionen unplausible Ergebnisse ausgeschlossen werden. Dies betrifft u.a. den politisch bedingten Rückbau von Kernkraftwerken oder die Einschränkung des Zubaus von Technologien, deren Einsatz aufgrund realer Gegebenheiten begrenzt ist (z.B. im Falle von Wasserkraft oder anderen regenerativen Energieträgern). Allerdings muss bei dieser Vorgehensweise berücksichtigt werden, dass hierdurch der Lösungsraum weiter eingeschränkt wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung des Bang-Bang-Effekts liegt in der Integration von Unsicherheiten in den methodischen Ansatz im Rahmen einer stochastischen Programmierung (vgl. [Göbelt 2001]). Jedoch ist bei einer betriebsübergreifenden Betrachtung die Quantifizierung der hierzu benötigten Parameter (z.B. Standardabweichung, Erwartungswert, Risikopräferenzen) aufgrund unterschiedlicher Einschätzungen und Erwartungen der einzelnen Akteure problematisch. Ein zusätzliches Problem im Rahmen der stochastischen Erweiterung gemischt-ganzzahliger linearer Modelle liegt in einer deutlichen Erhöhung der Modellgröße, da zur Modellierung der Verzweigungen des Entscheidungsbaums binäre Variablen benötigt werden. Infolgedessen wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die modelltechnische Integration stochastischer Einflüsse verzichtet und diese durch geeignete Variation der Eingangsparameter im Rahmen von Szenarioanalysen berücksichtigt.

Die technologische Diversifikation der Modellergebnisse der Energiesystemanalyse kann mit Hilfe der dargestellten Modellierungsalternativen unterstützt werden. Eine vollständige Vermeidung des generellen Problems der linearen Optimierung, dass die identifizierten Ergebnisse stark auf einzelnen Alternativen basieren, ist jedoch nicht möglich. Dementsprechend ist hinsichtlich der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass diese als Richtungsvorgaben für die zukünftige Entwicklung des analysierten Energiesystems unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu interpretieren sind. Im Rahmen von Szenarioanalysen kann durch eine vergleichende Auswertung der

Modellergebnisse für unterschiedliche Rahmenbedingungen eine belastbare Zukunftsstrategie abgeleitet werden.

#### **4.4.4.3 Systemgrenzen**

Eine der wesentlichen Grenzen des hier beschriebenen Modells liegt in der fehlenden Berücksichtigung von intersektoralen Interdependenzen. Darüber hinaus wird durch die Fokussierung auf ausgewählte Unternehmen der Energiewirtschaft die Analyse auf ein Teilgebiet dieses Sektors begrenzt. Demgegenüber hängt die Stromnachfrage eines Energieversorgungsunternehmens in der Realität sowohl von der makroökonomischen Entwicklung als auch von den Strompreisen aller Anbieter auf diesem Markt ab. Eine Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten ist mit dem hier vorgestellten Modell nicht möglich, dagegen wird die unterstellte Stromnachfrage exogen vorgegeben. Der Stromaustausch mit anderen Energieversorgungsunternehmen kann jedoch frei optimiert werden. Allerdings wird auch hier die Rückkopplung zwischen der von den betrachteten Energieversorgungsunternehmen angebotenen bzw. nachgefragten Strommenge und dem sich einstellenden Marktpreis nicht erfasst. Der Marktpreis geht stattdessen als Parameter in die Analysen ein. Analoges gilt auch für die Preise der CO<sub>2</sub>-Emissionsrechte. Hierbei muss insbesondere die Grundlage der Zertifikatpreisermittlung im Rahmen der Ergebnisbewertung berücksichtigt werden. In der Regel werden die Zertifikatpreise in höher aggregierten Modellen durch die Vorgabe von Emissionsminderungszielen ermittelt. Andererseits ist die Emissionsminderung im Rahmen von LINK<sup>opt</sup>-JPP Gegenstand der Optimierung, weshalb hier zu hinterfragen ist, inwieweit die bei der Zertifikatpreisermittlung vorgegebene Emissionsminderung in Übereinstimmung mit der von LINK<sup>opt</sup>-JPP ermittelten Emissionsminderung steht.

Eine Berücksichtigung der beschriebenen Wechselwirkungen ist nur durch eine Modellerweiterung auf das gesamteuropäische Energiesystem bzw. einer zusätzlichen Abbildung der verschiedenen Industrie- und Nachfragesektoren möglich. Hierzu muss jedoch der Detaillierungsgrad der Abbildung deutlich verringert werden, wodurch zum einen der wesentliche Vorteil eines technologie-fokussierten Bottom-Up-Modells aufgehoben würde. Zum anderen steht dies der Zielsetzung der Modellentwicklung entgegen, die techno-ökonomischen Auswirkungen einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks auf ein begrenztes System zu analysieren. Für die betrachteten Unternehmen stellt insbesondere die Nachvollziehbarkeit der hieraus resultierenden Veränderungen auf Unternehmensebene eine zentrale Anforderung dar.

Höher aggregierte Modelle können sowohl bei der Ableitung relevanter Szenarios als auch bei der Festsetzung der exogen vorzugebenden Parameter wertvollen Input liefern. Im Gegenzug lässt sich mit Hilfe von Bottom-Up-Modellen analysieren, wie sich Veränderungen der Rahmenbedingungen im Detail auswirken. Als Beispiel sei hier der Einfluss des nationalen Allokationsplans angeführt, da dessen anlagen-scharfe Betrachtung im Rahmen der höher aggregierten Modelle in der Regel nicht möglich ist. Somit können wiederum die Ergebnisse dieser Modellgruppe wichtigen Input für Modelle auf höherem Aggregationsniveau bereitstellen.

## 4.5 Modellaufbau und verwendete Datenbasis

Das im vorangegangenen Kapitel dargelegte mathematische Gleichungssystem determiniert die grundsätzliche Struktur des entwickelten Modells. Im Rahmen dieses Kapitels wird die spezifische Datengrundlage des gewählten Anwendungsbeispiels erläutert. Hierzu werden die Kraftwerksparks der beiden betrachteten Unternehmen sowie weitere techno-ökonomische Charakteristika des zu analysierenden Energiesystems dargestellt. Darüber hinaus wird auf die modelltechnische Umsetzung der realen Zusammenhänge eingegangen. Preisangaben sind stets als reale Preise mit Bezugsjahr 2000 zu verstehen.

Die technischen und ökonomischen Daten basieren, soweit nicht anders gekennzeichnet, auf einer am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) gepflegten Datenbank mit generischen Daten zu Energieumwandlungstechnologien. Diese wurde auf Basis von [IEA 1998b] und [GEMIS 2002] sowie zahlreicher weiterer Fachpublikationen und Expertengesprächen kontinuierlich aktualisiert.

### 4.5.1 Kurzvorstellung der Unternehmen

Bevor die Datenbasis der beiden betrachteten Unternehmen dargestellt wird, soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei um fiktive Unternehmen handelt. Eventuelle Übereinstimmungen mit realen Unternehmen sind zufällig und nicht bewusst in die Analysen integriert worden.

#### 4.5.1.1 Flächenversorger

In Deutschland existieren derzeit vier Flächenversorger<sup>122</sup>, weshalb der Beispiel-Flächenversorger mit einem Viertel der in Deutschland derzeit installierten Kraftwerkskapazitäten ca. ein Viertel der Gesamtdeutschen Stromnachfrage befriedigen muss. Des Weiteren speist der Beispiel-Flächenversorger in fünf Fernwärmegebiete Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen ein (ca. 2,6 TWh<sub>therm</sub>). Darüber hinaus wurde bei der Zusammenstellung der Daten darauf geachtet, dass die Größenzusammensetzung der Kraftwerke sowie der Primärenergieträgermix den Verhältnissen Gesamtdeutschlands entsprechen (siehe Tabelle 16 und Tabelle 17).

---

<sup>122</sup> RWE AG, E.ON Energie AG, ENBW AG und Vattenfall AG

**Tabelle 16:** Stromnachfrage und Kraftwerkskapazitäten von Deutschland und des Beispiel-Flächenversorgers (nach [VDEW 2004a] und [VDEW 2004b])

	Beispiel-Flächenversorger	Deutschland	Anteil des Beispiel-Flächenversorgers an der öffentlichen Versorgung in Deutschland
<b>Stromnachfrage (2003)</b>	121 TWh	501 TWh	24 %
<b>Kraftwerkskapazitäten (2002)</b>	23.200 MW <sub>elektr</sub>	100.400 MW <sub>elektr</sub>	23 %
<b>davon</b>			
Kernkraftwerke	4.900 MW <sub>elektr</sub>	21.200 MW <sub>elektr</sub>	23 %
Braunkohlekraftwerke	3.900 MW <sub>elektr</sub>	18.800 MW <sub>elektr</sub>	21 %
Steinkohlekraftwerke	5.600 MW <sub>elektr</sub>	24.800 MW <sub>elektr</sub>	23 %
Gaskraftwerke	4.600 MW <sub>elektr</sub>	16.300 MW <sub>elektr</sub>	28 %
sonstige Kraftwerke (z.B. Wasserkraft, Öl)	4.200 MW <sub>elektr</sub>	19.200 MW <sub>elektr</sub>	22 %

Tabelle 17 enthält die in den Analysen verwendeten Revisionsdauern. Im Modell werden die Revisionen durch das Herabsetzen der maximalen Volllaststunden in einem entsprechenden Zeitraum abgebildet (siehe auch Kapitel 4.4.2.3.3). Aufgrund des primären Einsatzes von gasbefeuerten Anlagen zur Deckung von Spitzenlast und damit niedrigen Volllaststunden dieser Anlagen, werden die Revisionen von Spitzenlastkraftwerken hierdurch nicht erfasst. Nicht zur Verfügung stehende Kapazitäten solcher Anlagen werden stattdessen mittels der Herabsetzung des Parameters Verfügbarkeit berücksichtigt.

**Tabelle 17:** Ausgewählte technische Charakteristika der Bestandsanlagen des Flächenversorgers<sup>123</sup>

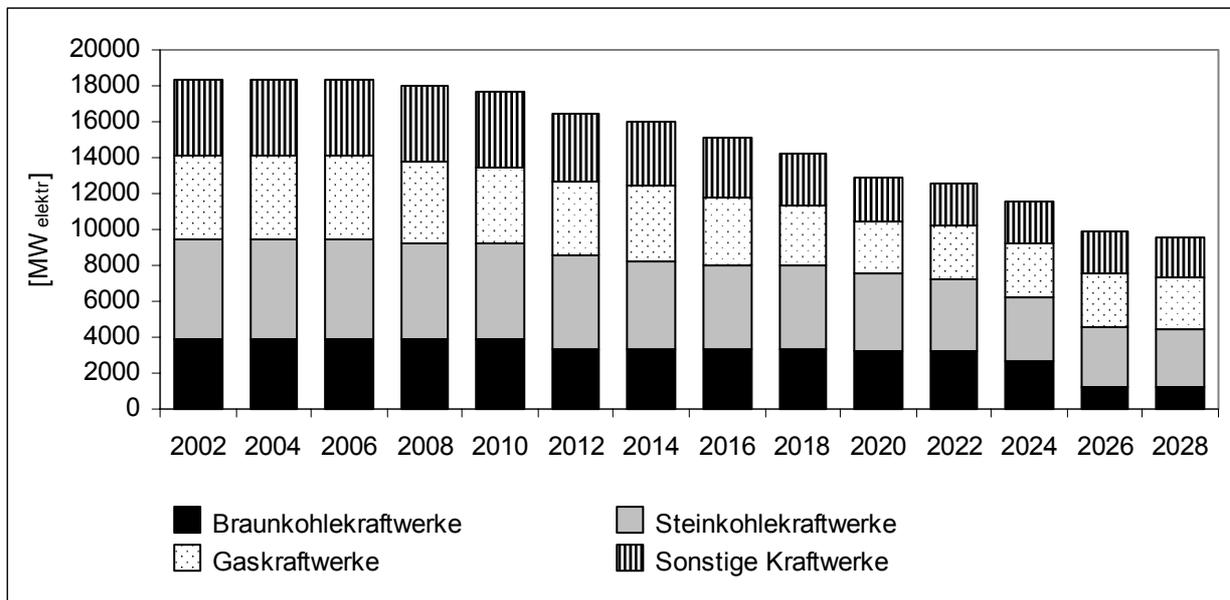
	Anlagengrößen	Netto-Wirkungsgrade (elektrisch)	Revisionsdauer
Kernkraftwerke	950 bis 1500 MW <sub>elektr</sub>	35 bis 38 %	6 Wochen
Braunkohlekraftwerke	500 bis 1200 MW <sub>elektr</sub>	33 bis 36 %	4 Wochen
Steinkohlekraftwerke	100 bis 700 MW <sub>elektr</sub>	34 bis 42 %	2 bis 3 Wochen
Gaskraftwerke	200 bis 600 MW <sub>elektr</sub>	34 bis 52 %	---

Auch bezüglich der technischen Lebensdauergrenzen der Kraftwerke spiegelt der beispielhafte Flächenversorger die gesamtdeutsche Situation wider<sup>124</sup>: Bis zum

<sup>123</sup> Die im Modell hinterlegte Parametrisierung der Anlagen weist einen wesentlich höheren Differenzierungsgrad bzw. weitere Charakteristika auf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine vollständige Darstellung sämtlicher Parameter allerdings verzichtet. Siehe hierzu auch Kapitel 4.4.2.1 und Kapitel 4.5.3 (hier insbesondere Tabelle 21).

<sup>124</sup> Zur Entwicklung der deutschen Kraftwerkskapazitäten vgl. [Pffaffenberger et al. 2004].

Betrachtungsende der Analyse im Jahre 2027 erreichen ca. 55 % der zur Verfügung stehenden Kapazitäten ihre technische Lebensdauergrenze (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Sterbelinien der Kraftwerke des Flächenversorgers<sup>125</sup>

#### 4.5.1.2 Stadtwerk

Die Stromnachfrage des Beispiel-Stadtwerks beträgt im Jahr 2003 ca. 1,5 TWh, die Wärmenachfrage ca. 0,5 TWh<sup>126</sup>. Die Wärmenachfrage wird vollständig aus eigenen Kraftwerken gedeckt, während die Stromnachfrage sowohl durch Fremdbezug als auch durch Eigenerzeugung befriedigt wird. Das Ziel des Stadtwerks liegt im Ausbau bzw. zumindest dem Erhalt der Erzeugung aus (teil-)eigenen Anlagen, wofür im Modell festgelegt werden kann, wieviel Prozent der Stromnachfrage aus (teil-)eigenen Anlagen gedeckt werden muss.

Im Jahr 2003 verfügt das Stadtwerk über ein steinkohlebefeuetes Heizwerk sowie je ein gas- und ein steinkohlebefeuetes Heizkraftwerk (siehe Tabelle 18). Während beide Heizkraftwerke über den gesamten Betrachtungszeitraum betrieben werden können, erreicht das steinkohlebefeuetes Heizwerk das Ende seiner technischen Lebensdauer im Jahr 2013.

<sup>125</sup> Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die im Modell einzeln abgebildeten Anlagen in dieser Abbildung zu Anlagenklassen auf Basis des eingesetzten Brennstoffs zusammengefasst. Darüber hinaus wurde auf die Darstellung der Sterbelinien der Kernkraftwerke verzichtet, da diese Kraftwerke primär aufgrund der Begrenzung der Reststrommenge stillgelegt werden.

<sup>126</sup> Stadtwerke mit ähnlich großen Versorgungsgebieten sind u.a. die Stadtwerke Bochum und Karlsruhe.

**Tabelle 18:** Technische Charakteristika der Bestandsanlagen des Stadtwerks

Kraftwerkstyp	Primärenergeträger	Anlagengröße	Netto-Wirkungsgrad	Revisionsdauer
Heizkraftwerk	Erdgas	110 MW <sub>elektr</sub>	39 % (elektrisch)	---
Heizkraftwerk	Steinkohle	35 MW <sub>elektr</sub>	38 % (elektrisch)	2 Wochen
Heizwerk	Steinkohle	95 MW <sub>elektr</sub>	85 % (thermisch)	2 Wochen

#### 4.5.2 Brennstoffpreise

Brennstoffkosten stellen einen erheblichen Anteil der Stromgestehungskosten dar. Somit kommt der Ermittlung der realen Brennstoffbezugssituation und insbesondere deren zukünftiger Entwicklung eine besondere Bedeutung zu.

Bis in die 70er-Jahre stellten die fossilen Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Ölschiefer, Torf, Erdöl und Erdgas neben der Wasserkraft den wichtigsten Pfeiler der großtechnischen Stromerzeugung dar. Der dann einsetzende massive Ausbau der Kernenergie führte zu einer zusätzlichen, neuen Technologiegruppe. Im Jahr 2002 deckten die fossilen Energieträger ca. 60 % des Primärenergieträgereinsatzes in Deutschland ab (vgl. [VDEW 2004b]).

Eine der zentralen Herausforderungen für langfristig ausgerichtete Analysen von Energiesystemen ist die Ermittlung geeigneter Annahmen bezüglich der Preisentwicklungen auf den Weltmärkten für Erdöl, Erdgas und Steinkohle. Hierzu werden in regelmäßigen Abständen Prognosen sowie Marktszenarios von einer Vielzahl an Institutionen veröffentlicht<sup>127</sup>. Jedoch weichen diese Prognosen sowohl untereinander als auch über die einzelnen Jahrgänge hinweg deutlich voneinander ab<sup>128</sup>. [Enzensberger 2003, S. 100] leitet angesichts der großen Schwankungsbreiten einen relevanten Preiskorridor ab, der auch im Rahmen dieser Arbeit zur Festlegung der Szenarios des Anwendungsfalls herangezogen wird (vgl. Tabelle 19). Zusätzlich zu diesen Weltmarktpreisen wurden in Abhängigkeit der Standorte der Kraftwerke entsprechende Transportkosten in Modell hinterlegt. Hierbei wurde berücksichtigt, dass aufgrund der geringeren Abnahmemenge sowohl die Kosten für die Brennstoffe als auch für deren Transport bei Stadtwerken in der Regel über den Kosten der Flächenversorger liegen.

Bezogen auf den Anteil an der Gesamtstromerzeugung stellt Braunkohle mit ca. 30 % die wichtigste heimische Energiequelle dar (vgl. [VDEW 2004b]). Im Vergleich zu Steinkohle besitzt Braunkohle u.a. aufgrund ihres hohen Wassergehalts einen deutlich niedrigeren Heizwert. Der ökonomische Transport von Braunkohle ist deshalb in der Regel auf sehr kurze Strecken begrenzt, weshalb Braunkohlekraftwerke in unmittelbarer Nähe der Gruben errichtet werden.

<sup>127</sup> Beispielsweise PROGNOSE, International Energy Agency (IEA), Energy Information Administration des U.S. Department of Energy (EIA/DOE), Europäische Kommission.

<sup>128</sup> Siehe hierzu auch die Gegenüberstellung unterschiedlicher Ölpreisprognosen in [EIA 2002, S. 39].

Braunkohlekraftwerke stellen in den bestehenden Versorgungsstrukturen zwar Grundlastkraftwerke mit niedrigen variablen Kosten dar, weisen demgegenüber jedoch hohe CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren auf. Somit werden ihr Einsatz und insbesondere der Ausbau maßgeblich von ihrer relativen Kostenstruktur im Vergleich zu anderen, weniger emissionsintensiven Technologien bestimmt. Diese Entscheidung wird hauptsächlich von den Braunkohlegewinnungskosten beeinflusst.

**Tabelle 19:** Trendentwicklung der Weltmarktpreise für fossile Energieträger

Weltmarktpreise [in Cent <sub>2000</sub> /kWh <sub>therm</sub> ]		(2000) Daten	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Erdöl	Obergrenze	(1,73)	1,32	1,32	1,47	1,61	1,81	2,01
	Referenzentwicklung	(1,73)	1,32	1,32	1,42	1,53	1,65	1,78
	Untergrenze	(1,73)	1,32	1,32	1,37	1,45	1,49	1,55
Erdgas	Obergrenze	(1,11)	1,10	1,14	1,30	1,48	1,68	1,92
	Referenzentwicklung	(1,11)	1,10	1,12	1,21	1,31	1,42	1,55
	Untergrenze	(1,11)	1,10	1,10	1,12	1,14	1,16	1,17
Weltmarkt- kohle	Obergrenze	(0,42)	0,47	0,49	0,52	0,55	0,57	0,60
	Referenzentwicklung	(0,42)	0,47	0,47	0,48	0,49	0,51	0,53
	Untergrenze	(0,42)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

Braunkohle wird nicht an Märkten gehandelt, sondern direkt durch unternehmenseigene Kraftwerke bzw. durch im Rahmen von langfristigen Verträgen gebundene Abnehmer verstromt. Es existieren daher keine Statistiken oder andere Quellen, aus denen Braunkohlepreise direkt zu entnehmen wären (vgl. [Prognos 2000, S. 203]). Im Modell wurden die von [Enzensberger 2003, S. 102] auf der Grundlage von Presseberichten und Expertengesprächen ermittelten Daten zur Braunkohleproduktion in Deutschland verwendet (siehe Tabelle 20).

**Tabelle 20:** Daten zur Braunkohlenutzung in Deutschland

Produktion im Jahr 2000 [Mio. t]	Anteil an der Stromer- zeugung im Jahr 2000 [%]	unterer Heizwert H <sub>u</sub> [MJ/kg]	Preise (geschätzte Kosten) [Cent/kWh <sub>therm</sub> ]
167,7	25,3 %	7,8 - 12,0	0,38 – 0,46

Im gegenwärtigen deutschen Energieversorgungssystem entspricht der Anteil der Stromerzeugung aus Kernenergie in etwa dem Anteil der Stromerzeugung aus Braunkohle (vgl. [VDEW 2004b]). Die Brennstoffpreise für Kernkraftwerke hängen von der zukünftigen Entwicklung des Uranmarkts ab. Aufgrund des eingeschränkten Wettbewerbs und der politischen Einflussnahme wird eine freie Preisbildung auf diesem Markt behindert, was zu Schwierigkeiten bei der Erstellung belastbarer Prognosen führt (vgl. [IEA 2001, S. 149]). In Übereinstimmung mit [IEA 2001, S. 148 f.] wird im Rahmen dieser Arbeit von einer weitgehend konstanten

Preisentwicklung ausgegangen<sup>129</sup>. Der im Modell hinterlegte Uranpreis für die Brennstoffkosten von Kernkraftwerken inklusive der Brennelementbereitstellungs- und Entsorgungskosten beträgt 0,40 Cent/kWh<sub>therm</sub>.

### 4.5.3 Zubauoptionen

Jede der im Modell hinterlegten Anlagen, sowohl die Zubauoptionen als auch die in Kapitel 4.5.1 skizzierten Bestandsanlagen, sind durch die in Tabelle 21 aufgezählten Parameter determiniert. Durch die Unterscheidung von Anlagen- und Prozessparametern können unterschiedliche Fahrweisen einer Anlage in den Analysen berücksichtigt werden.

**Tabelle 21:** Techno-ökonomische Parametrisierung der Modellanlagen

	technische Daten		ökonomische Daten		ökologische Daten
			Parameter	Vorgaben	
<b>Anlage</b>	installierte Leistung		Investitionen	Beschränkungen des freien Zu- / Rückbaus	
	Anlagenverfügbarkeit		fixe Ausgaben		
	technische Nutzungsdauer		Wirtschaftliche Nutzungsdauer	gesetzter Zubau	
<b>Prozess</b>	Input 1	jeweiliger	variable Anlagenkosten (ohne Brennstoffkosten)	Beschränkung der Betriebsweise auf Grundlastbetrieb	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen
	Input 2	Anteil am			
	Input 3	Gesamtinput			
	Output 1	jeweiliger		minimale/maximale Volllaststunden	
	Output 2	Anteil am			
	Output 3	Gesamtoutput			
	Wirkungsgrad				

Neben den Bestandsanlagen wurden Zubauoptionen für das Stadtwerk und den Flächenversorger sowie vier unterschiedliche gemeinsame Zubauoptionen in das Modell integriert (siehe Tabelle 22). Die gemeinschaftlichen Zubauoptionen entsprechen hierbei ausgewählten Zubauoptionen des Flächenversorgers. Mittels dieser Vorgehensweise wird gewährleistet, dass die Gemeinschaftsheizkraftwerke nur aufgrund von Vorteilen durch die Kooperation ausgewählt werden und nicht allein wegen technologischer Vorteile gegenüber anderen Zubauoptionen.

<sup>129</sup> Im Rahmen von Szenarioanalysen können auch alternative Preisentwicklungen betrachtet werden (z.B. aufgrund höherer Entsorgungskosten).

**Tabelle 22:** Zubauoptionen der konventionellen Stromerzeugung  
(Quelle: IIP-Technologiedatenbank)

	Technologie	ab Jahr	Leistung [MW <sub>elektr.</sub> ]	spez. Investi- tionen [€/kW <sub>elektr.</sub> ]	fixe Betriebs- ausgaben [€/kW <sub>elektr.*a</sub> ]	variable Betriebs- ausgaben [Cent/kWh <sub>elektr.</sub> ]	Netto- Wirkungsgrad [%]	Zubauoption für
Braunkohle	Staubfeuerung, überkritischer Dampferzeuger	2005	980	1250	40	0,1	44	Flächen- versorger
	Staubfeuerung, (überkritisch) - mit WTA <sup>130</sup>	2010	1200	1250	40	0,1	48	
Steinkohle	Staubfeuerung, überkritischer Dampferzeuger	2005	500	850	36	0,15	46	Flächen- versorger
	Druckwirbel- schichtfeuerung (GuD- Heizkraftwerk)	2005	450	1000	58	0,15	84	Flächenversorger oder Gemein- schaftslösung
	Staubfeuerung, unterkritischer Dampferzeuger (Heizkraftwerk)	2010	700	750	36	0,15	79	Flächenversorger oder Gemein- schaftslösung
	Wirbelschichtfeuerung (Heizkraftwerk)	2005	100	1025	58	0,15	81	Stadtwerk
	Druckwirbel- schichtfeuerung (GuD- Heizkraftwerk)	2005	50	1080	58	0,15	76	
Erdgas	GuD-Kraftwerk	2005	200	410	14,5	0,05	54	Flächen- versorger
	GuD-Kraftwerk	2020	200	410	14,5	0,05	60	
	Gasturbine (Spitzenlast)	2005	150	250	6	0,15	35	
	GuD-Heizkraftwerk	2005	300	410	14,5	0,05	85	Flächenver- sorger oder Gemeinschafts- lösung
	GuD-Heizkraftwerk	2010	800	395	14	0,05	85	
	GuD-Heizkraftwerk	2005	45	410	15	0,05	84	Stadt- werk
	GuD-Heizkraftwerk	2005	120	410	15	0,05	84	
	GuD-Heizwerk	2005	140	200	15	0,05	90	

<sup>130</sup> Wirbelschicht-Trocknung mit integrierter Abwärmenutzung.

#### 4.5.4 Nachfrageentwicklung und Laststruktur

Die exogen vorgegebene Nachfrage nach Strom- und Wärme stellt die treibende Größe des Modells dar. Um den unterschiedlich großen Einzugsgebieten der betrachteten Unternehmen gerecht zu werden, sind für jedes Unternehmen sowie für die Produkte Strom und Wärme unterschiedliche Nachfrageentwicklungen und detaillierte Lastkurven hinterlegt. Die zeitliche Entwicklung der Strom- und Wärmenachfrage ist in Tabelle 23 dargestellt. Die Stromnachfrageentwicklung basiert für beide Unternehmen auf den Prognosen von [Prognos 2000, S. 213 ff]. Die Entwicklung der Wärmenachfrage für einzelne Gebiete ist weitaus schwieriger zu bestimmen, da diese stark von den Zielen der einzelnen Unternehmen bzw. äußeren Faktoren abhängt. Beispielsweise bewirken milde Winter einen deutlichen Rückgang der Nachfrage nach Wärme. Des Weiteren können sprunghafte Anstiege verzeichnet werden, wenn neue Gebiete an die Fernwärmeversorgung angeschlossen werden<sup>131</sup>. Solche schwer voraussehbaren Entwicklungen werden im Modell jedoch nicht berücksichtigt, sondern es wird von einem moderaten Anstieg der Wärmenachfrage in allen betrachteten Gebieten ausgegangen.

**Tabelle 23:** Entwicklung der Strom- und Wärmenachfrage

		2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
<b>Stromnachfrage [TWh]</b>	Flächenversorger	118,59	122,27	126,06	129,97	134,00	138,16	142,45
	Stadtwerk	1,50	1,54	1,59	1,64	1,70	1,75	1,80
<b>Wärmenachfrage [TWh]</b>	Flächenversorger Gebiet 1	0,60	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63	0,64
	Flächenversorger Gebiet 2	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32
	Flächenversorger Gebiet 3	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34
	Flächenversorger Gebiet 4	1,27	1,28	1,30	1,31	1,32	1,34	1,35
	Flächenversorger Gebiet 5	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13
	Stadtwerk	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53

Die im Modell hinterlegten Lastkurven umfassen sechs charakteristische Tage: jeweils einen Werktag sowie einen Wochenendtag für Sommer, Winter und die Übergangsphasen. Jeder charakteristische Tag gliedert sich in mehrere Zeitintervalle, deren Gesamtzahl die zeitliche Auflösung des Modells festlegt. Werktage gliedern sich in fünf Zeitintervalle, für die Wochenendtage wurde mit vier Zeitintervallen eine höhere zeitliche Aggregation gewählt. Die insgesamt 27 Zeitintervalle erlauben eine detaillierte Erfassung der jeweiligen Laststrukturen, um

<sup>131</sup> Die deutlichen Unterschiede hinsichtlich der abgesetzten Wärme deutscher Energieversorger wird u.a. aus einem Vergleich der ZfK-Fernwärmeumfrage der Jahre 1999 bis 2003 ersichtlich (verfügbar unter <http://www.zfk.de/navframe/index4fw.html>).

so eine realitätsnahe Kraftwerkseinlastung zu gewährleisten. Eine höhere zeitliche Auflösung oder etwa eine stundenscharfe Rechnung ist aufgrund der ganzzahligen Variablen nicht mit akzeptablen Rechenzeiten zu bewerkstelligen. Die hinterlegten Lastkurven basieren auf Lastdaten der Verbundnetzbetreiber sowie auf Informationen nationaler Energieversorgungsunternehmen und Netzbetreiber<sup>132</sup>.

#### 4.5.5 Elektrizitätsfremdbezug und Elektrizitätsabgabe

Der Elektrizitätsfremdbezug sowie die Elektrizitätsabgabe sind zum einen als kontinuierliches 24-Stunden-Band und zum anderen wochentags als kontinuierliches Band zwischen 8.00 Uhr und 20.00 Uhr möglich. Dies entspricht den an der European Energy Exchange (EEX) gehandelten Blöcken Baseload und Peakload (vgl. [EEX 2003]). Zur Preisbildung in den einzelnen Zeitscheiben wurden die Mittelwerte der an der EEX gehandelten Kontrakte in den Jahren 2002 und 2003 herangezogen (vgl. Tabelle 24). Bei Elektrizitätsfremdbezug müssen zusätzlich zu den in der Tabelle angegebenen Preise EEX-Gebühren in Höhe von 4 Cent/MWh abgeführt werden.

**Tabelle 24:** Mittelwerte der Base- und Peakloadkontrakte für die charakteristischen Tage

[€/MWh <sub>elektr.</sub> ]	Sommer		Winter		Übergang	
	Werktag	Wochenendtag	Werktag	Wochenendtag	Werktag	Wochenendtag
Baseload	29,99	15,69	31,02	18,12	29,01	18,25
Peakload	37,7	---	38,22	---	40,2	---

Die vorgegebenen Preise wurden mit Preissteigerungsfaktoren bis 2030 fortgeschrieben. Diese Preissteigerungsfaktoren wurden bis 2010 auf der Grundlage der Preise der ebenfalls an der EEX gehandelten Futures<sup>133</sup> ermittelt (vgl. Tabelle 25). Da an der EEX lediglich Futures mit einer Fälligkeit bis ins Jahr 2010 gehandelt werden, wurden die Preise ab 2010 mit 1 % Wertsteigerung fortgeschrieben (vgl. [Rentz et al. 2004]).

**Tabelle 25:** Entwicklung der Preissteigerung der Börsenpreise (jeweils in Bezug zum Vorjahr)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011-2030
Preissteigerung [%]	4,4%	4,4%	4,4%	3,4%	2,8%	2,7%	2,7%	1,0%

Wie bereits im Rahmen der Vorstellung des mathematischen Gleichungssystems erwähnt wurde, ist eine Beschränkung des Gesamtstromaustauschs notwendig, um

<sup>132</sup> Die Daten der UCTE sind den Online-Statistiken unter [www.ucte.org](http://www.ucte.org) entnommen und umfassen die Jahre 1994-2002. Um jahresspezifische Lastcharakteristika zu eliminieren, sind die hinterlegten Lastkurven als Mittelwerte der Daten mehrerer Jahrgänge errechnet.

<sup>133</sup> Futures sind Verträge über die zukünftige Lieferung bzw. den Bezug einer bestimmten Menge eines Gutes, wobei Ort, Preis und Zeitpunkt bereits festgelegt sind.

zu verhindern, dass bei niedrigerem Strompreis die Nachfrage primär aus Fremdbezug gedeckt wird, bzw. dass bei hohem Strompreis Kapazitäten rein aus Gründen der Stromabgabe zugebaut werden. Für den Flächenversorger wurde hierfür ein Wert von 7,5 % der in der jeweiligen Zeitscheibe nachgefragten Strommenge festgesetzt, für das Stadtwerk 15 % (mit der Einschränkung, dass der Verkauf lediglich 10 % betragen darf). Diese niedrigen Prozentsätze wurden u.a. aufgrund des im Modell nicht berücksichtigten Einflusses der von den betrachteten Unternehmen gehandelten Strommengen auf den Marktpreis gewählt. Die unterschiedlichen Prozentsätze erklären sich dadurch, dass die Flächenversorger in der Regel die Nachfrage fast ausschließlich durch Eigenproduktion decken, während die Stadtwerke neben der Erzeugungs- auch eine Verteilfunktion erfüllen.

#### 4.5.6 Emissionsfaktoren und Zertifikatpreise

Die im Modell hinterlegten Emissionsfaktoren für bestehende Anlagen sowie Zubauoptionen wurden der bundeseinheitlichen Liste für CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren bezogen auf den unteren Heizwert des eingesetzten Brennstoffs entnommen. Für die Zuteilung von Emissionsrechten für zusätzliche Neuanlagen beträgt der Emissionswert für Wärme erzeugende Anlagen 215 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>therm</sub>, für Strom erzeugende Anlagen in Abhängigkeit der besten verfügbaren Technik zwischen 365 und 750 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>elektr</sub> (vgl. [ZuV 2004])<sup>134</sup>.

Laut [EC 2003b] liegt die beste verfügbare Technik zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen großer (sowohl kohle- als auch erdöl- oder erdgasbefeuert) Kraftwerke in der Erhöhung des Brennstoffnutzungsgrades<sup>135</sup>. Für kohle- und ölbefeuerte Anlagen werden Werte im Bereich von 43 bis 47 % genannt, für Gasturbinen 40 bis 45 % und für gasbefeuerte GuD-Kraftwerke 54 bis 58 % (vgl. [EC 2003b, S. 263, S. 369 und S. 438 f.]). Um dem technologischen Fortschritt Rechnung zu tragen, wurden bei der Berechnung der Emissionsfaktoren für den Beginn der Analyse die niedrigeren Werte angesetzt, die dann sukzessive bis zum Ende des Betrachtungszeitraums auf den Maximalwert erhöht werden. Darüber hinaus wurde die Anlagengröße bei der Festsetzung des anzuwendenden Emissionswerts entsprechend berücksichtigt.

Für die Periode 2005 bis 2007 wurde nach [ZuG 2007] ein Erfüllungsfaktor von 0,9709 angesetzt. Die Festlegung eines Erfüllungsfaktors für die nachgelagerten Perioden gestaltet sich allerdings schwierig. Aufgrund der Wahlmöglichkeit für Bestandsanlagen zwischen einer Zuteilung auf der Basis von historischen Emissionen und der Zuteilung für Ersatzanlagen kann die durch den Erfüllungsfaktor erzielbare Emissionsminderung nicht direkt ermittelt werden. Aufgrund der angestrebten Emissionsminderungsziele wurden im Rahmen dieser Arbeit für die Perioden ab 2008 folgende Erfüllungsfaktoren verwendet:

- Periode 2008 bis 2012: 0,9709<sup>2</sup>,
- Periode 2013 bis 2017: 0,9709<sup>3</sup> und

<sup>134</sup> KWK-Anlagen erhalten Zertifikate entsprechend der erzeugten Strom- und Wärmemenge.

<sup>135</sup> Nach [EC 2003b] ist der Brennstoffnutzungsgrad als Quotient aus den Nutzenergieströmen (Elektrizität und Wärme) und dem Brennstoffeinsatz einer Anlage definiert.

- Periode 2018 bis 2022: 0,9709<sup>4</sup>.

Die hinterlegten Zertifikatpreise wurden der Arbeit von [Enzensberger 2003, S. 136 ff] entnommen. Tabelle 26 enthält die Entwicklung der Zertifikatpreise bei einer europaweiten Stabilisierung der Emissionen auf den Emissionswert der ersten Verpflichtungsperiode 2008 bis 2012, für die im Vergleich zum Jahr 2000 eine Minderung um 3,3 % festgesetzt wurde. Für die Startperiode 2005 bis 2007, die als eine Art Testphase für die nachfolgenden Verpflichtungsperioden gilt, wurde eine europaweite Stabilisierung der Emissionen auf dem Niveau des Jahres 2000 vorgegeben.

**Tabelle 26:** Zertifikatpreise in den einzelnen Verpflichtungsperioden (vgl. [Enzensberger 2003, S. 136]).

	Verpflichtungsperioden			
	2005 - 2007	2008 - 2012	2013 - 2017	2018 - 2022
Zertifikatpreis [€/t CO <sub>2</sub> ]	2,7	15,5	21,2	24,5

#### 4.5.7 Zinssatz

In der Literatur existieren unterschiedliche Sicht- und Vorgehensweisen hinsichtlich der Festlegung eines für die Energiesystemanalyse zu verwendenden Zinssatzes. In Studien der Politikberatung und –bewertung werden traditionell Zinssätze in der Größenordnung von 3 bis 5 %/a verwendet<sup>136</sup>, was einem mittleren risikolosen, realen Kapitalmarktzinssatz entspricht. Im Gegensatz dazu werden deutlich höhere Zinssätze in Energiemodellen, die v.a. der Ableitung sektorspezifischer Investitionsstrategien dienen, sowie in Marktmodellen mit detaillierter Abbildung des Akteursverhaltens verwendet. Die Werte in diesen Modellen liegen typischerweise im Bereich von 8 bis 12 %/a<sup>137</sup>. Durch diesen höheren Zins soll in diesen Modellen neben dem risikolosen Kapitalmarktzins auch „eine adäquate Rendite für die zusätzliche Berücksichtigung des Marktrisikos der Investition“ [Starrmann 2000, S. 94] berücksichtigt werden. Jedoch wird durch die Verwendung eines einheitlichen Risikoaufschlags implizit angenommen, dass verschiedene Kraftwerkstypen ein vergleichbares Investitionsrisiko besitzen (vgl. [Hoster 1996, S. 53 ff.]). Diesbezüglich ist insbesondere der Einfluss zukünftiger Brennstoffpreisrisiken kritisch zu diskutieren, da unterschiedliche Brennstoffe in der Vergangenheit in ihrer Preisentwicklung deutlich unterschiedliche Volatilitäten zeigten. Aufgrund der generellen Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der Energiemärkte ist eine Ableitung von Risikobewertungen auf Basis dieser Volatilitäten jedoch problematisch. Angesichts fehlender Daten, die eine branchen- oder technologie-spezifische Differenzierung des Marktrisikos gestatten würden, orientiert sich der im

<sup>136</sup> Im Rahmen der verschiedenen Modellexperimente des Forums für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen werden z.B. reale Diskontierungszinssätze von ca. 4 %/a verwendet (vgl. [FEES 2002]).

<sup>137</sup> Beispielsweise [Hoster 1996, S. 53 f.]: 8 %/a, [Grobbe 1999, S. 220 ff.]: 12 %/a, [Starrmann 2000, S. 94 f.]: 10 %/a.

Rahmen dieser Arbeit verwendete Kalkulationszinssatz an einer durchschnittlichen, langfristigen Marktrendite der Aktienmärkte (siehe hierzu [Hoster 1996, S. 53]). Für die Berechnungen wird ein über den Betrachtungszeitraum konstanter Diskontierungszinssatz von 10 %/a verwendet.

#### **4.5.8 Modelltechnische Umsetzung**

Gegenstand dieses Unterkapitels ist die Erläuterung der Zuordnung einzelner Kraftwerke zu den unterschiedlichen Wärmenachfragegebieten innerhalb der Graphenstruktur. Des Weiteren werden die Gründe für eine vorgelagerte Optimierung der Basisperiode sowie deren Ergebnisse dargestellt. Bevor dies skizziert wird, soll an dieser Stelle kurz auf die Größe des zu lösenden Optimierungsproblems eingegangen werden. Diese wird maßgeblich durch die Anzahl der berücksichtigten Perioden determiniert. Bei einem Betrachtungszeitraum von 2005 bis 2027 mit fünf Optimierungsperioden (2005 bis 2007 und anschließend 5-Jahresperioden) enthält das Modell ca.

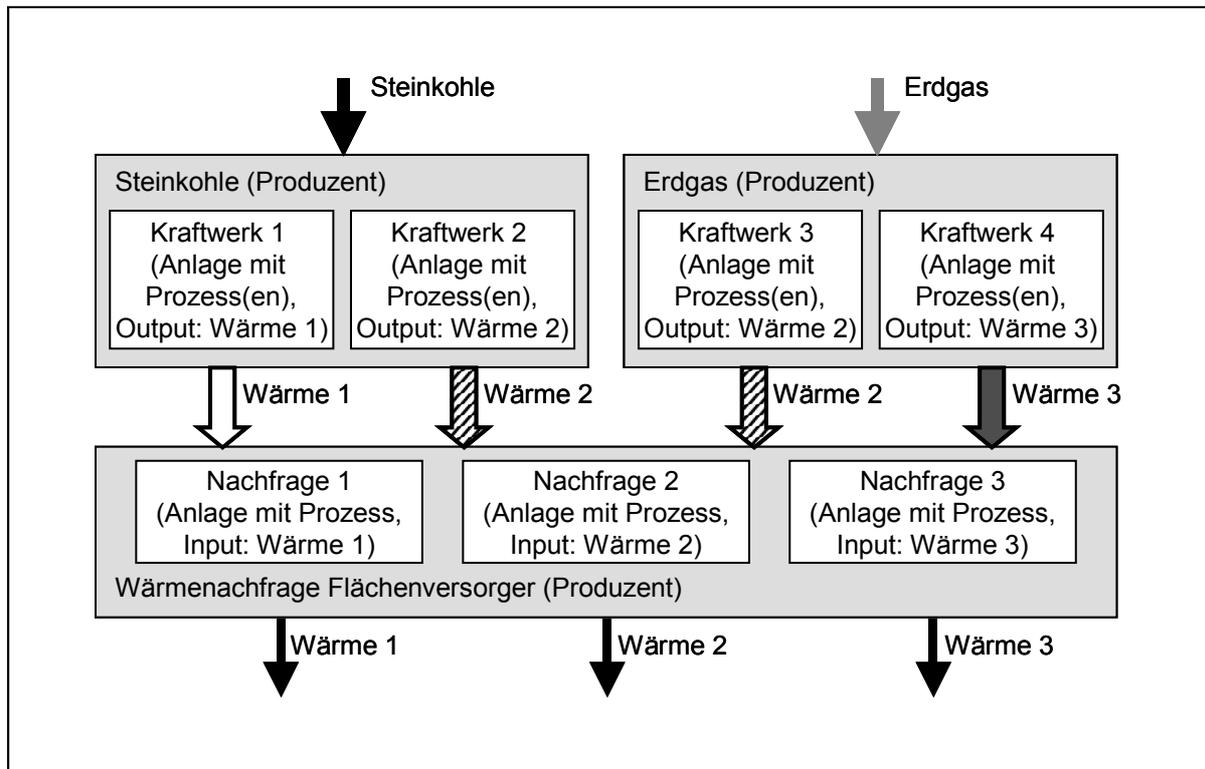
- 80.000 Gleichungen,
- 90.000 Variablen (davon 11.000 ganzzahlige Variablen) und
- 0,3 Mio. Non-Zero-Elemente.

Die Rechenzeiten auf einem IBM kompatiblen PC (2,4 GHz, 2 GB RAM) betragen in Abhängigkeit der einzelnen Szenarios zwischen 0,5 und 100 Stunden.

##### **4.5.8.1 Zuordnung der Kraftwerke zu einzelnen Wärmenachfragegebieten**

Während im Bereich der Stromversorgung die Entfernung zwischen Stromerzeugung und Nachfrage vernachlässigt werden kann, ist aufgrund der Struktur in der Fernwärmeversorgung mit kleinen, in sich abgeschlossenen Netzen eine Zuordnung einzelner Kraftwerke zu den jeweiligen Nachfragegebieten erforderlich. Im Rahmen des entwickelten Modells kann dies prinzipiell durch zwei unterschiedliche Modellierungsansätze gelöst werden:

- Zuordnung der Anlagen mittels erhöhter Anzahl an Produzenten: Im Rahmen dieses Lösungsansatzes wird für jedes Wärmenachfragegebiet ein Nachfrageproduzent im Modell abgebildet. Des Weiteren wird pro Wärmenachfragegebiet (mindestens) ein Erzeugungsproduzent hinterlegt, dem die entsprechenden Kraftwerke zugeordnet werden. Durch eine Verbindung dieser Erzeugungsproduzenten mit den entsprechenden Nachfrageproduzenten über Wärmeflüsse wird gewährleistet, dass das jeweilige Wärmegebiet ausschließlich Wärme aus den zugeordneten Kraftwerken beziehen kann.
- Zuordnung der Kraftwerke mittels unterschiedlicher Wärmeströme: Mittels dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz wird die Zuordnung der Kraftwerke durch die Abbildung unterschiedlicher Outputströme der Anlagen für die einzelnen Nachfragegebiete gelöst. In Abbildung 6 wird dies beispielhaft für einen Ausschnitt des Kraftwerksparks des Flächenversorgers verdeutlicht. Durch diese Vorgehensweise bleibt die Möglichkeit erhalten, die Anlagen flexibel aufgrund ihrer speziellen Charakteristika einzelnen Produzenten zuordnen zu können, um auf dieser Ebene Vorgaben für alle Anlagen eines Typs festsetzen zu können.



**Abbildung 6:** Abbildung der Wärmeversorgung durch den Flächenversorger

#### 4.5.8.2 Vorgelagerte Analyse der Basisperiode

Wie bereits in Kapitel 4.4.3 im Rahmen der Ablaufschritte des Modelleinsatzes dargestellt wurde, wird vorgelagert das System für den Zeitraum 2000 bis 2004 optimiert. Durch diese zweigeteilte Betrachtung wird eine Verfälschung der Ergebnisse bezüglich des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels verhindert. Aufgrund der dem Modell zugrunde gelegten perfekten Voraussicht würden bei einer Analyse über den gesamten Analysenzeitraum die Ergebnisse der Basisperiode hinsichtlich Einlastung und Zubau bereits durch die für den Emissionsrechtehandel hinterlegten Daten beeinflusst. Beispielsweise könnte es zu einer verstärkten Einlastung emissionsintensiver Anlagen kommen, um anschließend möglichst viele Zertifikate auf der Grundlage historischer Emissionen zu erhalten.

Wichtige Ergebnisse der vorgelagerten Optimierung sind die durchschnittlichen Emissionen sowie die durchschnittliche Produktionsmenge der Anlagen in der Basisperiode 2000 bis 2002. Durch Verlängerung des Zeitraums bis zum Jahr 2004 ist dann die „exakte“ Ermittlung der zur Verfügung stehenden Reststrommenge der einzelnen Kernkraftwerke für die zweite (maßgebliche) Analyse möglich.

Des Weiteren werden in dieser vorgelagerten Analyse die durchschnittlichen Emissionsfaktoren pro Megawatt installierter Leistung  $EmCap_{t,CO_2}$  und  $EmCap_{unit,t,CO_2}$  berechnet. Der jahresbezogene Emissionsfaktor  $EmCap_{t,CO_2}$  wird ermittelt, indem die Emissionen aller in einer Periode stilllegbaren Gas-, Braun- und Steinkohlekraftwerke

durch die Gesamtkapazität dieser Kraftwerke dividiert werden. Der anlagen- und jahresbezogene Emissionsfaktor  $EmCap_{unit,t,CO_2}$  berücksichtigt zusätzlich die durchschnittliche Auslastung im Betrachtungszeitraum 2000 bis 2004 der unterschiedlichen Kraftwerke in Abhängigkeit der unterschiedlichen Technologien und Brennstoffe.

## **4.6 Modellgestützte Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks**

### **4.6.1 Szenariodefinitionen**

Wie bereits in Kapitel 4.4.3 beschrieben wurde, dient LINK<sup>opt</sup>-JPP zur Analyse der Vorteile eines Gemeinschaftsheizkraftwerks unter variierten Rahmenbedingungen. Vor der Ergebnisdarstellung in den nachstehenden Unterkapiteln wird an dieser Stelle eine Übersicht der analysierten Szenarios gegeben.

Aufgrund der großen Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Ausgestaltung des nationalen Allokationsplans in Deutschland werden im Folgenden zuerst Ergebnisse ohne Integration des Emissionsrechtehandels vorgestellt. Im Basisszenario mit einem Betrachtungshorizont bis 2027 wurden für alle Energieträger die in Kapitel 4.5.2 dargestellten Referenzentwicklungen hinterlegt. Des Weiteren wurde für die Stromnachfragebefriedigung des Stadtwerks vorgegeben, dass mindestens 40 % in teileigenen Kraftwerken und 20 % in eigenen Kraftwerken erzeugt werden müssen.

Da insbesondere die Ober- und Untergrenze des Gaspreises deutlich von der ermittelten Referenzentwicklung abweichen, wurden Szenarios analysiert, in denen die Ober- bzw. die Untergrenze des Gaspreises verwendet wurden. In Kapitel 4.6.3 werden die Ergebnisse dieser beiden Szenarios den Ergebnissen des Basis-szenarios gegenübergestellt.

Die Auswirkungen der oben skizzierten Vorgabe des minimalen Anteils der Eigenerzeugung der Stadtwerke werden in Kapitel 4.6.4 präsentiert. Im Gegensatz zum Basisszenario wurde hierzu die Vorgabe der minimalen Eigenerzeugung deaktiviert. Hierbei interessiert insbesondere, ob der Wegfall dieser Vorgabe die Entscheidung hinsichtlich der Errichtung und des Betriebs eines Gemeinschaftsheizkraftwerks beeinflusst.

In den Szenarios mit Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels (Kapitel 4.6.5) wurde der Betrachtungszeitraum auf die Jahre 2005 bis 2022 verkürzt, da aufgrund der Aktualität dieses Aspekts noch große Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklungen, insbesondere der sich einstellenden Zertifikatpreise, bestehen. Bezüglich der Zuteilungsregeln wurde von einer Fortschreibung des nationalen Allokationsplans für die Startperiode 2005 bis 2007 für die nachfolgenden Verpflichtungsperioden ausgegangen. Dementsprechend wurden die Allokationsregeln für den gesamten Betrachtungszeitraum nicht verändert. Lediglich der Erfüllungsfaktor von 0,9709 in der Startperiode wurde für die nachfolgenden Perioden verringert (Periode 2008 bis 2012: 0,9709<sup>2</sup>, Periode 2013 bis 2017: 0,9709<sup>3</sup>, Periode 2018 bis 2022: 0,9709<sup>4</sup>).

#### 4.6.2 Modellergebnisse des Basisszenarios

Tabelle 27 enthält eine Übersicht der Gesamtausgaben im Betrachtungszeitraum 2005 bis 2027 ohne ein Gemeinschaftsheizkraftwerk (GHKW) sowie bei Zubau der vier unterschiedlichen Gemeinschaftsheizkraftwerke<sup>138</sup>. Die Aufteilung der Ausgaben des Gemeinschaftsheizkraftwerks basiert auf dem Verhältnis des Brennstoffeinsatzes zur Produktion von Strom und Wärme für das Stadtwerk zum Brennstoffeinsatz zur Stromproduktion für den Flächenversorger.

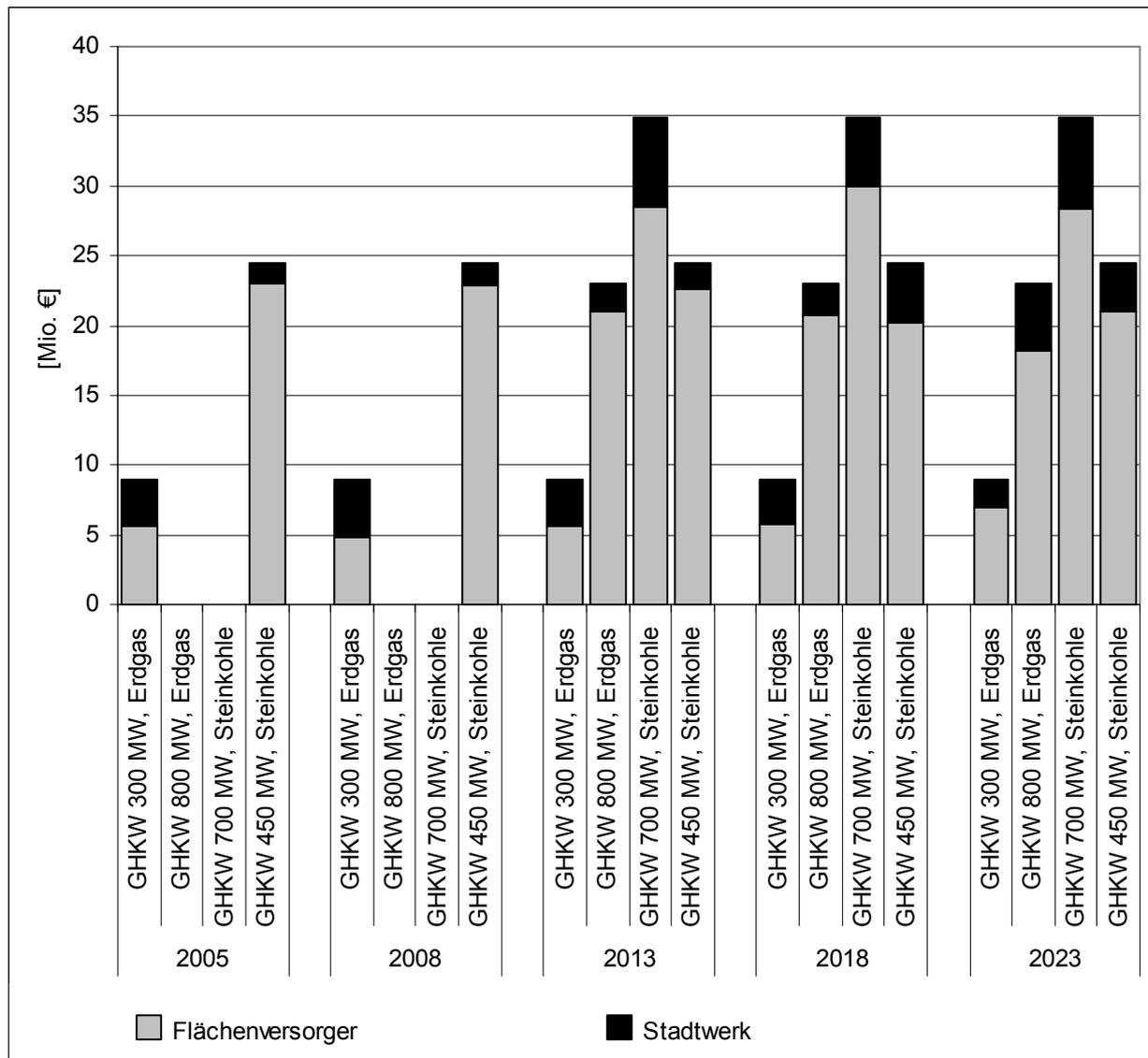
**Tabelle 27:** Übersicht der Gesamtausgaben im Basisszenario mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerke

[Mio. €]	Ohne GHKW	GHKW 300 MW <sub>elektr.</sub> , Erdgas	GHKW 800 MW <sub>elektr.</sub> , Erdgas	GHKW, 700 MW <sub>elektr.</sub> , Steinkohle	GHKW, 450 MW <sub>elektr.</sub> , Steinkohle
Gesamtausgaben	36.560	36.460	36.470	36.390	36.490
Ausgaben Flächenversorger	36.140	35.760	35.600	35.460	35.200
Ausgaben Stadtwerk	420	220	250	250	210
Ausgaben GHKW	0	480	620	680	1080
davon Flächenversorger	0	310	540	560	970
davon Stadtwerk	0	170	80	120	110
Summe Flächenversorger	36.140	36.070	36.140	36.020	36.170
Summe Stadtwerk	420	390	330	370	320

Die Errichtung und der Betrieb aller Gemeinschaftsheizkraftwerke führen zu niedrigeren Gesamtausgaben als bei den betrieblichen Einzellösungen. Die größten Einsparungen in Höhe von ca. 170 Mio. € können durch ein steinkohlebefeuetes Gemeinschaftsheizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> erzielt werden, während das Einsparpotenzial der anderen drei Gemeinschaftsheizkraftwerke zwischen 70 und 100 Mio. € beträgt. Bezogen auf die Gesamtausgaben des Systems ist das Einsparpotenzial niedrig, da die Ausgabenreduktion durch die Aufteilung der Ausgaben eines zusätzlichen Kraftwerks bzw. die Ausschöpfung der durch ein Gemeinschaftsheizkraftwerk erzielbaren Synergieeffekte im Vergleich zum insgesamt betrachteten Anlagenpark mit ca. 50 Kraftwerken lediglich gering ist. Die Gesamtbetrachtung des Kraftwerksparks ist jedoch aufgrund der Interdependenzen zwischen den Kraftwerken notwendig. Dies zeigt sich auch darin, dass das Einsparpotenzial des Flächenversorgers und des Stadtwerks nicht dem Anteil der dem anderen Unternehmen jeweils zugewiesenen Ausgaben des jeweiligen Gemeinschaftsheizkraftwerks entspricht. Bezogen auf das einzelne Gemeinschaftsheizkraftwerk bzw. dessen Investitionen ergeben sich bei einer Aufteilung anhand

<sup>138</sup> Die unterschiedlichen Lösungen wurden jeweils ermittelt, indem das beste Gemeinschaftsheizkraftwerk ausgeschlossen wurde.

des Brennstoffeinsatzes jedoch deutliche Einsparpotenziale für beide Unternehmen (siehe hierzu auch Abbildung 7).



**Abbildung 7:** Aufteilung der investitionsabhängigen Kosten der Gemeinschaftsheizkraftwerke im Zeitverlauf

Die unterschiedlichen Einsparpotenziale der verschiedenen Gemeinschaftsheizkraftwerke erklären sich u.a. aus den jeweiligen Zubauzeitpunkten (vgl. hierzu auch Abbildung 7): Die beiden kleineren Gemeinschaftsheizkraftwerke werden bereits im Jahr 2005 zugebaut, während die beiden größeren Gemeinschaftsheizkraftwerke erst im Jahr 2013 installiert werden. Bezüglich der beiden steinkohlebefeueten Gemeinschaftsheizkraftwerke führt dies aufgrund der vorgegebenen Kostenstruktur zu insgesamt höheren Ausgaben für das kleinere Gemeinschaftsheizkraftwerk. Dieser Effekt tritt jedoch bei den gasbefeueten Gemeinschaftsheizkraftwerken nicht auf, was primär durch die unterschiedliche Kostenstruktur der gasbefeueten

Kraftwerke im Vergleich zu den Steinkohlekraftwerken erklärt werden kann<sup>139</sup>. Des Weiteren variieren die Einsparpotenziale der Gemeinschaftsheizkraftwerke aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung des Kraftwerksparks und der Einlastung der einzelnen Kraftwerke. Bevor nun diese Detailergebnisse vorgestellt werden, soll an dieser Stelle aus Gründen der Übersichtlichkeit ein Gemeinschaftsheizkraftwerk ausgewählt werden, an dem die Veränderungen gegenüber den betrieblichen Einzellösungen dargestellt werden.

Wie bereits eingangs dieses Kapitels dargestellt wurde, besitzt das steinkohlebefeuerte Gemeinschaftsheizkraftwerk mit 700 MW elektrischer Leistung das größte Einsparpotenzial hinsichtlich der Gesamtausgaben. Bezogen auf das Einsparpotenzial des Flächenversorgers stellt dieses Kraftwerk ebenfalls die beste Lösung dar (Reduktion der Gesamtausgaben um ca. 120 Mio. €), während aus Sicht des Stadtwerks das steinkohlebefeuerte Heizkraftwerk mit 450 MW<sub>elektr</sub> zu den niedrigsten Ausgaben führt. Diese Zubauoption sowie das gasbefeuerte Gemeinschaftsheizkraftwerk mit 800 MW elektrischer Leistung ergeben jedoch für den Flächenversorger höhere bzw. gleich bleibende Ausgaben im Vergleich zu den Ausgaben ohne den Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks. Somit ist die Umsetzung dieser beiden Varianten unwahrscheinlich, da das Stadtwerk den Flächenversorger zur Errichtung des Gemeinschaftsheizkraftwerks benötigt, dieser sich jedoch selbst bei vollständiger Weitergabe der Kosteneinsparungen des Stadtwerks schlechter stellt als bei Zubau des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub>. Gegenüber dieser Zubauoption können beide Unternehmen bei Zubau des gasbefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 300 MW<sub>elektr</sub> ein geringeres Einsparpotenzial ausschöpfen, weshalb im Folgenden die Ergebnisse bei Errichtung und Betrieb des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW elektrischer Leistung (GHKW STK (700 MW<sub>elektr</sub>)) mit den Ergebnissen ohne den Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks verglichen werden. Hierbei werden zuerst die Entwicklungen des Gesamtsystems dargestellt und im Anschluss daran ausgewählte Ergebnisse zur Entwicklung des Stadtwerks präsentiert. Auf eine gesonderte Darstellung der Entwicklung des Flächenversorgers wird verzichtet, da aufgrund seiner Dominanz im abgebildeten Kraftwerkspark dessen Entwicklung weitestgehend mit der Entwicklung des Gesamtsystems übereinstimmt.

#### **4.6.2.1 Entwicklung des Gesamtsystems**

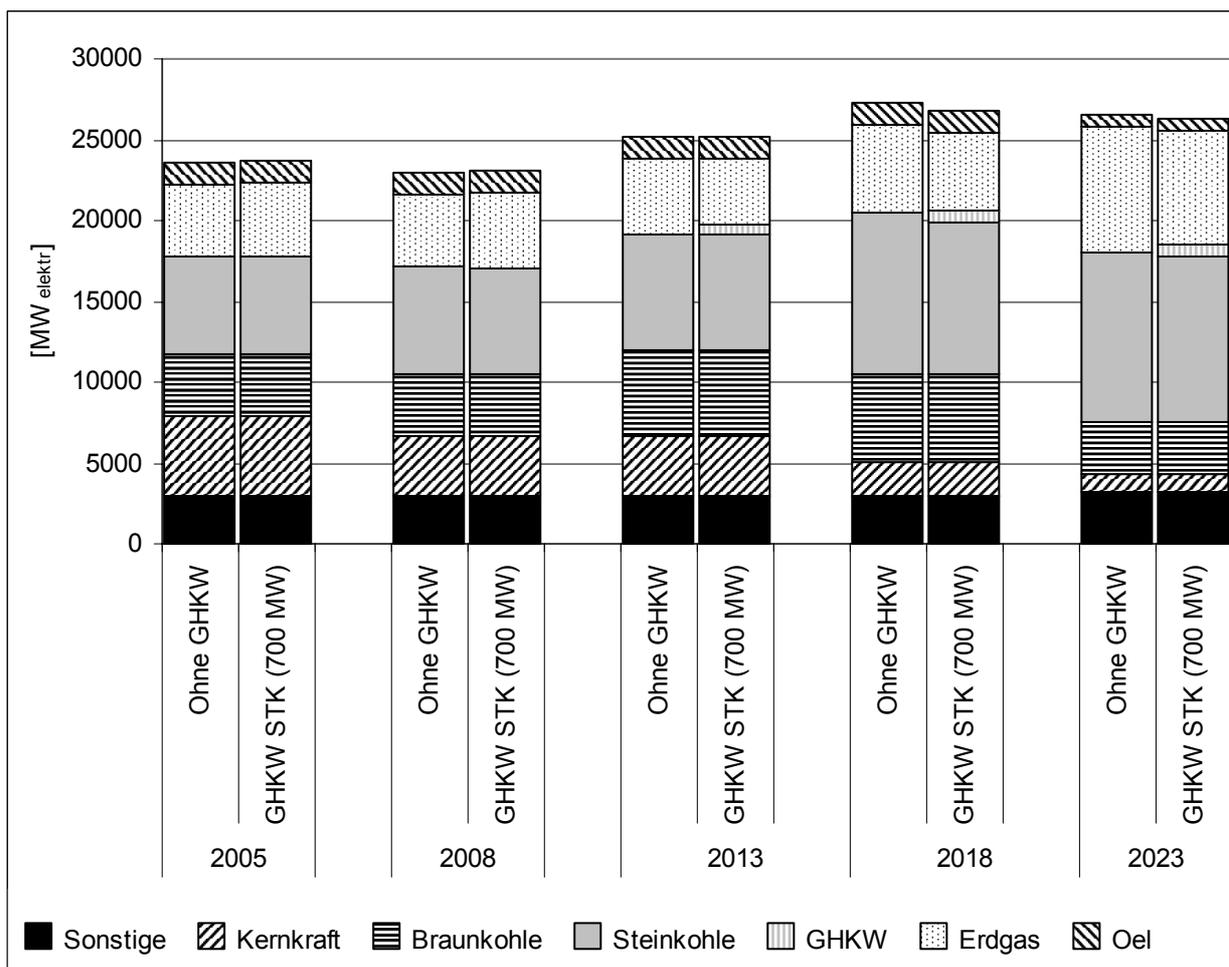
Die Entwicklung der installierten Kapazitäten mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk ist über den Betrachtungszeitraum 2005 bis 2027<sup>140</sup> differenziert nach Energieträgern in Abbildung 8 dargestellt. Deutlich wird ersichtlich, dass die Entwicklung der Gesamtkapazitäten nicht mit der Nachfrageentwicklung korreliert. Während letztere über den Betrachtungszeitraum kontinuierlich ansteigt, zeigt sich

---

<sup>139</sup> Vgl. hierzu auch Tabelle 22. Bei unterschiedlichen Anlagengrößen sind die Differenzen hinsichtlich der spezifischen Investitionen und der fixen Betriebsausgaben bei den steinkohlebefeuerten Kraftwerken deutlich höher als bei den gasbefeuerten Kraftwerken.

<sup>140</sup> In den Abbildungen und Tabellen werden jeweils die Ergebnisse der berechneten Stützjahre wiedergegeben. Da das Stützjahr 2023 einer 5-Jahresperiode ab 2023 entspricht, endet der Betrachtungszeitraum im Jahr 2027.

hinsichtlich der Kapazitäten ein Rückgang vom Jahr 2005 zum Jahr 2008 um ca. 600 MW<sub>elektr</sub>. Dieser Vorgang kommt einem Rückbau bestehender Überkapazitäten gleich, der u.a. durch die vorgegebenen Blockgrößen der einzelnen Anlagen bedingt ist: Im Jahr 2008 werden ca. 1250 MW<sub>elektr</sub> der Kernkraftwerke sowie ein Steinkohlekraftwerk mit 250 MW<sub>elektr</sub> stillgelegt und durch zwei steinkohlebefeuerte Heizkraftwerke mit 450 MW<sub>elektr</sub> ersetzt. Eine frühzeitige Stilllegung des kleinen Steinkohlekraftwerks im Jahr 2005 ist nicht möglich, da es zum Ausgleich der Nachfrageschwankungen benötigt wird. Der Rückgang der Gesamtkapazitäten von 2018 bis 2023 erklärt sich durch denselben Zusammenhang, wobei hier neben einem Kernkraftwerk auch zwei Braunkohlekraftwerke ersetzt werden müssen.



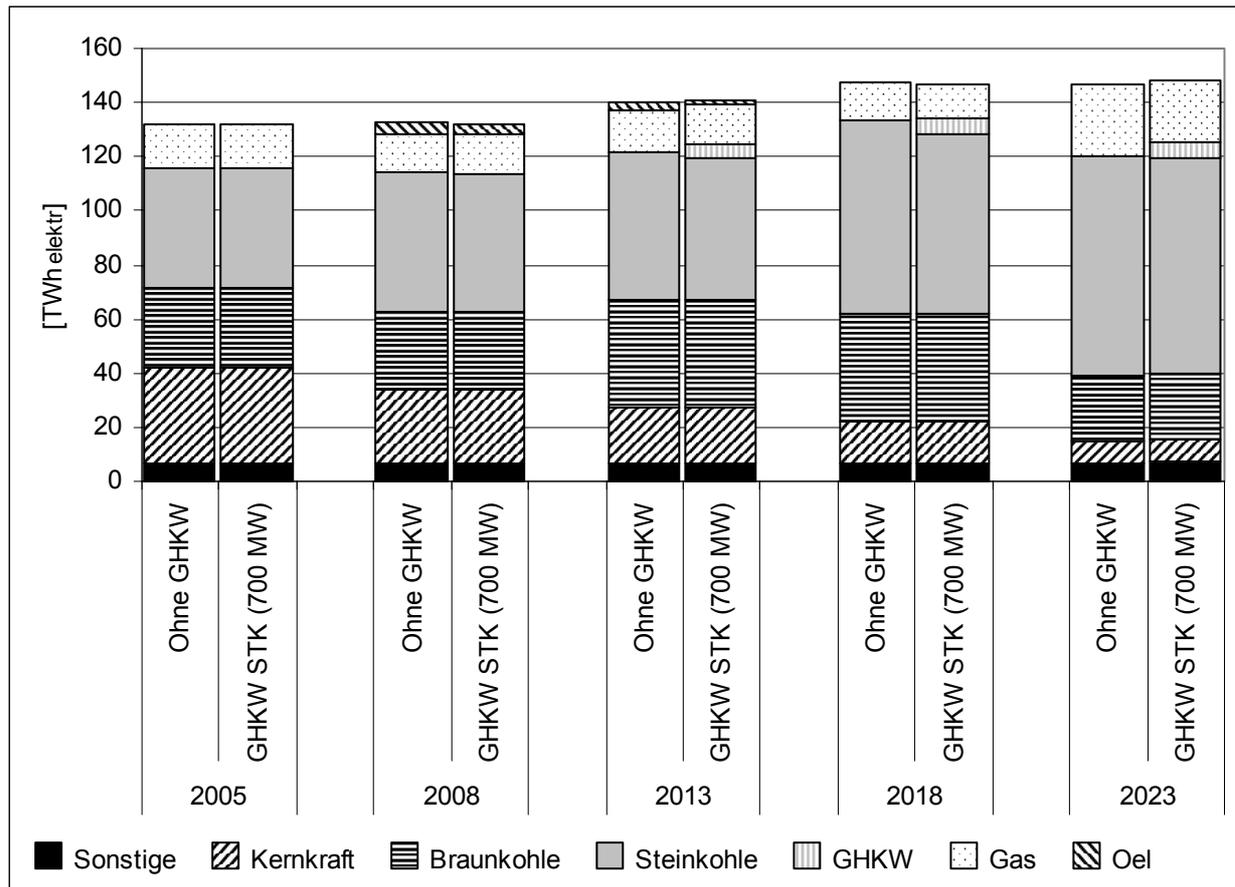
**Abbildung 8:** Struktur des Kraftwerksparks im Zeitverlauf

Hinsichtlich der unter Sonstige zusammengefassten Energieträger (wie z.B. Wasserkraft) bleiben die installierten Kapazitäten weitgehend konstant. Lediglich in der letzten Periode findet eine leichte Erhöhung dieser Kapazitäten um ca. 200 MW<sub>elektr</sub> statt, wobei zwei zusätzliche Wasserkraftwerke mit jeweils ca. 100 MW<sub>elektr</sub> zugebaut werden. Entsprechend den politischen Vorgaben ist die aus Kernkraft produzierbare Strommenge begrenzt, und die Kernkraftwerke werden über den Betrachtungszeitraum sukzessive stillgelegt. Während zu Beginn des Betrachtungszeitraums die installierte Leistung der Kernkraftwerke ca. 4900 MW<sub>elektr</sub> beträgt,

ist am Ende des Betrachtungszeitraums sowohl mit als auch ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk lediglich noch ein Kernkraftwerk mit ca. 1100 MW<sub>elektr</sub> installierter Leistung in Betrieb. Die installierte Kapazität der Braunkohlekraftwerke ist ebenfalls von der Entscheidung hinsichtlich eines Gemeinschaftsheizkraftwerks unabhängig und nimmt insgesamt über den Betrachtungszeitraum von ca. 3900 MW<sub>elektr</sub> auf 3200 MW<sub>elektr</sub> ab. Bei detaillierter Betrachtung der Braunkohlekapazitäten in den einzelnen Perioden zeigt sich, dass diese im Jahr 2013 um ca. 1500 MW<sub>elektr</sub> ansteigen (Zubau zwei neuer Kraftwerke, altersbedingte Stilllegung einer Bestandsanlage), jedoch im Jahr 2023 um ca. 2200 MW<sub>elektr</sub> sinken (altersbedingte Stilllegung zwei großer Braunkohlenblöcke). Hinsichtlich der ölbefeuerten Kraftwerke ergibt sich ebenfalls sowohl mit als auch ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk ein Rückgang über den Betrachtungszeitraum: Im Jahr 2023 wird ca. die Hälfte der Kapazitäten dieser Anlagen vorzeitig rückgebaut.

Der Rückgang der Kapazitäten der Kernkraftwerke sowie der braunkohle- und ölbefeuerten Kraftwerke wird in erster Linie durch einen kontinuierlichen Zubau von Steinkohle(-heiz-)kraftwerken ausgeglichen. Hinsichtlich dieser Entwicklung bestehen leichte Unterschiede zwischen den Ergebnissen mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk. Während sich in der Periode 2005 die Zubau- und Stilllegungsentscheidungen beider Fälle entsprechen, wird im Jahr 2008 ohne den Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks ein steinkohlebefeuertes Heizkraftwerk mit 100 MW<sub>elektr</sub> beim Stadtwerk zugebaut, mit Gemeinschaftsheizkraftwerk wird in diesem Jahr die gasbefeuerte Zubauvariante mit 45 MW<sub>elektr</sub> gewählt. Der Zubau dieser Kraftwerke wird unter den gegebenen Rahmenbedingungen zwingend notwendig, da im Jahr 2008 jeweils das Heizwerk beim Stadtwerk vorzeitig rückgebaut wird, und ohne das jeweilige neue Kraftwerk die Vorgaben bezüglich der minimalen Eigenerzeugung des Stadtwerks nicht erfüllt werden können. 2013 wird im Fall ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk ein steinkohlebefeuertes Heizkraftwerk mit 100 MW<sub>elektr</sub> zugebaut, mit Gemeinschaftsheizkraftwerk wird diese Gemeinschaftsanlage zusätzlich in dieser Periode installiert. Somit sind 2013 die installierten Steinkohlekapazitäten bei Berücksichtigung des Gemeinschaftsheizkraftwerks ca. 600 MW<sub>elektr</sub> höher als ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk, was durch einen vergleichbaren Unterschied hinsichtlich der installierten Leistung gasbefeuerten Anlagen weitgehend ausgeglichen wird. In Periode 2018 werden sowohl mit als auch ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk die steinkohlebefeuerten Anlagen weiter ausgebaut, wobei sich durch einen stärkeren Ausbau bei Nichtberücksichtigung des Gemeinschaftsheizkraftwerks die Kapazitäten beider Fälle angleichen. In der letzten Periode werden sämtliche dem Flächenversorger noch zur Verfügung stehenden steinkohlebefeuerten Zubauoptionen errichtet, ohne Berücksichtigung des Gemeinschaftsheizkraftwerks wird auch die zweite steinkohlebefeuerte Zubauoption des Stadtwerks mit 45 MW<sub>elektr</sub> in Betrieb genommen. Der starke Anstieg der erdgasbefeuerten Anlagen erklärt sich aus dem Wegfall der Kernkraft- sowie der Braunkohlekraftwerke und einer daraus resultierenden Verschiebung der Einsatzbereiche der Steinkohlekraftwerke. Diese werden ab 2023 verstärkt auch zur Deckung der Grundlast eingesetzt, sodass zur Deckung der vorher nahezu ausschließlich durch diese Kraftwerke befriedigten Mittellast nun auch erdgasbefeuerte GuD-Kraftwerke eingelasst werden.

Abbildung 9 gibt die prognostizierte Stromerzeugung mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk für den Zeitraum 2005 bis 2027 nach Energieträgern gegliedert wieder, deren Entwicklung weitgehend analog zur Entwicklung der installierten Kapazitäten verläuft. Deutlich lassen sich hierbei die sukzessiven Verschiebungen der Anteile einzelner Energieträger an der Gesamtstromerzeugung erkennen.



**Abbildung 9:** Stromerzeugungsstruktur des Gesamtsystems nach Energieträgern

Während der Anteil der sonstigen Energieträger wie beispielsweise Wasserkraft weitgehend konstant bleibt, reduziert sich der Anteil der Kernenergie in Folge des politisch induzierten Kernenergieausstiegs von ca. 36 TWh im Jahr 2005 auf ca. 9 TWh im Jahr 2023 (sowohl mit als auch ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk)<sup>141</sup>. Der Anteil aus Braunkohle erzeugten Stroms ist ebenfalls von der Entscheidung hinsichtlich eines Gemeinschaftsheizkraftwerks unabhängig und beläuft sich in den Jahren 2005 und 2008 auf jeweils ca. 29 TWh, in den Jahren 2013 und 2018 auf ca. 40 TWh und im Jahr 2023 auf ca. 24 TWh. Der Anstieg in den Jahren 2013 und 2018 resultiert aus einem Zubau von zwei Braunkohlekraftwerken im Jahr 2013, die zusätzlich zu den bestehenden Braunkohlekraftwerken betrieben werden. Im Jahr 2023 erreicht ein vor dem Betrachtungshorizont errichtetes Braunkohlekraftwerk

<sup>141</sup> Diese 9 TWh/a in der Periode 2023 bis 2027 entsprechen der noch zur Verfügung stehenden Reststrommenge des Kernkraftwerks, sodass dieses nach 2027 ebenfalls stillgelegt werden müsste.

seine technische Lebensdauergrenze und wird deshalb stillgelegt, weshalb auch die aus Braunkohle erzeugte Strommenge sinkt.

Der Rückgang der aus Kernenergie und Braunkohle erzeugten Strommengen wird unter den gegebenen Rahmenbedingungen primär durch einen Anstieg der Stromerzeugung aus Steinkohle kompensiert. Diese steigt von ca. 45 TWh im Jahr 2005 auf ca. 80 TWh ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk bzw. 85 TWh mit Gemeinschaftsheizkraftwerk an<sup>142</sup>. Die Stromproduktion des Gemeinschaftsheizkraftwerks beträgt ab dem Zubau im Jahr 2013 konstant ca. 5 TWh/a. Die Stromerzeugung aus Erdgas sinkt von ca. 16 TWh/a in der Periode 2005 auf ca. 14 TWh/a (ohne GHKW) bzw. 13 TWh/a (mit GHKW) in der Periode 2018. Der sprunghafte Anstieg der Stromproduktion aus Erdgas im Jahr 2023 liegt analog zur Kapazitätsentwicklung in der vollständigen Ausnutzung der zulässigen Stromproduktion aus Steinkohle begründet. Mittels eines Anstiegs der Stromerzeugung aus Erdöl in den Jahren 2008 und 2013 wird in erster Linie ein Teil des Rückgangs der Stromproduktion aus Erdgas ausgeglichen. Jedoch sinkt die Produktion aus Erdöl bereits 2013, wobei die Produktionsmenge ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk auf ca. 3 TWh/a, bei Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks auf ca. 1,5 TWh/a zurückgeht. Dieser unterschiedliche Rückgang erklärt sich aus den in dieser Periode unterschiedlichen Kapazitäten steinkohlebefeuerter Kraftwerke, mit denen bei Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks der Fehlbetrag von 1,5 TWh/a produziert wird. Ab dem Jahr 2018 wird kein Strom auf der Basis von Erdöl produziert, obwohl aufgrund der Modellvorgaben erst im Jahr 2023 die Hälfte der installierten Kapazitäten der ölbefeuerten Anlagen vorzeitig zurückgebaut werden können. Somit ergibt sich, dass unter der gegebenen Brennstoffpreisentwicklung die Stromproduktion aus Erdgas der Stromproduktion aus Erdöl vorzuziehen ist, da diese Anlagen trotz vorhandener Kapazitäten ab 2018 nicht mehr zur Deckung der Stromnachfrage eingelastet werden.

Hinsichtlich Abbildung 9 ist anzumerken, dass die Gesamtstromerzeugung nicht der Gesamtnachfrage des Systems entspricht, sondern darüber hinaus die frei optimierbare Stromabgabe an Einheiten außerhalb des Systems enthält. Dies erklärt auch die unterschiedliche Gesamtstromerzeugung mit und ohne Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks in den einzelnen Jahren, da bei derselben Gesamtstromnachfrage unterschiedliche Strommengen an Nachfrager außerhalb des Systems abgegeben werden (siehe Tabelle 28).

Der Stromaustausch mit Einheiten außerhalb des Systems liegt in allen betrachteten Perioden unter den in Kapitel 4.5.5 beschriebenen Begrenzungen. Die höchsten Werte werden in der Periode 2018 erreicht: ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk beträgt die gehandelte Strommenge des Flächenversorgers dann ca. 6,8 % seiner Elektrizitätsnachfrage, die des Stadtwerks beträgt ca. 9,5 % seiner Elektrizitätsnachfrage.

---

<sup>142</sup> Dieselbe Tendenz lässt sich auch bei der Wärmeproduktion des Flächenversorgers erkennen. Auf die Veränderungen hinsichtlich der Wärmeproduktion des Flächenversorgers wird nicht näher eingegangen, da aufgrund der deutlichen Unterschiede bezüglich der nachgefragten Energiemengen sämtliche Zubau- und Stilllegungsentscheidungen des Flächenversorgers maßgeblich durch die Stromnachfrage beeinflusst werden.

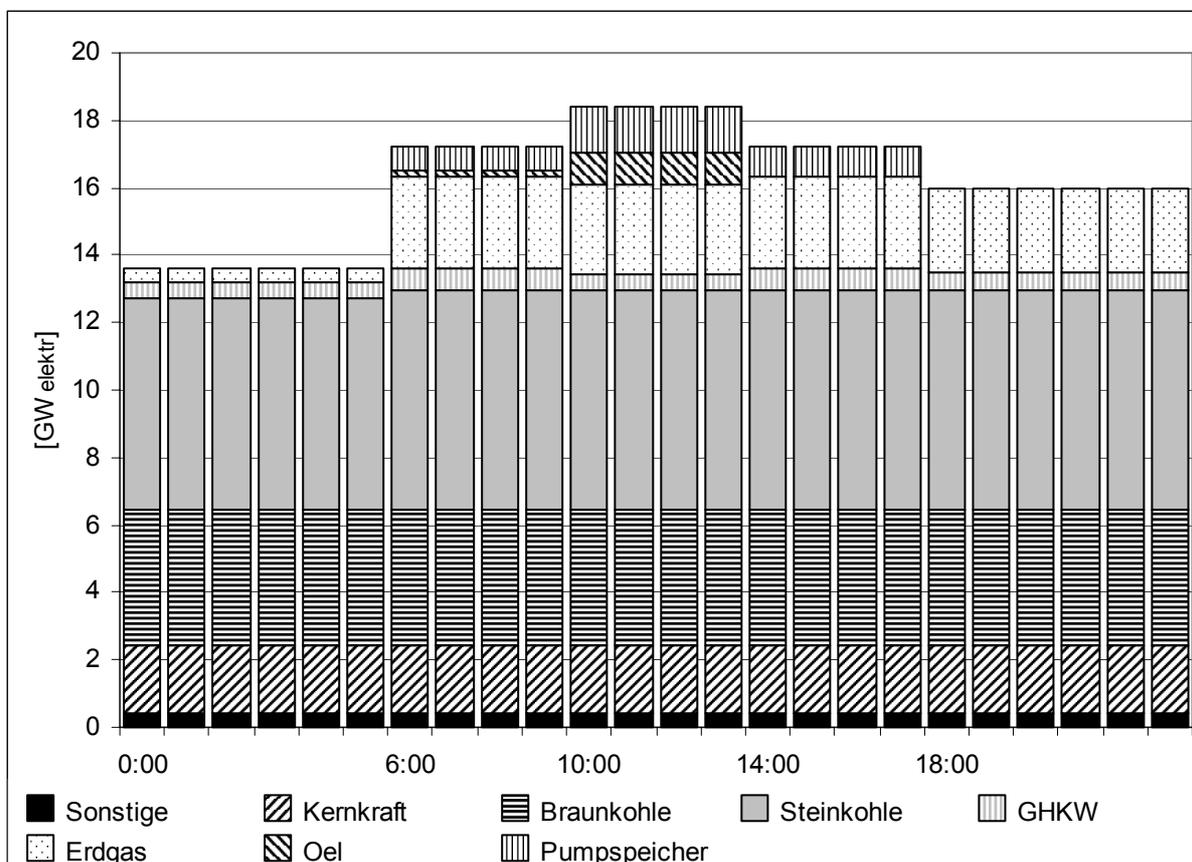
**Tabelle 28:** Stromaustausch mit Einheiten außerhalb des betrachteten Systems (alle Werte wurden auf ein ganzzahliges Vielfaches von 50 gerundet)

	2005		2008		2013		2018		2023	
	ohne GHKW	GHKW STK (700 MW <sub>elektr</sub> )	ohne GHKW	GHKW STK (700 MW <sub>elektr</sub> )	ohne GHKW	GHKW STK (700 MW <sub>elektr</sub> )	ohne GHKW	GHKW STK (700 MW <sub>elektr</sub> )	ohne GHKW	GHKW STK (700 MW <sub>elektr</sub> )
<b>Bezug [GWh<sub>elektr</sub>]</b>										
<b>Flächenversorger</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>1.800</b>	<b>1.600</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>650</b>	<b>650</b>
davon										
Base	300	100	1.800	1.600	0	0	0	0	0	0
Peak	0	0	0	0	0	0	0	0	650	650
<b>Stadtwerk</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>
davon										
Base	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
<b>Verkauf</b>										
<b>Flächenversorger</b>	<b>4.500</b>	<b>4.500</b>	<b>4.100</b>	<b>3.600</b>	<b>6.100</b>	<b>6.500</b>	<b>10.000</b>	<b>8.900</b>	<b>7.000</b>	<b>7.800</b>
davon										
Base	2.800	2.300	3.600	2.800	4.400	4.900	8.300	8.300	5.300	6.500
Peak	1.700	2.200	500	800	1.500	1.600	1.700	600	1.700	700
<b>Stadtwerk</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>
davon										
Base	50	50	50	50	50	50	200	200	200	200
Peak	50	50	50	50	50	50	0	0	0	0
<b>Summe Bezug</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>1.800</b>	<b>1.600</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>750</b>	<b>650</b>
<b>Summe Verkauf</b>	<b>4.600</b>	<b>4.600</b>	<b>4.200</b>	<b>3.700</b>	<b>6.200</b>	<b>6.600</b>	<b>10.200</b>	<b>9.100</b>	<b>7.200</b>	<b>8.000</b>
<b>Saldo</b>	<b>4.200</b>	<b>4.200</b>	<b>2.400</b>	<b>2.100</b>	<b>6.200</b>	<b>6.600</b>	<b>10.200</b>	<b>9.100</b>	<b>6.450</b>	<b>7.350</b>

In der ersten Betrachtungsperiode liegt die Netto-Stromabgabe an Einheiten außerhalb des betrachteten Systems bei ca. 4,2 TWh/a. Aufgrund des Abbaus der Überkapazitäten sinkt die Netto-Stromabgabe in der darauf folgenden Periode auf ca. 2,4 TWh/a mit Gemeinschaftsheizkraftwerk und auf 2,1 TWh/a ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk. In den Folgeperioden steigt der Stromverkauf weiter an (2013: ca. 6,2 TWh/a ohne GHKW, 6,6 TWh/a mit GHKW; 2018: ca. 10,2 TWh/a ohne GHKW, 9,1 TWh/a mit GHKW), wobei aufgrund der steigenden Preise kein Strom von Einheiten außerhalb des Systems bezogen wird. In der letzten Betrachtungsperiode sinkt der Stromverkauf im Vergleich zur vorhergehenden Periode auf ca. 7,2 TWh/a ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk bzw. auf 8 TWh/a mit Gemeinschaftsheizkraftwerk, und es werden ca. 0,75 TWh/a bzw. 0,65 TWh/a zugekauft. Dieser

erneute Strombezug am Ende des Betrachtungszeitraums trotz der deutlich angestiegenen Preise erklärt sich durch den Rückgang der Stromproduktion aus Kernenergie und Braunkohle sowie der u.a. hierdurch bedingten vollständigen Einlastung der Steinkohlekapazitäten. Zur Deckung der Nachfrage in Spitzenlastzeiten müssen dadurch verstärkt Anlagen mit hohen variablen Kosten eingesetzt werden, sodass der Strombezug von Einheiten außerhalb des Systems in den Zeitintervallen mit der höchsten Nachfrage zu insgesamt niedrigeren Ausgaben führt.

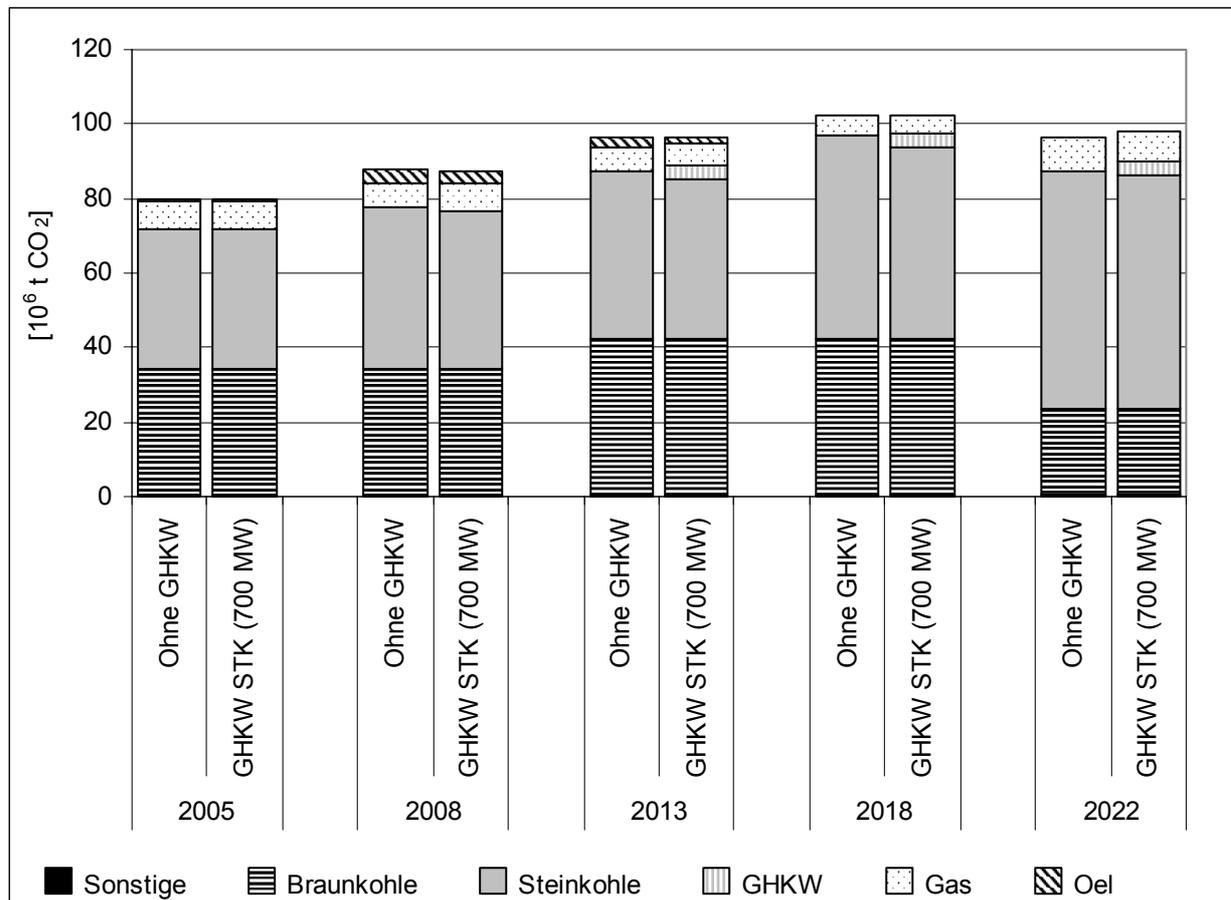
Wie in Kapitel 4.1.2.1 skizziert wurde, übernehmen Kraftwerksanlagen in einem Stromerzeugungssystem teilweise unterschiedliche Aufgaben. An dieser Stelle soll von zu erbringenden Systemdienstleistungen abstrahiert werden, sodass der Fokus auf den unterschiedlichen Lastbereichen liegt, die mittels der unterschiedlichen Anlagen nachgefahren werden müssen.



**Abbildung 10:** Kraftwerkseinsatz zur Stromerzeugung an einem charakteristischen Sommerwerktag im Jahr 2013

Exemplarisch ist in Abbildung 10 der mit dem Modell ermittelte Anlageneinsatz bei Zubau des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerk mit  $700 \text{ MW}_{\text{elektr}}$  für einen charakteristischen Sommerwerktag im Jahr 2013 nach Energieträgern differenziert dargestellt. Kernkraftwerke und Braunkohleanlagen werden zur Deckung der Grundlast eingesetzt. Gemäß den Modellvorgaben werden sie über den Tag mit gleich bleibender Last betrieben. Die Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken unterliegt tageszeitlichen Schwankungen und deckt hierdurch den Großteil der

Mittellast ab. Zur Befriedigung der Mittel- und insbesondere der Spitzenlastnachfrage werden Gaskraftwerke, ölbefeuerte Kraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke eingesetzt.



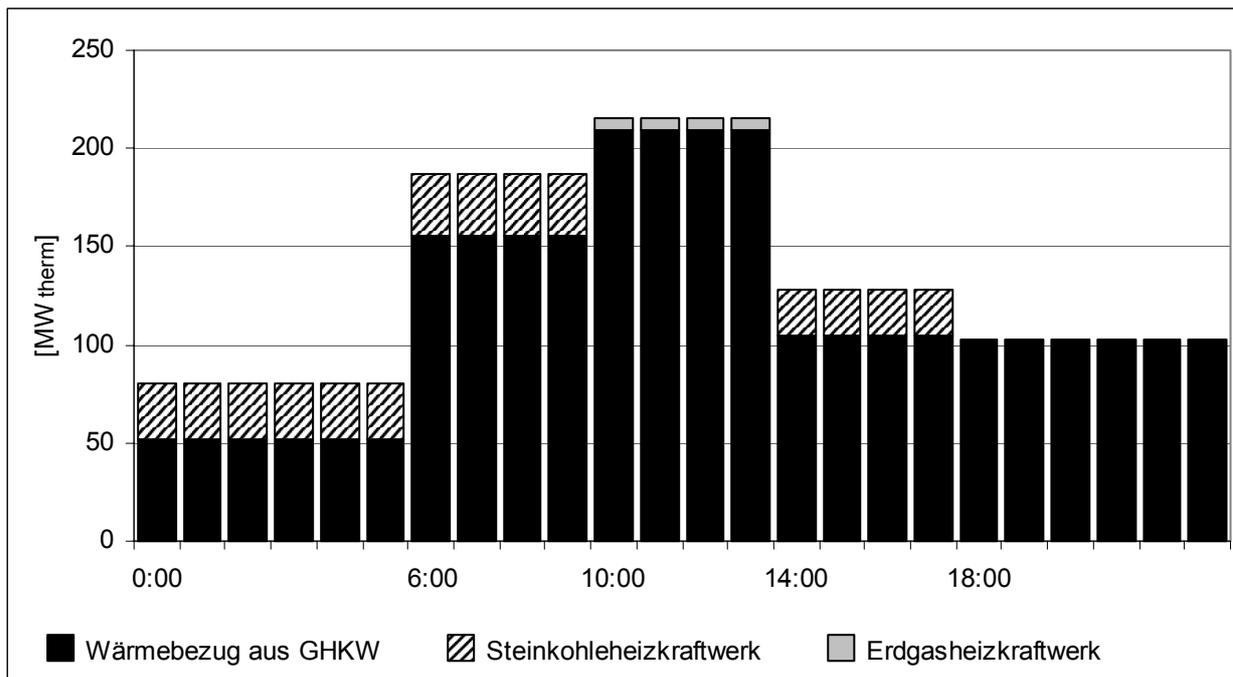
**Abbildung 11:** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Zeitverlauf

Bezüglich der Darstellung der Entwicklung des Gesamtsystems wird in Abbildung 11 die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Die Emissionen steigen von ca. 80 Mio. t CO<sub>2</sub>/a im Jahr 2005 auf ca. 100 Mio. t CO<sub>2</sub>/a in der Periode 2018. In erster Linie entstehen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromproduktion aus Kohle, wobei Braunkohle die höheren spezifischen Emissionen aufweist. Beispielsweise liegt der Anteil der Stromproduktion aus Braunkohle im Jahr 2008 bei ca. 20 %, wodurch ca. 40 % CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Jahr entstehen. Der deutliche Rückgang der Stromproduktion aus Braunkohle in der Periode 2022 führt deshalb auch zu einer leichten Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Aufgrund der im Jahr 2022 etwas höheren Stromerzeugung aus Kohle bei Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks (vgl. Abbildung 9) sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber keinem Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks leicht erhöht.

#### 4.6.2.2 Entwicklung des Stadtwerks

Wie bereits im Rahmen des vorangegangenen Kapitels kurz erläutert wurde, ergibt sich in Abhängigkeit der Zubauentscheidung des Gemeinschaftsheizkraftwerks eine

unterschiedliche Kraftwerksparkstruktur des Stadtwerks. Ohne Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks wird das im Jahr 2008 vorzeitig stillgelegte Heizwerk (95 MW<sub>elektr</sub>) durch ein steinkohlebefeuertes Heizkraftwerk mit 100 MW<sub>elektr</sub> ersetzt. Aufgrund des im Vergleich zum Steinkohlepreis stärker ansteigenden Gaspreises wird das gasbefeuerte Heizkraftwerk des Stadtwerks im Jahr 2013 vorzeitig zurückgebaut. Die steigende Strom- und Wärmenachfrage erfordert im Jahr 2022 einen weiteren Kapazitätsausbau des Stadtwerks, weshalb ein weiteres steinkohlebefeuertes Heizkraftwerk mit 50 MW<sub>elektr</sub> zugebaut wird.

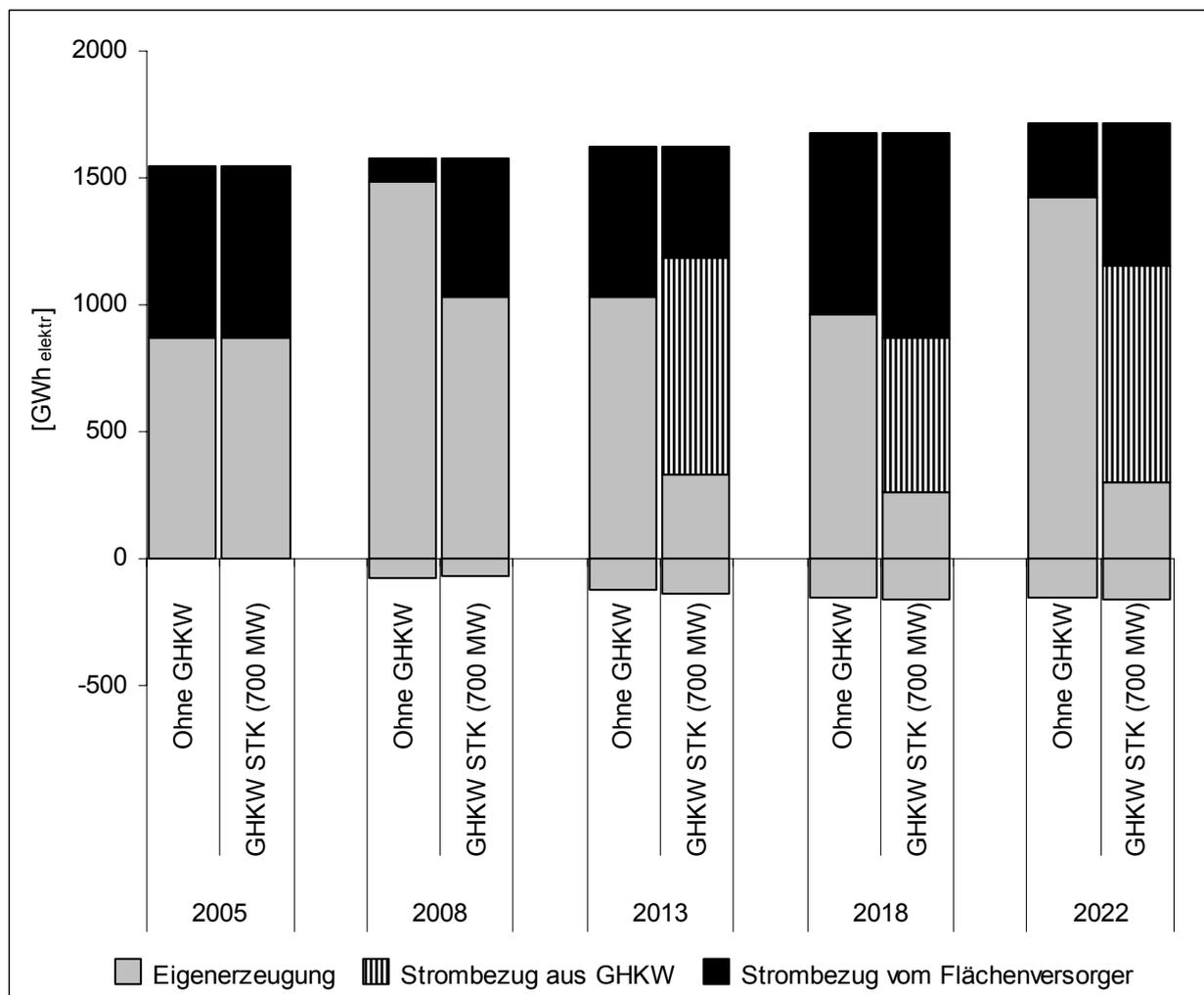


**Abbildung 12:** Einlastung der Wärmbezugsquellen des Stadtwerks an einem charakteristischen Winterwerktag im Jahr 2013

Während bei Zubau des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> dieselben Rückbaumentscheidungen getroffen werden, ergeben sich aufgrund dieser zusätzlichen Bezugsquelle des Stadtwerks andere Zubauentscheidungen. Anstelle des steinkohlebefeuerten Heizkraftwerks mit 100 MW<sub>elektr</sub> wird im Jahr 2008 ein gasbefeuertes Heizkraftwerk mit 45 MW<sub>elektr</sub> errichtet. Die Wahl der gasbefeuerten Anlage (trotz des steigenden Gaspreises) erklärt sich durch die höhere Flexibilität dieser Anlage gegenüber den Steinkohlekraftwerken. Während im Fall ohne Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks mit den beiden kleineren Steinkohlekraftwerken trotz der jeweils vorgegebenen Mindestlast die Strom- und Wärmenachfrage des Stadtwerks entsprechend nachgefahren werden kann, wird zur optimalen Auslastung des Gemeinschaftsheizkraftwerks eine größere Flexibilität bezüglich der Einlastung der Kraftwerke des Stadtwerks erforderlich. Ab dem Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks bezieht das Stadtwerk ca. 35 % der nachgefragten Wärme aus dieser Quelle und die Eigenerzeugung sinkt dementsprechend von 100 % ohne Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks auf ca. 65 %. Beispielhaft ist in Abbildung 12 die Einlastung der verschiedenen Wärmebezugsquellen des

Stadtwerks für einen charakteristischen Wintertag dargestellt. Die optimale Einlastung des Gemeinschaftsheizkraftwerks (sowohl hinsichtlich der Strom- als auch der Wärmeerzeugung) führt dazu, dass zwischen 10.00 und 12.00 Uhr die durch eigene Anlagen des Stadtwerks zu erzeugende Wärmemenge unter der bei Minimallast erzeugten Wärmemenge des Steinkohlekraftwerks liegt.

Eine Übersicht der Entwicklung der unterschiedlichen Nutzung der Elektrizitätsbezugsquellen des Stadtwerks mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerk wird aus Abbildung 13 ersichtlich. Negative Werte stellen hierbei die Elektrizitätsabgabe an Einheiten außerhalb des Systems dar.



**Abbildung 13:** Elektrizitätsquellen des Stadtwerks im Zeitverlauf

Während im Jahr 2005 unabhängig vom späteren Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks jeweils ca. 55 % der Gesamtstromerzeugung in eigenen Anlagen erzeugt wird, ergeben sich im Jahr 2008 bereits deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des späteren Zubaus des Gemeinschaftsheizkraftwerks. Die deutlich höhere installierte Kapazität des Stadtwerks bei keinem Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks führt zu einem Anteil der Eigenerzeugung von ca. 95 %. Demgegenüber werden bei einem späteren Zubau lediglich ca. 65 % in eigenen Anlagen erzeugt, und auch die

Stromabgabe an Einheiten außerhalb des betrachteten Systems liegt geringfügig niedriger. Der Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks im Jahr 2013 führt zu einem weiteren Rückgang der Stromproduktion aus eigenen Anlagen auf ca. 25 % in allen nachfolgenden Perioden. Der Elektrizitätsbezug des Stadtwerks aus dem Gemeinschaftsheizkraftwerk beträgt in den Perioden 2013 und 2022 etwa 50 % der Gesamtstromerzeugung, in der Periode 2018 sinkt dieser Anteil zwischenzeitlich auf ca. 35 %. Dieser Rückgang kommt zustande, da aufgrund der Kraftwerksstruktur in dieser Periode der Flächenversorger eine größere Strommenge aus dem Gemeinschaftsheizkraftwerk bezieht.

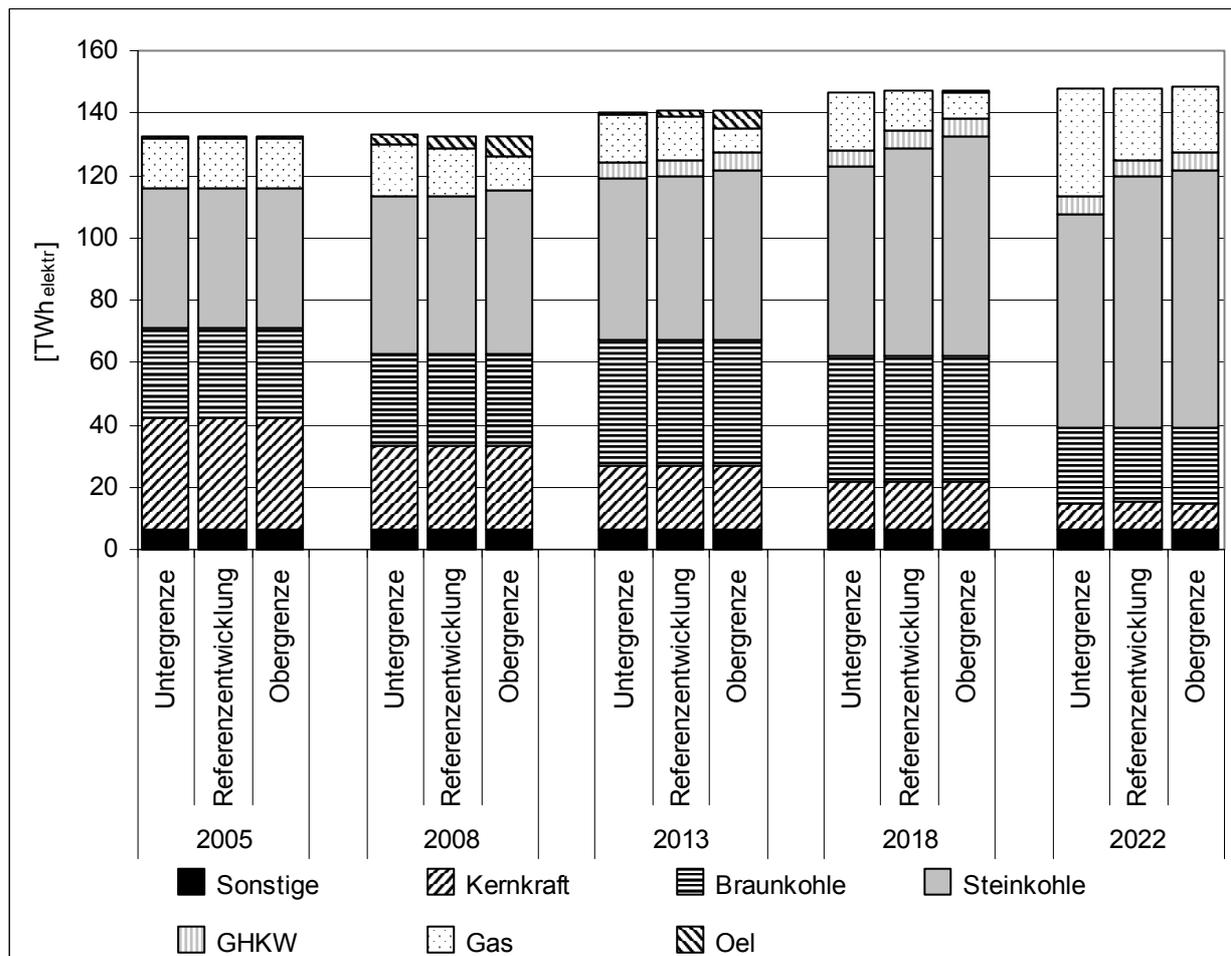
#### 4.6.3 Auswirkungen veränderter Gaspreisentwicklungen

Unabhängig von der Gaspreisentwicklung kann durch den Zubau jedes der analysierten Gemeinschaftsheizkraftwerke eine Reduktion der Gesamtausgaben erzielt werden (siehe Tabelle 29). Bezüglich der gasbefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerke ergibt sich in Abhängigkeit des Gaspreises eine Veränderung der Reihenfolge hinsichtlich ihrer ökonomischen Vorteilhaftigkeit. Bei niedrigem Gaspreis sowie der Referenzentwicklung ergibt das kleinere Heizkraftwerk ein etwas höheres Einsparpotenzial. Eine Gaspreisentwicklung entsprechend der abgeleiteten Obergrenze führt zu einem höheren Einsparpotenzial des größeren gasbefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks, da aufgrund dessen höheren Wirkungsgrads zur Produktion derselben Strommenge ein niedrigerer Brennstoffeinsatz notwendig ist. Während bei allen Gaspreisentwicklungen das Steinkohleheizkraftwerk mit 450 MW<sub>elektr</sub> die schlechteste Zubaulösung darstellt, kann das größte Einsparpotenzial grundsätzlich durch das steinkohlebefeuerte Heizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> erzielt werden. Aus diesem Grund beziehen sich die im Folgenden dargestellten ausgewählten Ergebnisse in Abhängigkeit des Gaspreises wiederum auf den Zubau dieses Heizkraftwerks.

**Tabelle 29:** Übersicht der Gesamtausgaben mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerke in Abhängigkeit der Gaspreisentwicklung

[Mio. €]	ohne GHKW	GHKW 300 MW <sub>elektr</sub> , Erdgas	GHKW 800 MW <sub>elektr</sub> , Erdgas	GHKW, 700 MW <sub>elektr</sub> , Steinkohle	GHKW, 450 MW <sub>elektr</sub> , Steinkohle
Untergrenze	36.370	36.280	36.290	36.220	36.310
Referenzentwicklung	36.560	36.460	36.470	36.390	36.490
Obergrenze	36.800	36.680	36.660	36.600	36.700

In Abbildung 14 wird die prognostizierte Stromerzeugung bei Zubau des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> für die unterschiedlichen Gaspreise nach Energieträgern differenziert wiedergegeben. Auch hier zeigt sich die sukzessive Verschiebung der Anteile der einzelnen Energieträger an der Gesamtstromerzeugung über den Zeitverlauf. Darüber hinaus lässt sich der Einfluss des Gaspreises auf diese Entwicklung deutlich erkennen.



**Abbildung 14:** Stromerzeugungsstruktur des Gesamtsystems nach Energieträgern bei unterschiedlichen Gaspreisentwicklungen

Hinsichtlich der Erzeugung von Grundlaststrom in Kernkraftwerken und Braunkohleanlagen ergeben sich keine Veränderungen durch unterschiedliche Gaspreise. Maßgeblich beeinflusst wird demgegenüber neben der Produktion aus Erdgas die Einlastung der steinkohle- und ölbefeuerten Anlagen. Bei niedrigem Gaspreis wird insbesondere am Ende des Betrachtungszeitraums zunehmend nicht nur Spitzenlaststrom sondern auch Mittellaststrom aus gasbefeuerten Anlagen erzeugt. Dies führt zu einer Verdrängung der Stromproduktion aus Steinkohle, die bei hohem Gaspreis nahezu ausschließlich die Mittellaststromproduktion abdeckt. Entsprechend werden auch ölbefeuerte Kraftwerke zur Spitzenlastabdeckung vornehmlich bei hohem Gaspreis eingesetzt, während bei niedrigem Gaspreis die Produktion in diesen Anlagen bereits in der Periode 2013 fast vollständig durch gasbefeuerte Anlagen ersetzt wird.

Obwohl die unterschiedlichen Gaspreisentwicklungen einen starken Einfluss auf die Stromproduktion aus Steinkohle aufweisen, ergeben sich hinsichtlich des Gemeinschaftsheizkraftwerks lediglich geringfügige Unterschiede. Unabhängig von der Gaspreisentwicklung wird das steinkohlebefeuerte Gemeinschaftsheizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> in Periode 2013 zugebaut, und ab diesem Zeitpunkt werden ca. 5 TWh Strom pro Jahr im Gemeinschaftsheizkraftwerk erzeugt. Somit hat eine

unterschiedliche Gaspreisentwicklung innerhalb des identifizierten Preiskorridors keinen Einfluss auf die wesentlichen Ergebnisse bezüglich des Gemeinschaftsheizkraftwerks, weshalb von einer Darstellung weiterer Ergebnisse in Abhängigkeit der unterschiedlichen Gaspreise abgesehen wird.

#### 4.6.4 Auswirkungen der Vorgabe einer minimalen Eigenerzeugung

Ziel der Analyse dieses Szenarios ist zu überprüfen, inwieweit die Vorgabe einer Strategie bezüglich des Eigenerzeugungsanteils der Stadtwerke die Zubauentscheidungen sowie die Kosteneinsparpotenziale der Gemeinschaftsheizkraftwerke beeinflusst. Aus der Übersicht der Gesamtausgaben in Tabelle 30 wird bereits ersichtlich, dass die Auswirkungen dieser Vorgaben auf das Gesamtsystem gering sind. Ist der Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks ausgeschlossen, ergeben sich keine Veränderungen, da das Stadtwerk aufgrund des Fehlens anderweitiger Bezugsquellen hierbei die vollständige Wärmenachfrage aus eigenen Kraftwerken befriedigen muss. Dies wird primär durch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen erzielt, weshalb simultan ein Anteil der Stromnachfrage gedeckt wird, der bereits über den vorgegebenen Mindestanteil hinausgeht. Somit ist die Vorgabe bezüglich einer minimalen Eigenerzeugung bei keinem Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks nicht restriktiv.

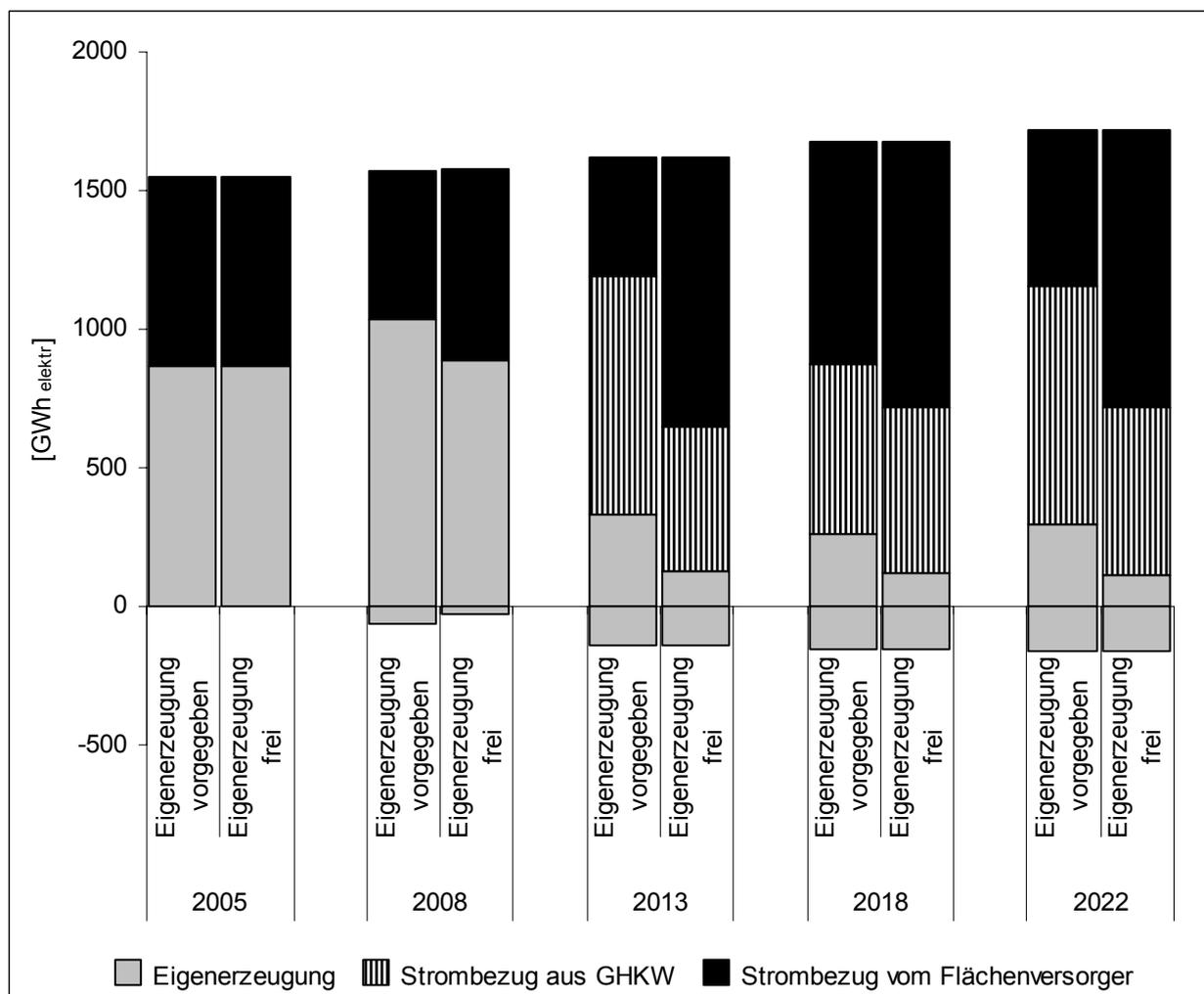
**Tabelle 30:** Übersicht der Gesamtausgaben mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerke in Abhängigkeit der Vorgabe einer minimalen Eigenerzeugung

[Mio. €]	ohne GHKW	GHKW 300 MW <sub>elektr.</sub> Erdgas	GHKW 800 MW <sub>elektr.</sub> Erdgas	GHKW, 700 MW <sub>elektr.</sub> Steinkohle	GHKW, 450 MW <sub>elektr.</sub> Steinkohle
Eigenerzeugung vorgegeben	36.560	36.460	36.470	36.390	36.490
Eigenerzeugung frei	36.560	36.460	36.460	36.380	36.490

Auch bei Zubau der Gemeinschaftsheizkraftwerke ergeben sich durch die Vorgabe einer minimalen Eigenerzeugung lediglich geringe Abweichungen hinsichtlich der Gesamtausgaben, wobei die exakten Zielfunktionswerte bei freier Optimierung der Eigenerzeugung bei allen Gemeinschaftsheizkraftwerken unter den Werten bei vorgegebener Eigenerzeugung liegen. Auch bei Wegfall der Restriktion hinsichtlich der minimalen Eigenerzeugung des Stadtwerks können durch das Steinkohleheizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr.</sub> die größten Einsparungen erzielt werden.

Abbildung 15 zeigt eine Gegenüberstellung der Nutzung der dem Stadtwerk zur Verfügung stehenden Elektrizitätsquellen in Abhängigkeit der Vorgabe einer minimalen Eigenerzeugung des Stadtwerks. Darüber hinaus wird aus dieser Abbildung ersichtlich, dass der Zubauzeitpunkt des Gemeinschaftsheizkraftwerks von der Vorgabe bzw. dem Wegfall der Vorgabe nicht beeinflusst wird. Bezüglich der Nutzung der einzelnen Elektrizitätsquellen ergeben sich ab Periode 2008 deutliche Unterschiede. Ist kein Minimalanteil der Eigenerzeugung vorgegeben, werden dieselben Rückbauentscheidungen getroffen wie mit der Vorgabe, jedoch werden keine Kraftwerke beim Stadtwerk installiert. Gründe hierfür sind zu sehen in der kleineren

Anlagengröße dieser Kraftwerke und den deshalb niedrigeren Wirkungsgraden sowie den höheren Brennstoffpreisen des Stadtwerks. Entsprechend dieser Kapazitätsentwicklung geht die Strom- und Wärmeeigenerzeugung des Stadtwerks im Vergleich zur Vorgabe einer minimalen Eigenerzeugung weiter zurück. Der Strombezug des Stadtwerks aus dem Gemeinschaftsheizkraftwerk liegt ohne die Restriktion hinsichtlich der Eigenerzeugung niedriger, obwohl das Gemeinschaftsheizkraftwerk weiterhin ca. 5 TWh/a Strom erzeugt. Aufgrund des Wegfalls dieser Restriktion kann das Gemeinschaftsheizkraftwerk flexibler eingelastet werden, da die an das Stadtwerk abgegebene Menge nun auch in anderen Anlagen des Flächenversorgers erzeugt werden kann.



**Abbildung 15:** Elektrizitätsquellen des Stadtwerks im Zeitverlauf mit und ohne Vorgabe einer minimalen Eigenerzeugung

#### 4.6.5 Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels

Im Rahmen der Kurzvorstellung des Szenarios mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel in Kapitel 4.6.1 wurde bereits dargelegt, dass der Betrachtungszeitraum in diesem Szenario auf 18 Jahre (2005 bis 2022) verkürzt wurde, um den sich aus dem CO<sub>2</sub>-

Emissionsrechtehandel zusätzlich ergebenden Unsicherheiten Rechnung zu tragen. Zur Darstellung der Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels auf das Gesamtsystem werden in Tabelle 31 deshalb nicht nur die Gesamtausgaben des Systems bei einer Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels wiedergegeben, sondern darüber hinaus die Gesamtausgaben ohne CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel bei verkürztem Betrachtungszeitraum dargestellt. Ein Vergleich der Gesamtausgaben mit und ohne CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel zeigt, dass dessen Einführung zu einer Reduktion der Gesamtausgaben führt. Hieraus lässt sich bereits schließen, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen den betrachteten Unternehmen durch Anpassung ihrer Stromerzeugung ausreichend Zertifikate zur Verfügung stehen, um durch deren Verkauf die Ausgaben zu verringern<sup>143</sup>.

**Tabelle 31:** Übersicht der Gesamtausgaben mit und ohne Gemeinschaftsheizkraftwerke bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels

[Mio. €]	ohne GHKW	GHKW 300 MW <sub>elektr.</sub> , Erdgas	GHKW 800 MW <sub>elektr.</sub> , Erdgas	GHKW, 700 MW <sub>elektr.</sub> , Steinkohle	GHKW, 450 MW <sub>elektr.</sub> , Steinkohle
(Gesamtausgaben ohne CO <sub>2</sub> -Emissionsrechtehandel)	(32.460)	(32.370)	(32.380)	(32.350)	(32.410)
<b>Gesamtausgaben</b>	<b>31.990</b>	<b>31.870</b>	<b>31.740</b>	<b>31.710</b>	<b>31.880</b>
Ausgaben Flächenversorger	31.690	31.430	31.000	31.060	30.990
Ausgaben Stadtwerk	300	180	260	300	240
Ausgaben GHKW	0	260	480	350	650
davon Flächenversorger	0	150	470	310	610
davon Stadtwerk	0	110	10	40	40
Summe Flächenversorger	31.690	31.580	31.470	31.370	31.600
Summe Stadtwerk	300	290	270	340	280

Bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels führen ebenfalls sämtliche analysierten Gemeinschaftsheizkraftwerke zu niedrigeren Gesamtausgaben als getrennte Strategien des Flächenversorgers und des Stadtwerks. Auch in diesem Szenario sind die durch die Gemeinschaftsheizkraftwerke erzielbaren Einsparungen im Vergleich zu den Gesamtausgaben niedrig, da verglichen mit den Ausgaben des insgesamt betrachteten Anlagenparks die durch ein Kraftwerk erzielbaren Einsparungen gering sind.

Ein Vergleich der Einsparpotenziale der jeweiligen Gemeinschaftsanlage zeigt, dass diese bei einer Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels ansteigen. Der

<sup>143</sup> Eine detaillierte Betrachtung der Ausgaben ergibt jeweils, dass die Ausgaben für Brennstoffe sowie die Errichtung und Betrieb der Kraftwerke bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels höher sind als bei Vernachlässigung der Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels.

Grund hierfür liegt u.a. in der bei Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks unternehmensübergreifenden Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionsrechte, während im Falle des Ausschlusses der Gemeinschaftsheizkraftwerke die Emissionsrechte auf Unternehmensebene entsprechend vorgehalten werden müssen und die Rechte stillgelegter Anlagen nicht auf das jeweilige andere Unternehmen übertragen werden können. Dies stellt allerdings eine Vereinfachung der realen Zusammenhänge dar, da generell eine unternehmensübergreifende Übertragung der Rechte stillgelegter Anlagen, also auch mit Einheiten außerhalb des betrachteten Systems, zulässig ist. Die Übertragung der Rechte an Einheiten außerhalb des betrachteten Systems wurde jedoch nicht in die Analysen integriert, da eine Festlegung des Werts dieser Zertifikate problematisch ist. Sie können nicht über den allgemeinen Markt gehandelt werden, sondern nur im Rahmen von bilateralen Übereinkünften der beteiligten Unternehmen. Eine Bewertung anhand des Marktpreises dürfte aufgrund der geringeren Freiheitsgrade der Anbieter somit über dem tatsächlichen Wert dieser Rechte liegen, der im Rahmen der Analysen angenommene Wert von 0 € entspricht jedoch wahrscheinlich ebenfalls nicht der Realität. Somit muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass sich die zusätzlichen Einsparpotenziale maßgeblich auf die Übertragung dieser Zertifikate zurückführen lassen und nicht allein auf die gemeinschaftliche Strom- und Wärmeerzeugung im Gemeinschaftsheizkraftwerk.

Analog zu den Szenarios ohne Integration des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels soll auch hier ein Gemeinschaftsheizkraftwerk zur detaillierten Beschreibung der Ergebnisse ausgewählt werden. Die größten Einsparpotenziale bezüglich der Gesamtausgaben weist wiederum das steinkohlebefeuerte Heizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> auf (220 Mio. €), das niedrigste Einsparpotenzial kann durch Errichtung und Betrieb der Steinkohleanlage mit 450 MW<sub>elektr</sub> realisiert werden. Bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels führt das größere gasbefeuerte Heizkraftwerk zu einer deutlich höheren Ausgabenreduktion als das gasbefeuerte Heizkraftwerk mit 300 MW<sub>elektr</sub>. Dies liegt primär in der unterschiedlichen Kapazitätsentwicklung mit und ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels begründet. Die Möglichkeit, Rechte stillgelegter Anlagen auf neue Anlagen zu übertragen, beeinflusst vorzeitige Stilllegungsentscheidungen. Das kleinere gasbefeuerte Heizkraftwerk wird deshalb im Szenario mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel eine Periode später als im Szenario ohne CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel zugebaut, wodurch sich die hierdurch im Betrachtungszeitraum erzielbaren Kosteneinsparpotenziale verringern.

Auch im Rahmen dieses Szenarios wird das Steinkohleheizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> für die Präsentation der Detailergebnisse ausgewählt, da bei dem Zubau dieses Kraftwerks die niedrigsten Systemausgaben resultieren. Weitere Gründe für dessen Wahl waren, dass bei Errichtung und Betrieb dieses Kraftwerks auch der Flächenversorger das Ausgabenminimum erzielen kann und dem Stadtwerk ca. 10 % der Gesamtausgaben des Gemeinschaftsheizkraftwerks zugewiesen werden können. Bei der zweitbesten Alternative beläuft sich der Anteil des Stadtwerks lediglich auf ca. 2 % der Ausgaben für das Gemeinschaftsheizkraftwerk, sodass aus Sicht des Flächenversorgers hierdurch keine signifikante Reduktion des

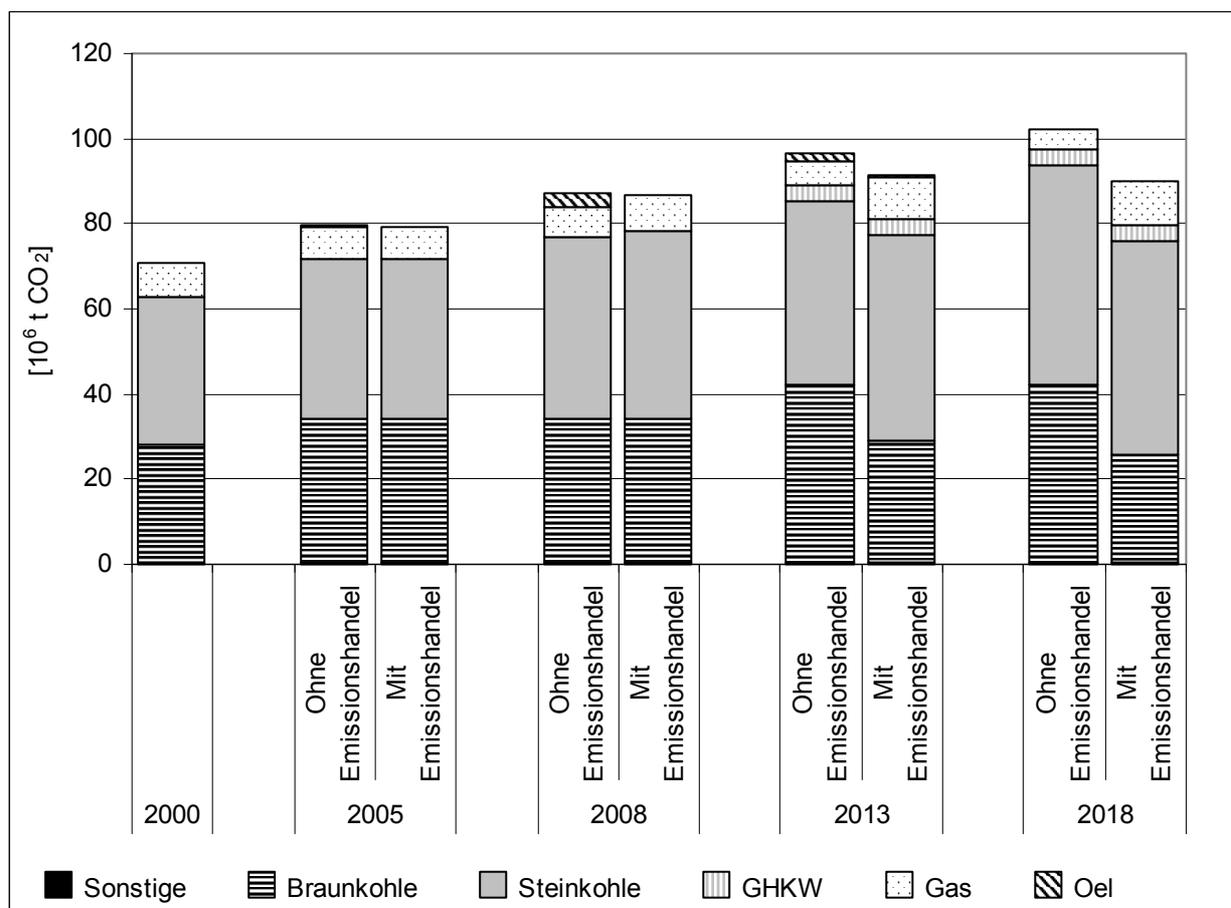
Investitionsrisikos erzielt werden kann. Allerdings muss bei dem steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> berücksichtigt werden, dass dies aus Sicht des Stadtwerks die schlechteste Alternative darstellt. Im Gegensatz zu den anderen drei Zubauoptionen kann das Stadtwerk durch diese Gemeinschaftslösung keine Ausgabenreduktion erzielen, sondern seine Gesamtausgaben erhöhen sich um ca. 40 Mio. €<sup>144</sup>. Da sich die Differenz zwischen der besten und der zweitbesten Lösung aus Sicht des Flächenversorgers jedoch auf ca. 100 Mio. € beläuft und die Differenz zwischen der besten und der schlechtesten Lösung des Stadtwerks lediglich ca. 70 Mio. beträgt, ist hier die Möglichkeit von Kompensationszahlungen gegeben.

In Abbildung 16 ist die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Zubau des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> mit und ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels dargestellt, wobei zusätzlich auch die im Rahmen der Optimierung der Basisperiode ermittelten Emissionen für das Jahr 2000 in die Abbildung integriert wurden. Dieser Vergleich zeigt, dass bei einer Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels weniger CO<sub>2</sub> emittiert wird (2018: ohne CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel ca. 100 Mio. t CO<sub>2</sub>, mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel ca. 90 Mio. t CO<sub>2</sub>), jedoch die Emissionen auch hier im Betrachtungszeitraum ansteigen.

Diese Emissionsminderung stimmt nicht mit der der Zertifikatspreisentwicklung zugrunde gelegten Emissionsminderung überein. Dies liegt u.a. in den unterschiedlichen Annahmen der Modellansätze. Während [Enzensberger 2003] die Höhe der Emissionsminderung exakt vorgibt, ist dies in LINK<sup>opt</sup>-JPP Gegenstand der Optimierung. Zwar zielt der nationale Allokationsplan ebenfalls auf die Erreichung der von [Enzensberger 2003] vorgegebenen Ziele, jedoch ist aufgrund der Wahlmöglichkeit zwischen der Zuteilung auf der Basis historischer Emissionen und der Zuteilung als zusätzliche Neuanlagen eine exakte Vorgabe der Minderung im Modell nicht möglich. Des Weiteren besteht ein maßgeblicher Unterschied hinsichtlich der Art der Emissionsminderung. Die Ergebnisse von [Enzensberger 2003] zeigen einen Anstieg der Stromimporte und einen deutlichen Rückgang der deutschen Stromproduktion. Dies ist im Rahmen von LINK<sup>opt</sup>-JPP nicht im selben Maße möglich, da der Stromfremdbezug von Einheiten außerhalb des Systems aufgrund fehlender Rückkopplung begrenzt wurde. Des Weiteren ergibt sich hier eine Kollision mit den Zuteilungsregeln des deutschen Allokationsplans, da bei Rückgang der Stromproduktion bzw. bei Stilllegung von Anlagen die Anzahl der zugeteilten Rechte verringert wird. Die im nachstehenden dargestellten Ergebnisse sind deshalb grundsätzlich kritisch zu hinterfragen.

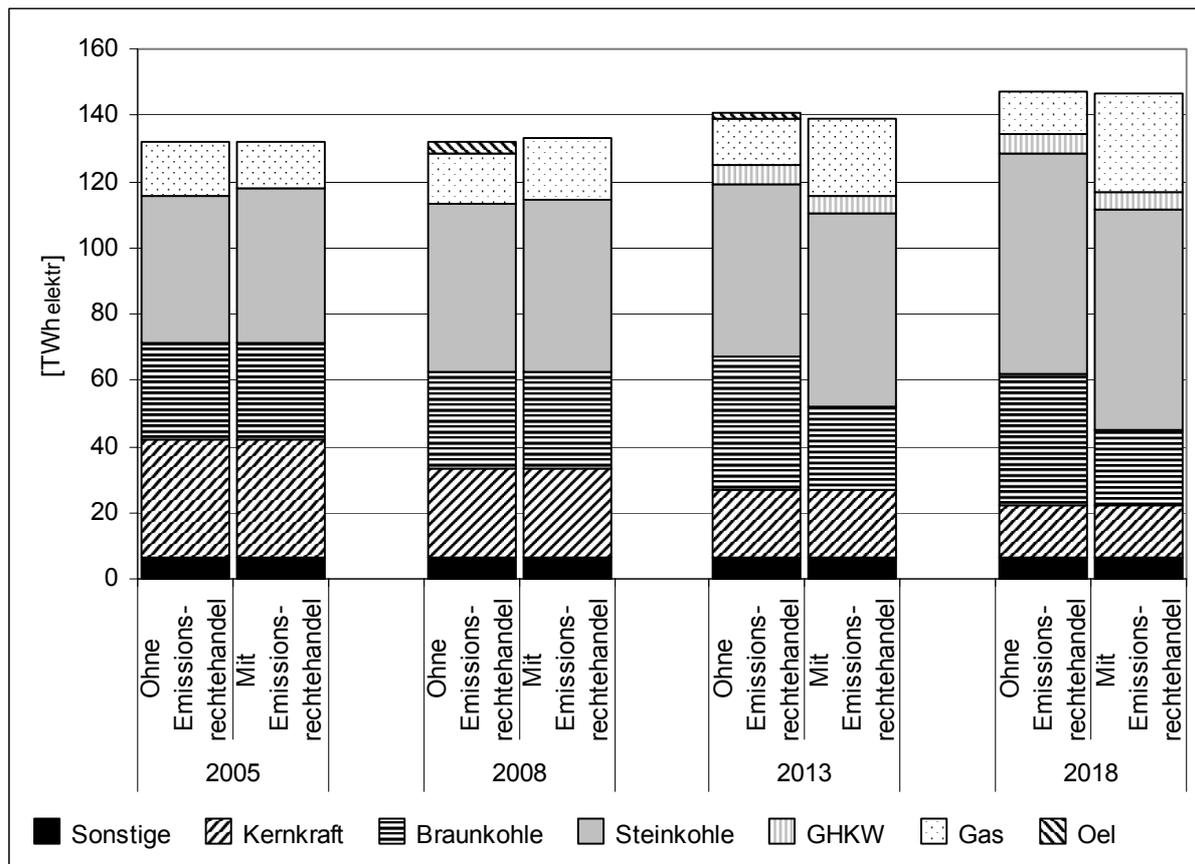
---

<sup>144</sup> Kritisch zu hinterfragen ist in diesem Zusammenhang auch die Kostenaufteilung auf der Basis des Verhältnisses des eingesetzten Brennstoffs, da mögliche Erlöse aufgrund der zusätzlichen Zuteilung von Emissionsrechten für die in dieser Anlage produzierten Wärme für das Stadtwerk nicht gesondert bei der Aufteilung berücksichtigt werden (vgl. zur Kostenaufteilung auch die Ausführungen in Kapitel 6.3.1).



**Abbildung 16:** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit und ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels

Maßgeblicher Unterschied zwischen dem Szenario mit und dem Szenario ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels ist die unterschiedliche in Braunkohleanlagen produzierte Strommenge (siehe auch Abbildung 17), die ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels über dem Betrachtungszeitraum von ca. 30 TWh/a im Jahr 2005 auf ca. 40 TWh/a im Jahr 2018 ansteigt, während sie im Rahmen des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels im Jahr 2018 auf ca. 25 TWh/a reduziert wird. Zudem sinkt die Produktion aus ölbefeuerten Anlagen bereits in den Jahren 2008 bis 2017 deutlich (jeweils unter 0,5 TWh/a), was ebenfalls zu einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Die Stromerzeugung aus Steinkohle wird durch den CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel nur geringfügig beeinflusst, und im Gemeinschaftsheizkraftwerk werden unabhängig vom CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel ab dem Zubauzeitpunkt ca. 5 TWh/a erzeugt. Aufgrund der niedrigeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Gasheizkraftwerke werden diese ab der Periode 2008 bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels verstärkt zur Stromproduktion eingesetzt. Beispielsweise werden in der Periode 2018 ca. 30 TWh/a unter Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels und ca. 15 TWh/a ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels in gasbefeuerten Anlagen erzeugt.

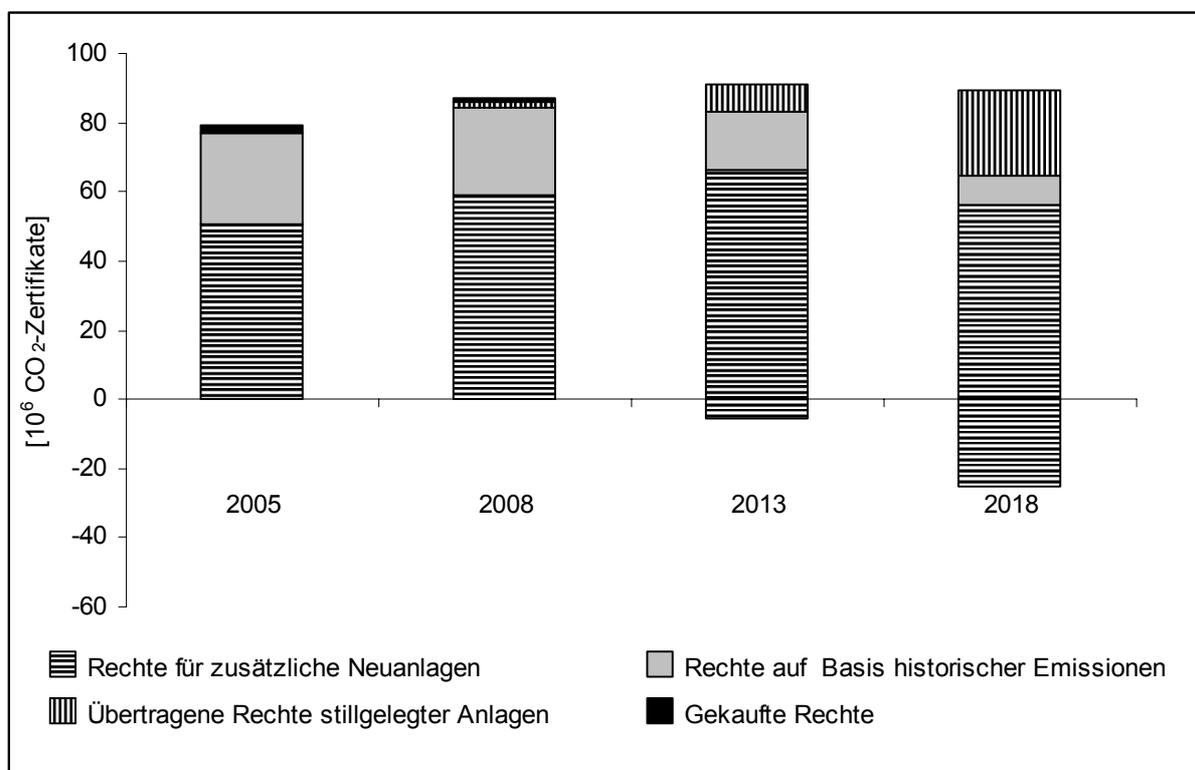


**Abbildung 17:** Stromerzeugungsstruktur des Gesamtsystems nach Energieträgern mit und ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels

Die Herkunft der CO<sub>2</sub>-Zertifikate ist in Abbildung 18 wiedergegeben, wobei negative Werte den Anteil der verkauften Rechte darstellen. Bereits in der Periode 2005 wird die Mehrzahl der Zertifikate als Rechte für zusätzliche Neuanlagen bezogen, da auch für einen Teil der Bestandsanlagen diese Zuteilungsregel gewählt wird. Hierbei lässt sich als Trend ableiten, dass für Anlagen, deren jährliche Stromproduktion im Betrachtungszeitraum gegenüber der Basisperiode deutlich erhöht wird, die Zuteilungsregel für zusätzlich Neuanlagen gewählt wird (dies gilt in besonderem Maße für Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen). Grund hierfür ist die Einschränkung, dass die auf der Basis historischer Emissionen zugeteilten Rechte bei einem Anstieg der Stromproduktion in den entsprechenden Anlagen nicht erhöht werden. Demgegenüber wird für Anlagen, die im Betrachtungszeitraum stillgelegt werden und in der Basisperiode eine hohe Auslastung aufwiesen, vermehrt die Zuteilung auf der Basis historischer Emissionen gewählt, da diese Rechte auf neue Anlagen übertragen werden können.

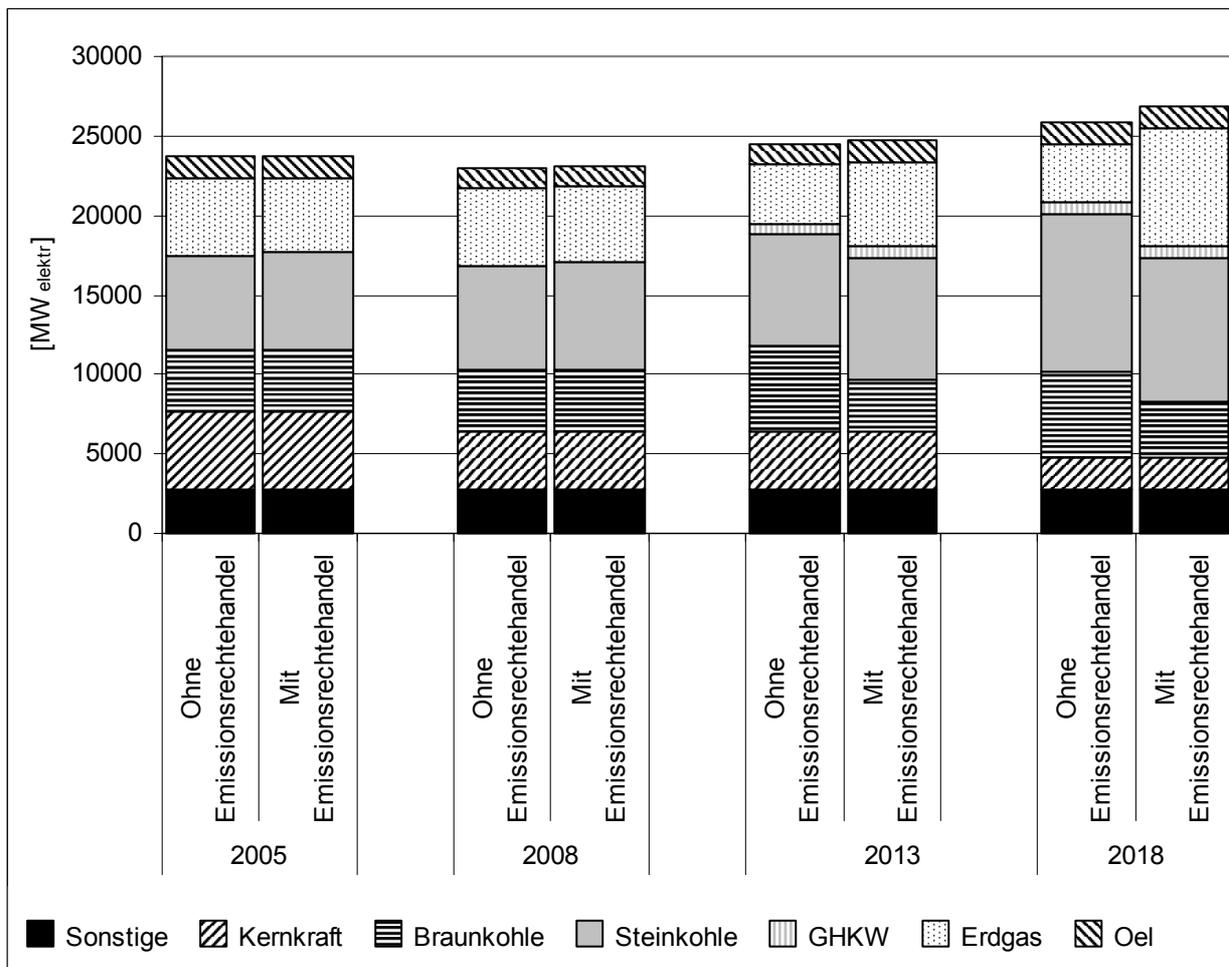
Deutlich wird im Zeitverlauf der Rückgang des Anteils der Emissionsrechte, die auf der Basis historischer Emissionen zugeteilt werden, was aus der sukzessiven Stilllegung der zugehörigen Kraftwerke resultiert. Der Anteil der übertragenen Rechte steigt im Betrachtungszeitraum deutlich an, allerdings wird er in der letzten Periode nahezu vollständig ausgeschöpft. Bei einem Vergleich der Anzahl der Rechte auf Basis historischer Emissionen im Jahr 2005 und der Summe der übertragenen

Rechte wird deutlich, dass letztere höhere Werte aufweisen. Dies ist auf den Modellierungsansatz für historische Emissionen zurückzuführen, da diese Rechte proportional zur Veränderung der Produktionsmenge in den einzelnen Perioden verringert werden. Bei einer Übertragung können demgegenüber alle zugewiesenen Rechte übertragen werden. Da hierbei in erster Linie die Rechte kohlebefeuerter Anlagen auf gasbefeuerte Anlagen übertragen werden, die niedrigere spezifische Emissionen aufweisen und darüber hinaus in der Regel mit einer geringeren Auslastung betrieben werden, können in den Perioden 2013 und 2018 Emissionsrechte verkauft werden. Des Weiteren ergeben sich überschüssige Zertifikate aus der Zuteilung von Zertifikaten für die Produktion von Strom und zusätzlich für die Produktion von Wärme in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen.



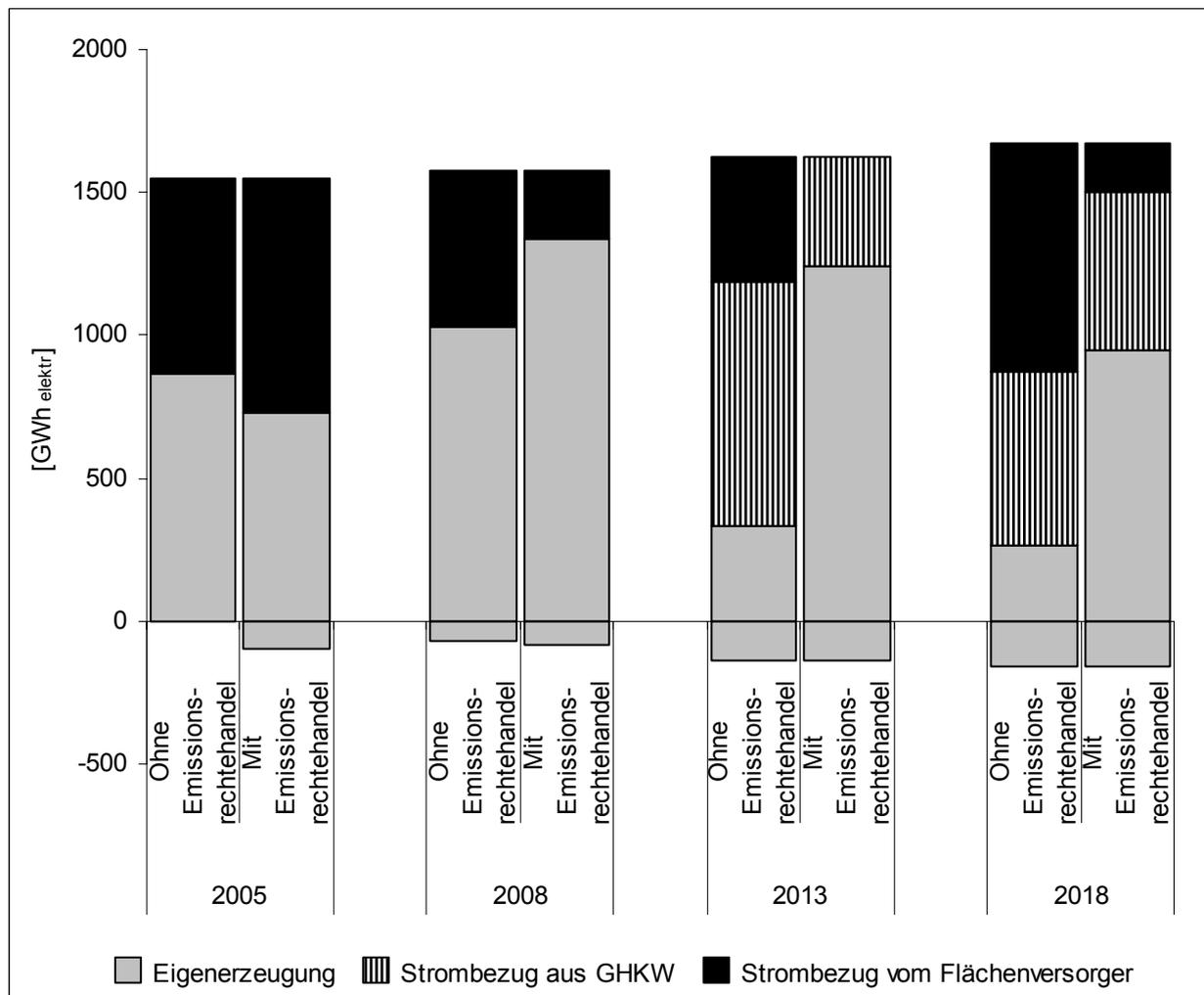
**Abbildung 18:** CO<sub>2</sub>-Zertifikatsquellen im Zeitverlauf

Die installierten Kapazitäten bezüglich der unterschiedlichen Energieträger verändern sich durch die Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels in ähnlicher Weise wie auch die Stromproduktion aus den einzelnen Energieträgern (vgl. Abbildung 19). Anstelle eines Ausbaus der Braunkohlekapazitäten werden diese bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels leicht reduziert (2005: ca. 3900 MW<sub>elektr</sub>, 2018: ca. 3500 MW<sub>elektr</sub>). Diese Abnahme wird durch einen deutlichen Anstieg der installierten gasbefeuerter Anlagen ausgeglichen (2018: ca. 3700 MW<sub>elektr</sub> ohne CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel, ca. 7500 MW<sub>elektr</sub> mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel).



**Abbildung 19:** Struktur des Kraftwerksparks im Zeitverlauf mit und ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandel

Des Weiteren wird aus Abbildung 19 deutlich, dass zum Ersatz von ca. 2700 MW<sub>elektr</sub> braunkohlebefeuerter Anlagen ca. 3700 MW<sub>elektr</sub> gasbefeuerter Anlagen notwendig sind. Dies resultiert aus einer Verschiebung des Einsatzbereiches der verschiedenen Technologien. Aufgrund des Rückgangs der zur Grundlastdeckung eingesetzten Braunkohlekapazitäten werden im Szenario mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel auch steinkohlebefeuerte Anlagen zur Befriedigung der Grundlastnachfrage eingesetzt. Der hohe Zertifikatspreis in der letzten Periode führt jedoch dazu, dass anstelle eines weiteren Zubaus von steinkohlebefeuerter Anlagen Gasturbinen und gasbefeuerte GuDs installiert werden. Diese gasbefeuerter Anlagen werden nun nicht mehr vorwiegend zur Befriedigung der Spitzenlastnachfrage sondern auch verstärkt zur Befriedigung der Mittellastnachfrage eingelastet. Verglichen mit steinkohlebefeuerter Anlagen weisen Gasturbinen jedoch niedrigere elektrische Wirkungsgrade auf, weshalb zur Produktion derselben Strommenge beim Einsatz von gasbefeuerter Anlagen mehr installierte Leistung erforderlich ist. Ein weiterer Grund für den Kapazitätsanstieg ist die Verwendung ganzzahliger Variablen für die Kapazität der Anlagen, da eine stillgelegte Anlage dadurch nicht grundsätzlich durch eine neue Anlage mit exakt derselben Kapazität ersetzt werden kann.



**Abbildung 20:** Elektrizitätsquellen des Stadtwerks im Zeitverlauf mit und ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels

In Abbildung 20 ist der Verlauf der Nutzung der unterschiedlichen Elektrizitätsbezugsquellen des Stadtwerks bei Zubau des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> dargestellt. Während der Wärmebezug des Stadtwerks aus dem Gemeinschaftsheizkraftwerk durch Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels nicht beeinflusst wird (ca. 35 %), liegt der Strombezug vom Flächenversorger und aus dem Gemeinschaftsheizkraftwerk bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels deutlich unter den Werten ohne Berücksichtigung dessen. Die Ursachen hierfür liegen primär im Rückgang der Stromproduktion aus Braunkohlekraftwerken beim Flächenversorger. Diese Stromquelle weist bei Nichtberücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels geringe variable Kosten auf. Durch den CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel erhöhen sich die Kosten der Stromproduktion beim Flächenversorger, sodass die ökonomischen Vorteile des Strombezugs vom Flächenversorger sinken. Ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels wird das gasbefeuerte Heizkraftwerk bereits im Jahr 2013 aus ökonomischen Gründen stillgelegt, während dieses Kraftwerk bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels erst im Jahr 2018 stillgelegt wird.

Dennoch würde bereits dieser Strom- und Wärmebezug vom Flächenversorger und dem Gemeinschaftsheizkraftwerk ausreichen, um die Gesamtausgaben des Stadtwerks gegenüber einem Verzicht auf den Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks deutlich zu verringern. Die Erhöhung der Gesamtausgaben des Stadtwerks ist allein auf eine geringere Anzahl verkaufter Zertifikate in den Perioden 2013 und 2018 zurückzuführen. Ist der Zubau eines Gemeinschaftsheizkraftwerks ausgeschlossen, werden in den letzten beiden Perioden Heizkraftwerke zugebaut, während bei Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks die Stadtwerkskapazitäten nicht weiter ausgebaut werden. Jedoch können bei Zubau der neuen Kapazitäten die Rechte des stillgelegten Kraftwerks im Jahr 2018 auf ein neues, effizienteres Kraftwerk übertragen werden, wodurch ein Überschuss an Emissionsrechten beim Stadtwerk entsteht. Im Falle des Zubaus des Gemeinschaftsheizkraftwerks werden diese Rechte im Jahr 2013 unternehmensübergreifend auf Anlagen des Flächenversorgers übertragen, was bei der Kostenaufteilung zwischen dem Stadtwerk und dem Flächenversorger nicht berücksichtigt wurde. Aufgrund des höheren Zertifikatpreises in der letzten Betrachtungsperiode kommt jedoch insbesondere den in dieser Periode überschüssigen Rechten eine besondere Bedeutung zu.

## 5 Techno-ökonomische Analyse eines unternehmensübergreifenden Systems aus dem Bereich der Entsorgungswirtschaft

Analog zum vorhergehenden Kapitel wird in diesem Kapitel eine Kooperation aus dem Bereich der Entsorgungswirtschaft analysiert. Auch hier werden zu Beginn kurz die Grundlagen der industriellen Abfallentsorgung dargelegt, bevor die Anforderungen an die einzusetzende Methodik abgeleitet werden. Anhand dieser Anforderungen wird die Eignung existierender Modelle zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks diskutiert. Darauf aufbauend wird das mathematische Gleichungssystem der Modellvariante LINK<sup>opt</sup>-WMP beschrieben und das entwickelte Modell kritisch reflektiert. Im Anschluss daran werden der Modellaufbau sowie die verwendete Datenbasis beschrieben. Abschließend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der modellgestützten Analyse vorgestellt. Da diese Ergebnisse aus einer konkreten Untersuchung bei einem Automobilhersteller, dessen Zulieferunternehmen und einem Entsorgungsunternehmen stammen, wurden die Ergebnisse zum Schutz vertraulicher Unternehmensdaten normiert.

### 5.1 Grundlegende Aspekte der industriellen Abfallentsorgung

Abfälle entstehen in allen Bereichen des Wirtschaftsprozesses. Bereits bei der Rohstoffgewinnung fallen Abfälle beispielsweise in Form von Abraum an. Im Rahmen der Produktion entstehen produktionsbedingte Abfälle, die von verschiedenen Faktoren, wie z.B. den verwendeten Rohstoffen, dem Produktionsablauf oder von der Qualifikation der Mitarbeiter abhängen. Darüber hinaus fallen auch bei der Abarbeitung logistischer Prozesse Abfälle in Form von Paletten, Kartons oder Abdeckplanen an (vgl. [Bruns 1997, S. 5 f.]).

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht stellt der Absatz der Endprodukte die letzte Phase des Betriebsprozesses dar. Aufgrund der wachsenden Bedeutung der Entsorgung und der Verantwortung der Unternehmen gegenüber der Umwelt muss jedoch die Entsorgung als neue betriebliche Funktion angesehen werden, wobei unter dem Begriff Entsorgung die „... Verwertung und Beseitigung von Abfällen...“ zu verstehen ist [KrW-/AbfG 1994]. [Domschke 1979, S. 515] fasst den Begriff der Entsorgung weiter, indem er unter Entsorgung „... die Summe aller Tätigkeiten und Maßnahmen zur kontrollierten Abgabe von Residuen an die Umwelt...“ versteht.

Aufgrund einer möglichen Gefährdung der menschlichen Gesundheit und der Umwelt ist die Entsorgungsbranche (ähnlich wie auch der Energiesektor) durch politische Einflussnahmen und staatliche Kontrollbestrebungen gekennzeichnet. Im Folgenden werden ausgewählte Gesetze und Verordnungen<sup>145</sup> sowie deren Bedeutung und Ziele kurz erläutert, bevor im weiteren Verlauf des Kapitels auf die Grundlagen der Entsorgungslogistik eingegangen wird.

---

<sup>145</sup> Zu weitergehenden Inhalten und Erläuterungen der rechtlichen Grundlagen der Abfallwirtschaft wird auf [Schulte 1999], [Engel 2002], [Cosson et al. 2003], [Sparwasser 2003] und [GfU 2004] sowie die jeweiligen Gesetzestexte verwiesen.

### 5.1.1 Rechtsgrundlagen der Entsorgung

Da die Bundesrepublik Deutschland dazu verpflichtet ist, Direktiven der EU in nationales Recht umzusetzen<sup>146</sup>, wird nachstehend kurz auf das Abfallwirtschaftsrecht der Europäischen Gemeinschaft eingegangen. Daran anschließend werden wesentliche Aspekte des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes sowie des Bundes-Immissionsschutzgesetzes skizziert.

#### 5.1.1.1 Abfallwirtschaftsrecht der Europäischen Gemeinschaft

Parallel zum europäischen Umweltrecht hat sich das europäische Abfallwirtschaftsrecht entwickelt. Als erste Umweltrichtlinien wurde die Richtlinie 75/439/EWG [EC 1975a] über die Altölbeseitigung erlassen, die Abfallrahmenrichtlinie 75/442/EWG [EC 1975b] wurde im Jahre 1975 angenommen. Diese Abfallrahmenrichtlinie bestimmt auch heute noch den Rahmen der europäischen Abfallwirtschaftsgesetzgebung. Weitere wichtige Regelungen betreffen u.a. die Entsorgung gefährlicher Abfälle (91/689/EWG, [EC 1991]) und die grenzüberschreitende Verbringung von Abfällen (Verordnung (EWG) Nr. 259/93, [EC 1993]).

Die Gemeinschaftsstrategie der Europäischen Kommission von 1989 nennt als Ziel der gemeinschaftlichen Abfallwirtschaftspolitik das Erreichen eines hohen Umweltschutzniveaus, wobei das Funktionieren des Europäischen Marktes nicht behindert werden darf. Die Rangordnung in dieser Strategie legt als primäres Ziel die Vermeidung oder Verringerung der Erzeugung von Abfällen und die Minimierung ihrer Gefährlichkeit fest. Dennoch auftretende Abfälle sollen vorrangig einer Verwertung zugeführt werden. Sind Vermeidung und Verwertung nicht möglich, soll eine umweltfreundliche Beseitigung durchgeführt werden. Eine wichtige Verpflichtung kommt hierbei den Abfallerzeugern zu, die für den sachgerechten Umgang mit den Abfällen verantwortlich sind. Laut dieser Strategie sollen zur Umsetzung der Abfallpolitik - neben Rechtsvorschriften - Umweltvereinbarungen und Umweltsteuern eingesetzt werden (vgl. [Bergthaler et al. 2001, S. 2 f.]).

Die Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft beinhaltet wesentliche Begriffsbestimmungen für das gesamte Abfallwirtschaftsrecht. Des Weiteren wird in dieser Richtlinie die Rangordnung Verhüten oder Verringern von Abfällen vor deren Verwertung oder Nutzung zur Energiegewinnung gefordert. Die Wirksamkeit dieser Stufenordnung ist dadurch eingeschränkt, dass die entsprechenden Maßnahmen laut diesem Artikel lediglich zu fördern, nicht jedoch sicherzustellen sind, womit dieser Bestimmung nur ein Leitcharakter zukommt. Hinsichtlich der Verwertung und Abfallbeseitigung legt die Richtlinie fest, dass diese ohne Gefährdung der menschlichen Gesundheit und ohne Schädigung der Umwelt durchzuführen sind. Darüber hinaus schreibt die Abfallrahmenrichtlinie jedem Abfallbesitzer vor, die Abfälle einem Sammel- oder sonstigen Entsorgungsunternehmen zu überlassen, sofern er nicht in

---

<sup>146</sup> Grundsätzlich müssen Richtlinien der Europäischen Gemeinschaft innerhalb einer vorgegebenen Frist in den Mitgliedstaaten in nationales Recht umgewandelt werden. Bei Abfallrichtlinien beträgt diese Frist im Allgemeinen zwei Jahre. Wird diese Frist versäumt, so gilt die Richtlinie unmittelbar (vgl. [Jansen et al. 1998, S. 1 ff]).

der Lage ist, die Abfälle unter Einhaltung der Bestimmungen selbst zu entsorgen (vgl. [EC 1975b]).

Eng mit den in der Abfallrahmenrichtlinie enthaltenen Begriffsbestimmungen verbunden ist die Entscheidung 2000/532/EG [EC 2000a], die ein einheitliches europäisches Abfallverzeichnis vorsieht<sup>147</sup>. In Deutschland wurde diese Entscheidung durch die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (AVV – Abfallverzeichnis-Verordnung) umgesetzt. Diese Verordnung legt die Bezeichnung eines Abfalls fest und stuft die Abfälle hinsichtlich ihrer Überwachungsbedürftigkeit ein. Mittels der Anlage dieser Verordnung werden allen Abfällen sechsstellige Schlüsselnummern zugewiesen, wodurch die Abfälle bestimmten Gruppen zugeordnet werden. Dies ermöglicht eine eindeutige Begriffsbestimmung eines Abfalls, sodass eine Verständigung zwischen Abfallerzeuger und Entsorger möglich wird [AVV 2001].

### **5.1.1.2 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)**

Seit dem 7. Oktober 1996 gilt in der Bundesrepublik das „Gesetz zur Förderung einer abfallarmen Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Entsorgung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG)“ [KrW-/AbfG 1994], welches das bis dahin geltende „Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz – AbfG)“ vom 27. August 1986 ablöste. Ziel des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes ist die Förderung einer rückstandsarmen Kreislaufwirtschaft. Des Weiteren soll durch das Gesetz eine Harmonisierung einerseits zwischen Abfallgesetz und Immissionsschutz-Gesetz und andererseits zwischen deutschem Abfallrecht und EU-Bestimmungen erreicht werden. Durch die Integration der Produktverantwortung in wirtschaftliche Entscheidungsprozesse soll das marktwirtschaftliche Eigeninteresse, das damit verbundene Ideenreichtum und die Kreativität von Wirtschaft und Gesellschaft gefördert werden (vgl. [Penkuhn 1997, S. 8 ff.] und [Jansen et al. 1998, S. 3 ff.]).

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz verfolgt zwei Ziele. Zum einen soll die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen gefördert, zum anderen die umweltverträgliche Beseitigung von Abfällen gesichert werden (§ 1 KrW-/AbfG). Ebenso wie im Abfallgesetz von 1986 sind auch im KrW-/AbfG die Pflichten zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen definiert. Zusätzlich wird im KrW-/AbfG der Begriff der Kreislaufwirtschaft eingeführt, unter dem die Gesamtheit der Möglichkeiten (technische, ökonomische, ökologische), Abfälle zu vermeiden und Sekundärrohstoffe zu verwerten, zusammengefasst wird. Nach § 4 (1) KrW-/AbfG sind Abfälle in erster Linie zu vermeiden, in zweiter Linie stofflich oder energetisch zu verwerten und in dritter Linie zu beseitigen (§ 11 (1) KrW-/AbfG)<sup>148</sup>. Als Maßnahmen

---

<sup>147</sup> Das europäische Abfallverzeichnis ersetzte am 1.1.2002 den bis dahin geltenden Europäischen Abfallkatalog (EAK).

<sup>148</sup> Stellt die Beseitigung von Abfällen jedoch gegenüber der Verwertung die umweltfreundlichere Lösung dar, so entfällt der Vorrang der Verwertung vor der Beseitigung (§ 5 (5) KrW-/AbfG). Zur Beurteilung der umweltfreundlicheren Lösung sind besonders die zu erwartenden Emissionen, das Ziel der Schonung der natürlichen Ressourcen, die einzusetzende oder zu gewinnende Energie und die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, Abfällen zur Verwertung oder daraus gewonnenen Erzeugnissen zu berücksichtigen. Grundsätzlich sind stoffliche und

zur Vermeidung von Abfällen gelten insbesondere die anlageninterne Kreislauf-führung von Stoffen, die abfallarme Produktgestaltung sowie ein auf den Erwerb abfall- und schadstoffarmer Produkte gerichtetes Konsumverhalten (§ 4 Abs. 2 KrW-/AbfG).

Der Abfallbegriff des KrW-/AbfG ist wesentlich umfassender als der des abgelösten Abfallgesetzes: Abfälle im Sinne des KrW-/AbfG sind „alle beweglichen Sachen, die unter die in Anhang I aufgeführten Gruppen fallen und deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“ (§ 3 (1) KrW-/AbfG). Dabei bedeutet der Begriff Entledigung, dass die Sache einer Verwertung oder Beseitigung zugeführt wird (vgl. [Brenck 1996, S. 29]). Unter Anhang I werden, aufgeteilt in 16 Abfallgruppen, dazugehörige Stoffe und Produkte genannt. Da zur Gruppe Q16 die Stoffe und Produkte gehören, die nicht in einer anderen Gruppe erwähnt werden, wird der Abfallbegriff auf alle beweglichen Sachen ausgedehnt [KrW-/AbfG 1994].

Im KrW-/AbfG wird der Begriff der Abfallentsorgung definiert als „Verwertung und Beseitigung von Abfällen“ (§ 3 (7) KrW-/AbfG). Demnach erstreckt sich der Entsorgungsbegriff auf drei verschiedene Handlungen: die Einsammlung und Beförderung der Abfälle, die Abfallumwandlung in verwertbare Materie und die kontrollierte Abfallabgabe an die Umwelt (vgl. [Souren 1996, S. 14 f.]). Hinsichtlich der Entsorger werden im Krw-/AbfG öffentlich-rechtliche (kommunale) und private (gewerbliche) Entsorgungsträger differenziert. In den §§ 11-15 KrW-/AbfG wird die jeweilige Zuständigkeit für die Abfallentsorgung bestimmt und in den entsprechenden Landesabfallgesetzen konkretisiert.

### **5.1.1.3 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)**

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz dient zur Umsetzung der Richtlinien 96/82/EG zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen [EC 1996b] und 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte [EC 1997b].

Zweck des BImSchG ist „Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen und, soweit es sich um genehmigungsbedürftige Anlagen handelt, auch vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen, die auf andere Weise herbeigeführt werden, zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen“ [BImSchG 1990]. Demnach hat das BImSchG zusammen mit den Landesgesetzen und Rechtsverordnungen die Aufgabe, Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge zu begrenzen (vgl. hierzu auch [Rinschede et al. 1992, S. 85]).

---

energetische Verwertung gleichrangig, jedoch sind an die Zulässigkeit der energetischen Verwertung bestimmte Anforderungen geknüpft (§ 6(2) KrW-/AbfG). Beispielsweise muss der Heizwert des einzelnen Abfalls mindestens 11.000 kJ/kg betragen und ein Feuerungswirkungsgrad von mindestens 75 % erzielt werden. Werden diese in § 6 (2) KrW-/AbfG genannten Kriterien nicht erfüllt, so ist die stoffliche Verwertung zu bevorzugen (vgl. hierzu auch [Kloepfer 1998]).

Während das KrW-/AbfG stoffbezogene Vorschriften enthält, beinhaltet das BImSchG anlagenbezogene Regelungen. Das BImSchG regelt die Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb bestimmter Anlagen (§ 4ff BImSchG), worunter auch Abfallentsorgungsanlagen fallen. Neben den Genehmigungsverfahren (§ 6 ff BImSchG), werden Mitteilungs- und Anzeigenpflichten (§ 44ff BImSchG) festgelegt. Des Weiteren werden im BImSchG die Ermittlung von Emissionen und Immissionen sowie sicherheitstechnische Prüfungen gesetzlich geregelt (vgl. [Plümer et al. 1995, S. 4] und [Henkel 1996, S. 17]).).

### 5.1.2 Funktionen der betrieblichen Entsorgungslogistik

Die Hauptaufgaben der Entsorgungslogistik bestehen in der Bewältigung der folgenden Aufgaben (vgl. [Bruns 1997, S. 18 f.]):

- Übertragung logistischer Methoden und Handlungsmaxime auf die betriebliche Entsorgung,
- Entwicklung systemübergreifender Maßnahmen zur Koordination zwischen Entsorgung und anderen Unternehmensbereichen,
- Festlegung der Rahmenbedingungen für die zur Entsorgung notwendige raumzeitliche Transformation sowie Mengen-, Sorten- und Stoffänderung der Abfälle,
- Gestaltung, Steuerung, Regelung und Handhabung der zur Entsorgung der anfallenden Abfälle notwendigen Aktivitäten,
- Gestaltung logistischer Ketten und
- Informationserhebung und –verarbeitung.

Bei der Umsetzung dieser Anforderungen bedient sich die Entsorgungslogistik der vier nachstehenden Prozesse, die je nach Ausprägung zur Differenzierung von Entsorgungslogistiksystemen herangezogen werden können:

- **Sammlung und Sortierung:**  
Während im Bereich der Versorgung die Stoffe an der Quelle gemäß den Anforderungen der Kunden konditioniert werden, fallen die Abfälle an der Quelle meist in vermischter Form an. Demgegenüber fordern die Abfallsenken möglichst homogene Reststoffe, weshalb im Verlauf der Entsorgung meist eine Sortierung der Abfälle erforderlich ist (vgl. [Stölzle 1993, S. 239]).
- **Transport:**  
Für Nahtransporte wird überwiegend der Verkehrsträger Straße genutzt, für Ferntransporte zusätzlich Wasser und Schiene. Seit einigen Jahren kann das Bestreben festgestellt werden, vermehrt große zentrale Beseitigungs- und Verwertungsanlagen anzufahren, um die Emissionen, die mit der Errichtung und dem Betrieb von Entsorgungsanlagen entstehen, zu vermeiden. Die hieraus resultierende Erhöhung der Transportentfernung soll durch größere Transporteinheiten kompensiert werden<sup>149</sup>. Darüber hinaus gilt für durchzuführende Transporte allgemein die Zielsetzung einer optimalen Routenplanung mit möglichst wenig Leerfahrten (vgl. [Pfohl 1991, S. 644 ff.]).

---

<sup>149</sup> Vgl. [Pfohl 1991, S. 644 ff.], [Plümer et al. 1995, S. 78 f.] und [Jansen et al. 1998, S. 52].

- Lagerung und Umschlag:  
Im Bereich der Entsorgungslogistik ist die Pufferfunktion der Lagerung von besonderer Bedeutung, denn anfallende Rückstände werden in der Regel vom Zeitpunkt ihres Anfalls bis zu ihrem Abtransport zwischengelagert, um ökonomisch sinnvolle Transporteinheitsgrößen zu realisieren. Beim Umschlag werden entweder mehrere Rückstandsmengen zusammengefasst, oder ein Rückstandsgebilde wird durch Verlade-, Umlade-, oder Entladeprozesse aufgelöst (vgl. [Bruns 1997, S. 29]). Der Umschlagprozess findet beim Wechsel von Transportmitteln und bei der Zwischenlagerung der Abfälle in Behandlungsanlagen, sowie am Ort der Entstehung von Abfällen statt (vgl. [Bilitewski et al. 1994, S. 66 ff.]).
- Behandlung:  
Bei der Behandlung der angefallenen Abfälle wird eine Stoffumwandlung durch physikalische, chemische, biologische oder thermische Einwirkungen hervorgerufen. Hieraus resultiert in der Regel eine Mengenveränderung zwischen an- und abtransportierter Menge (vgl. [Bruns 1997, S. 30]).  
Die Behandlung der Abfälle ist der anspruchsvollste Prozess der Entsorgungslogistik, was sich bereits an der Vielzahl und der Unterschiedlichkeit der Verfahren zeigt (bspw. Verbrennung, Pyrolyse, Hydrierung, Vergärung, Destillation, Zerkleinerung, Sortierung, Klassierung, Verdichten). Des Weiteren kann die Zusammensetzung der Abfälle starken Schwankungen unterliegen (insbesondere Hausmüll), weshalb häufig hohe Anforderungen an die Flexibilität der Verfahren gegenüber Veränderungen der Abfallzusammensetzung gestellt werden. Da eine Erläuterung der Abfallbehandlungsverfahren nicht zum Verständnis dieser Arbeit erforderlich ist, wird trotz der maßgeblichen Bedeutung der Abfallbehandlung von einer ausführlicheren Beschreibung abgesehen.

### **5.1.3 Beeinflussung der Planung von Entsorgungslogistiksystemen durch die Wechselwirkung der entsorgungslogistischen Prozesse**

Die Einzelbetrachtung der Systemelemente reicht bei der Planung neuer Konzepte nicht aus, sondern es gilt, die komplexen Zusammenhänge des Gesamtsystems zu erfassen und Wechselwirkungen zu berücksichtigen (vgl. [Pfohl 1991, S. 649 f.]). Übertragen auf den hier betrachteten Anwendungsfall werden deshalb die gegenseitigen Wechselwirkungen der entsorgungslogistischen Prozesse im Folgenden dargestellt<sup>150</sup>.

#### **5.1.3.1 Einfluss der Sammlung auf die entsorgungslogistischen Prozesse**

Die Beeinflussung der Sammlung auf die entsorgungslogistischen Prozesse resultiert primär aus dem erzielten Grad der Vorsortierung. Im Rahmen der Abfallbehandlung

---

<sup>150</sup> Hierbei werden lediglich direkte Einflüsse berücksichtigt. Indirekte Einflüsse wie die Tatsache, dass die Sammlung Einfluss auf die Transporte besitzt, die Transporte wiederum in Wechselwirkung zur Behandlung stehen und somit auch die Sammlung die Behandlung (in diesem Fall indirekt) beeinflusst, werden nicht gesondert aufgeführt.  
Zu den gegenseitigen Wechselwirkungen der entsorgungslogistischen Prozesse sowie den daraus abgeleiteten Modellanforderungen siehe auch [Tietze-Stöckinger et al. 2004a].

wirkt sich dies insbesondere auf den Umfang der Behandlung und die Wahl des Behandlungsverfahrens aus. Durch eine hohe Sortenreinheit der angelieferten Abfälle können Aufbereitungsschritte in der Behandlungsanlage vermieden und die speziellen Verfahren für einzelne Stoffströme direkt angewendet werden.

Im Rahmen der Abfallsammlung determiniert der Grad der Vorsortierung die Größe und Art der eingesetzten Behälter. Ein hoher Grad der Vorsortierung führt zu kleineren Behältern, da die Gesamtabfallmenge in kleinere (sortenreine) Abfallmengen aufgeteilt wird. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Abfuhrorganisation: Zum einen wird hierdurch die ökonomisch sinnvolle Frequenz der Abfalltransporte beeinflusst und zum anderen muss ein geeignetes Transportmittel eingesetzt werden, das die sachgerechte Beförderung der verwendeten Abfallsammelbehälter sicherstellt.

Der Grad der Vorsortierung und die Größe und Art der bei der Abfallsammlung eingesetzten Abfallbehälter wirken sich auch auf die Umschlagsprozesse im Entsorgungssystem aus. Ein hoher Grad der Vorsortierung kann beispielsweise dem Ziel des Umschlagens, ökonomisch sinnvolle Transportmengen zu erzielen, entgegenstehen. Andererseits kann ein niedriger Grad der Vorsortierung zum Entfallen von Umschlagsprozessen führen, da die Abfälle bereits in für Ferntransporte sinnvollen Gebinden vorliegen.

In einem engen Zusammenhang mit dem Einfluss der Sammlung auf die Umschlagsprozesse steht auch der Einfluss auf die Lagerung der Abfälle. Durch die Verwendung vieler kleiner Behälter mit unterschiedlichen Stoffen bei einem hohen Grad der Vorsortierung erhöht sich die benötigte Anzahl der Stellfläche in den Abfallzwischenlagern. Soll für den Weitertransport der Abfälle der Grad der Vorsortierung nicht verringert werden, kann es darüber hinaus zu langen Standzeiten von Behältern mit Stoffen führen, die lediglich in geringen Mengen bei den Abfallerzeugern anfallen.

### **5.1.3.2 Einfluss des Transports auf die entsorgungslogistischen Prozesse**

Die Transporte können den Zeitpunkt des Anlagenbetriebs beeinflussen, falls eine Lagerung am Anlagenstandort nicht möglich bzw. erwünscht ist. Um Übernachtungskosten zu vermeiden, werden die Touren der Entsorgungstransporte derart geplant, dass alle Fahrer freitags an ihren Ausgangsort zurückkehren. Demnach werden freitags keine Behandlungsanlagen beliefert, wohin die Transportdauer inkl. Rückfahrt einen Tag übersteigt. Ebenso können weit entfernte Anlagen nicht montags beliefert werden, da der Transport frühestens dienstags dort eintreffen kann.

Dieser Zusammenhang kann durch den Einsatz eines Abfallzwischenlagers vor der Anlage aufgelöst werden, wobei die Transporte maßgebliche Auswirkungen auf die Lagergröße und deren Auslastung besitzen. Eine hohe Anzahl von Transporten in kontinuierlichen Zeitabständen führt zu kleinen Abfallzwischenlagern, während bei seltenen bzw. unregelmäßigen Transporten große Zwischenlager als Puffer eingesetzt werden müssen.

Des Weiteren bestehen Wechselwirkungen zwischen den Transporten untereinander. Eine hohe Auslastung eines Transports kann eine schlechte Auslastung parallel oder anschließend durchgeführter Transporte zur Folge haben. Ähnliches gilt für die Zeitpunkte der Entsorgungstransporte: ein frühzeitiger, nicht vollständig ausgelasteter Transport kann die Zeitpunkte nachfolgender Transporte determinieren, da sonst z.B. die Lagerkapazität überschritten würde oder nicht ausreichend Abfälle für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Behandlungsanlage zur Verfügung stünden.

Der Einfluss der Transporte auf den Umschlag der Abfälle liegt in den unterschiedlichen Transportmitteln begründet. Bei der Beladung der Transporte müssen u.a. die maximal zulässige Beladung eines Transportmittels berücksichtigt werden, sodass der Wechsel der Transportmittel die Auflösung von Gebinden erfordern kann. Ebenso können einige Transportmittel nur bestimmte (teils normierte) Abfallbehälter transportieren, sodass dann durch die Wahl des Transportmittels die Wahl des Abfallbehälters festgelegt wird.

Neben dem Umschlag der Abfälle wird auch die Sammlung durch die Wahl des Transportmittels beeinflusst. Insbesondere müssen der Grad der Vorsortierung, der Einfluss auf die verwendeten Abfallbehälter besitzt, und das Transportmittel aufeinander abgestimmt werden.

### **5.1.3.3 Einfluss des Umschlags auf die entsorgungslogistischen Prozesse**

Durch das Umschlagen bestimmter Abfallfraktionen in größere Ladungsträger kann die Art des Transportmittels und die Transportauslastung beeinflusst werden. Wurde eine Abfallfraktion beispielsweise bisher als Stückgut mit anderen Abfallfraktionen zu Transporten kombiniert und wird diese nun als Sammelgut getrennt von den Stückgütern transportiert, sinkt in Abhängigkeit von den jeweiligen Abfallmengen die Auslastung auf dem Stückguttransport bzw. die Frequenz dieser Transporte.

Werden die Abfälle im Sinne einer Mengenzusammenführung von kleineren in größere Behälter umgeschlagen, müssen letztere gelagert werden, bis eine ausreichende Anzahl kleinerer Behälter umgefüllt wurde. Bei einer kontinuierlichen Gebindeauflösung muss ebenfalls der größere Abfallbehälter gelagert werden bis sein Inhalt vollständig in kleinere Behälter umgefüllt wurde. Soll der Behälter nicht stückweise sondern sofort vollständig entleert werden, muss eine ausreichende Anzahl an Stellplätzen für die kleineren Behälter vorhanden sein.

Jedwedes Umschlagen der Abfälle wirkt sich auf weitere Umschlagsprozesse innerhalb der entsorgungslogistischen Kette aus. Einerseits kann ein frühzeitiges Zusammenführen der Abfallmengen einer Abfallart weitere Umschlagsprozesse verhindern. Andererseits kann nach einem Ferntransport mit unterschiedlichen Abfällen die Auflösung eines Gebindes erforderlich sein, damit die einzelnen Abfälle unterschiedlichen Behandlungsanlagen zugeführt werden können.

Die Sammlung steht ebenfalls in Wechselwirkung zu den Umschlagsprozessen. Der Einsatz bestimmter Abfallbehälter bzw. das Ziel, zu einem frühen Zeitpunkt eine Mengenzusammenführung vorzunehmen, kann durch einen definierten Grad der

Vorsortierung erleichtert bzw. erst ermöglicht werden. Insbesondere in diesem Zusammenhang ist die ganzheitliche Betrachtung<sup>151</sup> der entsorgungslogistischen Kette von Bedeutung, da durch eine Mengenzusammenführung der Grad der Vorsortierung erniedrigt werden kann.

#### **5.1.3.4 Einfluss der Lagerung auf die entsorgungslogistischen Prozesse**

Unterschiedliche, in einem Entsorgungssystem befindliche Abfalllager beeinflussen gegenseitig ihre Auslastung, weshalb bei der Dimensionierung neuer Lager bereits bestehende Lager berücksichtigt werden sollten. Beispielsweise kann sich ein Kapazitätsengpass in einem nachgeschalteten Lager auf die Belegung der vorgeschalteten Lager auswirken.

Der Standort und die Größe der Abfallzwischenlager beeinflussen den von den Entsorgungsunternehmen angestrebten Grad der Vorsortierung. Bei einer großen Entfernung zwischen den Sammelstellen und den Zwischenlagern muss bereits bei der Sammlung auf eine möglichst hohe Transportauslastung geachtet werden, weshalb ein hoher Grad der Vorsortierung mit einer Vielzahl unterschiedlicher Behälter nicht immer Ziel führend ist. Kleine Abfallzwischenlager stehen ebenfalls in einem konträren Verhältnis zu einem hohen Grad der Vorsortierung, da ein langer Verbleib der Abfälle im Zwischenlager nicht möglich ist.

Die Lagerung besitzt einen unmittelbaren Einfluss auf den Umschlag der Abfälle, da dieser in den meisten Fällen ohne eine Zwischenlagerung der Abfälle nicht möglich wäre. Beispielsweise wird bei einer Mengenzusammenführung entweder ein großer Behälter gelagert bis eine ausreichende Anzahl kleiner Behälter umgefüllt wurden oder kleine Behälter werden gelagert bis ein großer Behälter zum Befüllen bereitgestellt werden kann.

Die Lagergröße und das Transportmittel müssen dementsprechend aufeinander abgestimmt werden, dass eine effiziente Transportauslastung erreicht werden kann. Des Weiteren besitzt die Lagerkapazität einen Einfluss auf die Anzahl und Häufigkeit der Transporte.

Ein der Behandlung vorgeschaltetes Lager dient als Puffer, um Unregelmäßigkeiten bei der Belieferung auszugleichen und einen kontinuierlichen Inputstrom für die Behandlungsanlage zu liefern. Bei diskontinuierlichem Betrieb der Behandlungsanlage, werden die Abfälle bis zum Erreichen der Chargengröße gesammelt, wodurch eine wirtschaftliche Fahrweise der Anlage gewährleistet werden kann.

#### **5.1.3.5 Einfluss der Behandlung auf die entsorgungslogistischen Prozesse**

Die Behandlung der Abfälle besitzt grundsätzlich Auswirkungen auf nachgelagerte Behandlungsschritte. In Abhängigkeit des eingesetzten Verfahrens wird einerseits eine weitere Behandlung vermieden, andererseits kann die Qualität der Abfälle negativ beeinflusst werden, sodass höhere Kosten aufgrund zusätzlicher Behandlungsschritte anfallen. Beispielsweise können durch frühzeitiges Komprimieren der

---

<sup>151</sup> Vgl. hierzu [Pfohl 1991, S. 644 ff.] und [Stölzle 1993, S. 178 ff.].

Fraktion Papier/Pappe/ Kartonagen zu Ballen u.a. die Anzahl der Transporte zu den Behandlungsanlagen und somit auch die Transportkosten reduziert werden. Allerdings werden von den Anlagen bestimmte Anforderungen an diese Ballen hinsichtlich Größe und Gewicht für den Weitertransport gestellt. Sind diese nicht gewährleistet, entstehen Mehrkosten durch das Aufschneiden der Ballen und erneutes Pressen in den Behandlungsanlagen.

Im Rahmen der entsorgungslogistischen Kette ist die Behandlung sowohl zwischen den Transport zur Anlage als auch den Transport von der Anlage zum Ort des Wiedereinsatzes oder der Beseitigung geschaltet (vgl. [Bruns 1997, S. 31]). Die Wechselwirkung von Abfallbehandlung und Transport bezieht sich primär auf die der Behandlung nachgeschalteten Transporte, wobei die durch die Behandlung erzielte Stoffumwandlung in erster Linie die Wahl des Transportmittels und die Anzahl der Transporte beeinflusst. Des Weiteren besitzt die Behandlung der Abfälle Auswirkungen auf den Zeitpunkt sowohl der vor- als auch der nachgelagerten Transporte:

- Die Anlieferung der Abfälle bei den Behandlungsanlagen ist nur innerhalb definierter Zeitfenster möglich<sup>152</sup>.
- Die Abfälle werden erst abtransportiert, wenn der Output der Anlage eine ökonomisch sinnvolle Transportmenge erreicht hat.

In den meisten Fällen ist mit der Behandlung der Abfälle auch eine Zwischenlagerung verbunden. Die Anlagenkapazität und die Störungsanfälligkeit einer Anlage sind Aspekte, die bei der Auslegung des vorgeschalteten Lagers berücksichtigt werden müssen, um Engpässe in der entsorgungslogistischen Kette zu vermeiden. Die Größe eines nachgeschalteten Lagers hängt von der Anzahl und Art der unterschiedlichen Outputströme und der Kapazität der Anlage ab. Eine Behandlung, aus der eine Volumenreduktion der Abfälle resultiert, ermöglicht eine verkleinerte nachgeschaltete Lagerfläche<sup>153</sup>, während eine Behandlung, durch die eine Fraktionierung erzielt wird, eine vergrößerte Lagerfläche erforderlich macht.

Die jeweiligen Behandlungsverfahren stellen Anforderungen an die Qualität<sup>154</sup> der zu behandelnden Abfälle. Diese Qualität kann durch geeignete Vorbehandlungsmaßnahmen oder durch einen vom Entsorger vorgegebenen Grad der Vorsortierung bei der Sammlung erzielt werden. Für den Abfallerzeuger bestehen primär ökonomische Anreize zur Getrennthaltung seiner Abfälle, da die hierdurch erzielbaren Kosteneinsparungen durch den Wegfall von Behandlungsschritten vom Entsorger (teilweise) an ihn weitergegeben werden.

## **5.2 Anforderungen an ein Modell zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks**

Die Anforderungen an ein Modell zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks ergeben sich zum einen aus den entsorgungs-

---

<sup>152</sup> Wobei diese Zeitfenster häufig auf einzelne Werktage beschränkt sind, bzw. auf einzelne Stunden an ein bis zwei Werktagen pro Woche.

<sup>153</sup> Im Vergleich zum der Anlage vorgeschalteten Lager.

<sup>154</sup> Beispielsweise Dichte, Kantenlänge, Reinheit, max. Gehalt an bestimmten Stoffen, etc.

logistischen und zum anderen (wie auch im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse eines unternehmensübergreifenden Systems aus dem Bereich der Energiewirtschaft) aus den kooperativen Aspekten des betrachteten Systems. Um aus den Modellergebnissen eine belastbare Planungsgrundlage ableiten zu können, sind die sich daraus ergebenden Charakteristika des Systems zu berücksichtigen. Die Anforderungen an ein solches Analyseinstrument lassen sich damit anhand der folgenden Punkte beschreiben:

- Das Modell soll die relevanten techno-ökonomischen Charakteristika des Systems hinreichend genau erfassen, um die im Modellergebnis enthaltenen Veränderungsprozesse (Transportströme, Lagerkapazitäten, etc.) nachvollziehen zu können. Mit dem Ziel, eine Entscheidungsunterstützung für die partizipierenden Unternehmen leisten zu können, müssen im Rahmen der Analyse nicht nur die Veränderung des Gesamtsystems sondern darüber hinaus die Auswirkungen auf die einzelnen Akteure ebenfalls nachvollzogen werden können.
- Die dargestellten Abhängigkeiten der entsorgungslogistischen Prozesse verdeutlichen, dass eine ganzheitliche Betrachtung des Systems notwendig ist. Eine Investitionsplanung auf der Grundlage von Einzelentscheidungen über Investitionsprojekte wird den gegebenen Anforderungen nicht gerecht, sodass eine reine Investitionsplanung mit vorgegebener Auslastung der Anlagen und Transporte sowie der Lagergröße zu kurz greift.
- Transportmittel sind mit den Restriktionen bezüglich maximaler Beladung und Ladungsträger zu berücksichtigen.
- Die Anlagen und Prozesse, in denen die Behandlung bzw. Umwandlung der einzelnen Abfallarten stattfindet, sind anhand technischer und ökonomischer Parameter darzustellen. Insbesondere sind die Veränderungen der physikalischen Eigenschaften der Abfälle adäquat zu berücksichtigen, um so die Wechselwirkungen zwischen den entsorgungslogistischen Prozessen widerzuspiegeln. Dies gilt vornehmlich bezüglich der wechselseitigen Beeinflussung unterschiedlicher Abfallarten: Beispielsweise kann eine Behandlung einer Abfallart den Transport in einem Behälter erfordern, der dann nicht mehr mit anderen Behältern zu einer Transportcharge zusammengestellt werden kann.
- Hinsichtlich der zeitlichen Differenzierung des Modells ist ein geeigneter Kompromiss zwischen der notwendigen detaillierten Abbildung kurzfristiger Zusammenhänge wie Transportbeladung und Lagerbestand und der mittel- bis langfristigen Betrachtung der Investitionsprojekte zu entwickeln. Insbesondere muss in diesem Kontext die Größe des Modells und damit auch die Rechenzeit bzw. Lösbarkeit Eingang in die Konzeption finden.

### **5.3 Stoffstrommodelle und ihre Einsatzmöglichkeiten zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks**

Quantitative Modelle zur Entscheidungsunterstützung werden sowohl zur Bewältigung von Planungsaufgaben in Unternehmen als auch zur Politikberatung eingesetzt. Im Bereich der Entsorgung reicht das Einsatzspektrum quantitativer Modelle von der Gestaltung der werksinternen Entsorgungslogistik bis hin zur

Ableitung der nationalen Abfallpolitik. Während die Modelle zur Politikberatung meist makroökonomischer Prägung sind, werden auf Unternehmensebene vornehmlich ingenieurwissenschaftliche oder betriebswirtschaftliche Ansätze angewendet. Im Hinblick auf die Veränderungen, die sich durch die Einführung eines Entsorgerparks für mehrere Unternehmen ergeben, ist zu prüfen, inwieweit die bestehenden Instrumente genutzt werden können, um für die Ausgestaltung eines Entsorgungssystems mit Entsorgerpark eine Planungs- und Entscheidungsunterstützung bereitzustellen.

Die Vorstellung ausgewählter Modelltypen in den nachstehenden Unterkapiteln beschränkt sich auf ökonomische Modelle<sup>155</sup>. Hierbei werden nicht nur Modelle aus dem Bereich der Abfallentsorgung berücksichtigt, sondern aufgrund der konzeptionellen Verwandtheit des Entsorgerparks mit Zulieferparks auch Modelle aus dem Zulieferbereich kurz dargestellt. Zunächst werden in diesem Kapitel Stoffstrommodelle vorgestellt, die der Abbildung einzelner entsorgungslogistischer Prozesse dienen (Kapitel 5.3.1). Im Anschluss daran werden Modelle dargestellt, die durch simultane Berücksichtigung von mindestens zwei der entsorgungslogistischen Prozesse deren Wechselwirkungen zu erfassen vermögen (Kapitel 5.3.2). Abschließend wird in diesem Kapitel die Eignung der dargestellten Modelle zur techno-ökonomischen Bewertung einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks diskutiert (Kapitel 5.3.3).

### **5.3.1 Stoffstrommodelle zur Abbildung einzelner entsorgungslogistischer Prozesse**

Bei der Abbildung der Entsorgungstransporte<sup>156</sup>, sowohl bei der Sammlung als auch bei Ferntransporten, wird in der Regel von einer fixen Anzahl zur Verfügung stehender Transportmittel ausgegangen, die auf wöchentlicher Basis eingeplant werden. Eine ebenfalls feststehende Anzahl von Abholstellen (Quellen) ist über einen definierten Raum (Stadtteil, Stadt, Region) verteilt, und jede dieser Quellen muss in einer bestimmten Frequenz angefahren werden. Jeden Tag starten die Fahrzeuge von ihrem Depot die Sammlung auf der für sie jeweils festgelegten Route. Sobald die maximale Füllmenge des Sammelbehälters erreicht ist, fahren die Transportmittel zu

---

<sup>155</sup> Zu Anwendungsmöglichkeiten ökonomischer Modelle auf das Abfallmanagement vgl. auch [Gottinger 1991]. Modelle, die auf die detaillierte Abbildung einzelner Stoffumwandlungsvorgänge (z.B. in Deponien) bei der Abfallbehandlung fokussieren (vgl. [García de Cortázar et al. 2002]), werden nicht berücksichtigt, da hieraus keine Entscheidungsunterstützung bezüglich ökonomischer Aspekte des Gesamtsystems abgeleitet werden kann.

<sup>156</sup> Die Ausführungen von [Crainic et al. 1997] zum Ferntransport und die dort aufgeführte Modellübersicht weisen auf einen Zusammenhang zwischen dem Betrachtungshorizont und der Anzahl der abgebildeten Prozesse in Modellen hin. Im strategischen Bereich müssen Entscheidungen hinsichtlich des Standorts und der Kapazitäten neuer Anlagen (Beladung, Entladung, Umschlag) sowie Kapazitätserweiterungen und Stilllegungen bestehender Anlagen getroffen werden. Im Bereich der taktischen Planung wird eine Unterscheidung in Aufgaben des Ferntransports und Nahtransports vorgenommen. In diesem Bereich sind auch die Modelle zum Vehicle Routing anzusiedeln. Ziel der taktischen Planung ist die Erstellung eines Transportplans auf der Basis einer adäquaten Allokation und Nutzung von verfügbaren Ressourcen. Die operative Planung muss Unsicherheiten berücksichtigen und in der Lage sein, auf kurzfristige Änderungen zu reagieren (wie die Einplanung eines zusätzlichen Stopps, nachdem die Tour bereits begonnen wurde).

einer Senke (Umschlagstation, Abfallzwischenlager, Deponie oder Behandlungsanlage). Nach der Entleerung wird die Sammlung fortgesetzt bzw. bei Schichtende kehren die Fahrzeuge zu ihrem Depot zurück<sup>157</sup>.

Diese Zusammenhänge ähneln dem Vehicle Routing Problem (VRP) aus dem Bereich der Versorgung<sup>158</sup>: Das VRP berücksichtigt normalerweise eine Flotte von kapazitätsbeschränkten Transportmitteln, die ein Depot verlassen, eine Anzahl von Kunden bedienen und zurück zum Depot fahren. Signifikante Unterschiede zwischen der Versorgung von Kunden mit Produkten und der Entsorgung von Abfallerzeugern verhindern jedoch eine direkte Übertragung des VRP auf den Bereich der Entsorgung (vgl. [Angelelli et al. 2002]):

- Bei der Versorgung kehrt das Fahrzeug nach der vollständigen Entleerung direkt ins Depot zurück, während bei der Sammlung nach einem Zwischenstopp bei einer Senke die Sammlung fortgesetzt wird.
- Im Rahmen der Versorgung wird die Route täglich auf der Basis der an diesem Tag zu beliefernden Kunden entsprechend den eingegangenen Aufträgen optimiert. Demgegenüber ist bei der Abfallsammlung eine längerfristige Betrachtung notwendig, die einen Sammelzeitplan für jede Abfallquelle festlegt.

Ein weiterer Ansatz hinsichtlich der Transportmodellierung dient zur Bestimmung der Anforderungen an Transportmitteln und Arbeitskraft bei einer gegebenen Tour (vgl. [Wilson et al. 2001]). Hierbei werden deterministische Modelle, die auf mittleren Sammelraten basieren (vgl. [Tchobanoglous et al. 1993]) und Simulationsmodelle (vgl. [Everett et al. 1997]) unterschieden. [Wilson et al. 2001] entwickelte für diese Problemstellung einen Ansatz mit abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten für die Anzahl der Haushalte auf einer Route, die Abfälle zur Abholung bereitgestellt haben.

Ansätze, die die Touren- und Standortplanung<sup>159</sup> kombinieren (sog. location-routing problems), berücksichtigen simultan den Anlagenstandort und die Liefer- bzw. Sammelwege (vgl. [Min et al. 1998] und [Melkote et al. 2001])<sup>160</sup>. Ein typisches location-routing problem ist das „generalized travelling salesman problem“ (vgl. [Laporte et al. 1987]). [Current et al. 1992] und [Gendreau et al. 1997] untersuchten Varianten dieses Problems mit der Zielsetzung, die minimale Tourenlänge zu bestimmen unter der Nebenbedingung, dass jeder Knoten einen definierten Abstand zur Route besitzt. [Laporte et al. 1988] entwickelte ein Modell zur Lösung des folgenden Problems: In einem aus Knoten und Kanten bestehenden Netzwerk, werden die Knoten entweder als Depot oder Nachfrage klassifiziert und ihnen die jeweiligen Fixkosten zugeordnet. In jedem Depot können Fahrzeuge stationiert werden, und die Errichtung eines Depots sowie die Benutzung der Fahrzeuge führen

---

<sup>157</sup> Modellbeschreibungen finden sich bei [Greb 1998], [Toth et al. 1999], [Schultmann et al. 2000], [Sonesson 2000], [Wilson et al. 2001] und [Angelelli et al. 2002].

<sup>158</sup> Eine Literaturübersicht zum Vehicle Routing Problem und dessen Varianten findet sich u.a. bei [Laporte 1997].

<sup>159</sup> Zu einer Übersicht über unterschiedliche Modellansätze zur Standortplanung sei an dieser Stelle auf [ReVelle et al. 1996] verwiesen.

<sup>160</sup> Da die an den jeweiligen Standorten durchgeführten Verfahren und die Kapazitäten der dort eingesetzten Anlagen nicht Bestandteil der Modellierung bei location-routing-problems sind, werden die entsprechenden Modelle in diesem und nicht im folgenden Kapitel aufgeführt.

zu Fixkosten. Als Nebenbedingungen können Obergrenzen für die Kosten, die Länge der Routen oder die Fahrzeugkapazität festgesetzt werden. Ein ähnliches Problem wurde auch von [Berger et al. 1996] untersucht.

Die Anwendung dieser Modellart im Bereich der Abfallentsorgung ist vielseitig: So stellten [Rahman et al. 1995] ein Modell zur Standortbestimmung von Umschlagsstationen vor. Neben der Berücksichtigung der resultierenden Investitionen und Transportkosten werden hierbei in der Zielfunktion öffentliche Widerstände in Abhängigkeit des gewählten Standorts berücksichtigt. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen [List et al. 1991], die bei der Standortplanung von Abfallbehandlungsanlagen die entstehenden Kosten und das Risiko unterschiedlicher Transportrouten in der Zielfunktion berücksichtigen. Ebenfalls zu den location-routing problems zählt das Modell von [González-Torre et al. 2002] zur Allokation von Glasrecyclingcontainern. Ziel dieses Modells ist die Maximierung der gesammelten Glasmenge bei gleichzeitiger Reduktion der Logistikkosten.

Hinsichtlich der Bewertung von Abfallbehandlungsalternativen bzw. des Einsatzes unterschiedlicher Behandlungsanlagen existiert ebenfalls eine Vielzahl von Modellen. Häufig werden hierzu Simulationen eingesetzt, die die Behandlungskosten aller zulässigen Behandlungsalternativen unter detaillierter Berücksichtigung der Stoffumwandlungsprozesse errechnen (vgl. [Cavin et al. 2001]). [Chakraborty et al. 2002] entwickelten am Beispiel der pharmazeutischen Industrie ein Modell zur Auswahl von Behandlungsanlagen, das einen auf Entscheidungsregeln basierenden Ansatz mit einer Optimierung verknüpft. Eine Weiterentwicklung dieser Modelle besteht in der Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Entscheidungsfindung (vgl. [Linninger et al. 2000] und [Chakraborty et al. 2003]). Weitere Ansätze konzentrieren sich in erster Linie auf die ökologische Bewertung unterschiedlicher Entsorgungspfade (z.B. ECO2L (vgl. [Keldenich et al. 2000]), ELECTRE TRI (vgl. [Hokkanen et al. 1997] und [Kafandaris 2002])) (vgl. [Chang et al. 1996] und [Caputo et al. 2001]).

Hinsichtlich der Standort- und Kapazitätsplanung von Lagern wird auf nachfolgendes Kapitel verwiesen, da aufgrund des Einflusses des Lagerstandorts auf die Transporte eine singuläre Modellierung in der Regel nicht durchgeführt wird<sup>161</sup>.

### **5.3.2 Stoffstrommodelle unter simultaner Berücksichtigung von mindestens zwei entsorgungslogistischen Prozessen**

[Fleischmann 1999] stellte ein Modell unter simultaner Berücksichtigung von Transporten und Lagerung vor. Ziel dieses Ansatzes ist die Minimierung der Transport- und Lagerkosten, wobei die Lagerung sowohl bei der Quelle als auch bei der Senke möglich ist. Eine Übersicht deterministischer Modelle, in denen die Lagerung und Transporte simultan optimiert werden, unter der Zielsetzung den besten Kompromiss zwischen Transport- und Lagerkosten zu ermitteln, findet sich bei [Bertazzi et al. 1999].

Die gleichzeitige Abbildung des Umschlags und der Transporte wurde u.a. von [Lin et al. 2001] präsentiert. Hierbei werden bei der Beladung unterschiedlicher

---

<sup>161</sup> Zur Kapazitätserweiterung von Lagern bei determinierten Zuflüssen vgl. [Cormier et al. 1999].

Transportmittel mehrere Produkte betrachtet, die unterschiedliche Transportvolumina aufweisen. Darüber hinaus wird berücksichtigt, dass die Wahl des Transportmittels die Wahl der Transportroute beeinflusst.

Die Berücksichtigung der Behandlungsanlagen im Entsorgungsbereich entspricht im Bereich der Zulieferung der Integration der Produktionsanlagen in die Modelle. [Rajagopalan et al. 2001] entwickelten z.B. ein Modell, in dem sowohl die Produktion als auch die Lagerung mehrerer Produkte abgebildet ist. Der Betrachtungshorizont dieses Modells umfasst mehrere Perioden, wobei von einem langfristigen Anstieg der Nachfrage ausgegangen wird. Darüber hinaus sind innerhalb dieses langfristigen Nachfrageanstiegs kurzfristige Fluktuationen der Nachfrage in die Analysen integriert. Bei der Abbildung der Produktion der Güter wird nicht auf die Stoffumwandlung eingegangen, sondern es werden lediglich die Umrüstzeiten beim Wechsel von Produkten modelliert. Das Modell liefert Ergebnisse hinsichtlich notwendiger Kapazitätserweiterungen sowie Produktions- und Lagerentscheidungen.

Modellansätze, die Lagerung, Anlagenallokation und Transportpolitik integrativ betrachten, finden sich u.a. im Bereich der Bewertung von Distributionsnetzwerken. [Jayaraman 1998] weist in diesem Zusammenhang explizit auf die Interdependenzen zwischen diesen drei Aspekten hin. Ziel dieser Modelle ist im Allgemeinen die Ermittlung der Anlagen- und Lagerstandorte sowie die Kapazitäten aller Lager innerhalb der logistischen Kette. Meist wird hierbei von einer statischen Nachfrage ausgegangen, weshalb die Modelle auf die Abbildung einer Periode beschränkt sind. Im Gegensatz hierzu entwickelten [Romero Morales et al. 1999] ein mehrperiodiges Modell zur Bewertung von Distributionsnetzwerken, wobei dynamische Nachfragemuster und Aspekte der Lagerbestandspolitik eingehen. Die Übertragung dieser Modelle auf den Bereich der Entsorgung ist allerdings aufgrund der im vorigen Unterkapitel dargestellten Problematik hinsichtlich der Übertragung des Vehicle Routing Problems auf die Entsorgung ebenfalls nicht ohne Erweiterungen möglich.

Im Bereich der Zulieferung werden überbetriebliche Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette u.a. mit Hilfe des Strategic Network Planning (SNP) konzipiert<sup>162</sup>. SNP wird in erster Linie zur Standortplanung der Hauptanlagen der Wertschöpfungskette genutzt und bietet somit eine Entscheidungsunterstützung für die strategische Planung von Unternehmensnetzwerken (vgl. [Fleischmann et al. 2002]). Eine Analyse ausgewählter Modelle von [Vidal et al. 1997] ergab, dass die Mehrzahl der Modelle folgende Charakteristika aufweisen:

- Abbildung einer Periode (demzufolge statisch),
- Vorgabe des Standorts für den Zubau neuer Anlagen,
- Berücksichtigung mehrerer Produkte,
- Ziel Kostenminimierung,
- Berücksichtigung von fixen Produktions- und Standortkosten,
- vollständige Nachfragebefriedigung.

---

<sup>162</sup> Eine Übersicht bestehender Modellansätze wurde u.a. von [Vidal et al. 1997] und [Goetschalckx 2000] erstellt.

Einen Ansatz, der sämtliche entsorgungslogistischen Prozesse<sup>163</sup> berücksichtigt, stellte [Ljunggren 2000] am Beispiel Schwedens vor. Hierbei handelt es sich um einen Systems Engineering Ansatz zur Planung der nationalen Entsorgung. Ziel des Modells ist die Evaluierung von Abfallbehandlungsverfahren und der Abfallpolitik anhand ökonomischer und ökologischer Kriterien. Aufgrund der großen Datenmenge wird Schweden in zehn Abfallmanagementsysteme unterteilt, und die Daten werden entsprechend aggregiert. Am Beispiel der Entsorgung von Computermonitoren stellten [Macauley et al. 2003] ein Simulationsmodell zur Bewertung verschiedener Entsorgungsstrategien vor. Neben einer monetären Analyse werden anhand dieses Modells die durch die unterschiedlichen Politikansätze erzielbaren ökologischen Auswirkungen ermittelt. [Everett et al. 1996] entwickelten ein deterministisches lineares Modell zur Ausgestaltung eines regionalen Abfallmanagementprogramms. Hierbei werden die Art und der Zeitpunktes des Einsatzes unterschiedlicher Strategien im Rahmen einer langfristigen Betrachtungsweise ausgewählt unter der Zielsetzung, die Kosten zu minimieren. Im Rahmen dieses Modells können mehrere Städte, Deponien und Müllverbrennungsanlagen berücksichtigt werden, sowie unterschiedliche Sammelverfahren und Grade der Vorsortierung differenziert werden. Die Transportprozesse werden in diesem Modell durch die Bildung von Kostensätzen für jedes Quelle-Senke-Paar und die Multiplikation dieser Kostensätze mit der zwischen diesen Knoten fließenden Abfallmenge abgebildet<sup>164</sup>. [Karagiannidis et al. 1998] und [Salvia et al. 2002] befassten sich ebenfalls mit der Ausgestaltung regionaler Entsorgungssysteme, wobei lokale Besonderheiten wie die Bevölkerungsdichte in die Modellierung eingehen. Am Beispiel der Stadt Nürnberg stellte [Scheel 1999] ein Modell zur Optimierung von Sammelsystemen für feste Siedlungsabfälle vor, das sämtliche entsorgungslogistische Prozesse beinhaltet. Kosten der unterschiedlichen Behandlungsanlagen werden in diesem Modell durch die Multiplikation der in einer Anlage behandelten Abfallmenge mit einem aus der Betriebsabrechnung der Stadt Nürnberg oder aus Literaturquellen abgeleiteten Kostensatz berechnet. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Modellierung von Entsorgungssystemen findet sich beispielsweise bei [Maqsood et al. 2003].

### **5.3.3 Eignung der diskutierten Modelle zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks**

Im Rahmen dieses Kapitels werden die in den vorangegangenen Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 vorgestellten Stoffstrommodelle nochmals kurz aufgegriffen und ihre Eignung zur techno-ökologischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks abgeleitet. Analog zur Reihenfolge der Kapitel wird zuerst auf Stoffstrommodelle zur Abbildung einzelner entsorgungslogistischer Prozesse eingegangen, bevor Stoffstrommodelle unter Berücksichtigung mehrerer entsorgungslogistischer Prozesse vorgestellt werden.

---

<sup>163</sup> Eine Übersicht zu Abfallmanagementmodellen findet sich u.a. bei [Abou Najm et al. 2002] und [Morissey et al. 2004].

<sup>164</sup> Weitere Ansätze zur Ausgestaltung regionaler Entsorgungssysteme wurden beispielsweise von [Ferrell et al. 1997], [Cosmi et al. 2000], [Abou Najm et al. 2002], [Nie et al. 2004] und [Costi et al. 2004] vorgestellt.

Die Modelle zur Lösung des Vehicle Routing Problems sowie die Modelle zur Bestimmung der Anforderungen an Transportmitteln und Arbeitskraft bei einer gegebenen Tour werden im Bereich der taktischen Entscheidungsunterstützung eingesetzt, um die aus der strategischen Planung vorgegebenen Ressourcen effektiv einzusetzen (vgl. [Crainic et al. 1997]). Demnach sind die Modelle nicht zur strategischen Entscheidungsunterstützung konzipiert, sondern leisten einen Beitrag zur bestmöglichen Umsetzung der festgesetzten Strategien. Ihr Einsatz zur techno-ökonomischen Ausgestaltung eines Entsorgerparks ist nicht Ziel führend, da diese Modelle nicht vermögen, die in Kapitel 5.1.3 diskutierten Wechselwirkungen der entsorgungslogistischen Prozesse untereinander darzustellen. Im Anschluss an eine Ausgestaltung eines Entsorgerparks kann durch den Einsatz dieser Modelle jedoch in der Praxis ein zusätzlicher Nutzen durch effizienten Ressourceneinsatz erzielt werden.

Modelle zur simultanen Touren- und Standortplanung (location-routing problems) werden zur langfristigen Entscheidungsunterstützung eingesetzt. Im Rahmen der Touren- und Standortplanung zielt die Entscheidungsunterstützung nicht auf die Auswahl der Behandlungsverfahren, sondern auf die Standorte bereits festgelegter Anlagen. Das Anwendungsgebiet dieser Modelle beschränkt sich in der Regel auf die Auslieferung von Waren und die Festlegung der Depotstandorte, weshalb Produktionsprozesse nicht berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die aus dem Bereich der Entsorgung angeführten Modelle, die sich mit den Standorten von Glascontainern (vgl. [González-Torre et al. 2002]) und Umschlagstationen (vgl. [Rahman et al. 1995]) befassen. [List et al. 1991] beschäftigen sich zwar mit der Allokation von Abfallbehandlungsanlagen, jedoch ist das Ziel ihrer Analysen nicht die Ausgestaltung eines Entsorgungssystem, sondern die Ermittlung des Transportrisikos, das aus unterschiedlichen Standorten bereits ausgestalteter Behandlungsanlagen resultiert. Die Auswirkungen unterschiedlicher Behandlungsverfahren können und sollen mit diesen Modellen nicht erfasst werden, weshalb sie ebenfalls nicht zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks geeignet sind.

Die in Kapitel 5.3.1 dargestellten Modelle zur Bewertung von Abfallbehandlungsalternativen dienen einem Verfahrensvergleich unter detaillierter Berücksichtigung der Stoffumwandlungsprozesse. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Behandlungsverfahren (z.B. chemisch, physikalisch, mikrobiologisch) ist eine generelle Darstellung der in diesen Modellen berücksichtigten Aspekte nicht möglich. Je nach Prozess werden zur Abbildung u.a. Daten hinsichtlich Zusammensetzung und Menge von Edukten und Produkten, evtl. notwendiger Katalysatoren oder auch möglicher Inhibitoren verwendet, und wichtige Einflussgrößen auf die Reaktionsgeschwindigkeit wie Temperatur, Druck und pH-Wert werden in den Modellen berücksichtigt. Einsatzgebiete dieser Modelle sind neben dem Bereich der unternehmerischen Planung die Politikberatung, um Strategien zum Ausbau oder zur Abkehr von Verfahren abzuleiten. Diese Modelle erfüllen zwar die Anforderung hinsichtlich der Abbildung der Abfallbehandlung, können jedoch nicht zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgungssystem und dessen Wechselwirkungen eingesetzt werden.

Sämtliche in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Modelle zur Analyse einzelner entsorgungslogistischer Prozesse werden den in Kapitel 5.2 abgeleiteten Modellanforderungen zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks nicht gerecht. Sie sind durch einen hohen Detaillierungsgrad bei der Abbildung eines einzelnen Betrachtungsgegenstandes gekennzeichnet, vermögen aufgrund der singulären Betrachtungsweise jedoch nicht, die Wechselwirkungen der entsorgungslogistischen Prozesse abzubilden. Auch bei einer Kopplung mehrerer Modelle kann dies nur durch iterative Verfahren erreicht werden. Aus diesem Grund wird auf die Anwendung dieser Modelle verzichtet, wobei die detaillierte Abbildung der einzelnen Prozesse wertvolle Hinweise für die Modellbildung mit dem Ziel der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks bieten.

Ähnliche Einschränkungen gelten auch hinsichtlich der zu Beginn des Kapitels 5.3.2 aufgeführten Modelle unter Berücksichtigung zweier relevanter Aspekte. Während die Modelle von [Fleischmann 1999], [Lin et al. 2001] und [Rajagopalan et al. 2001] eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen Transporten und Lagerung, Transporten und Umschlag bzw. Produktion und Lagerung ermöglichen, kann hierdurch keine Aussage bezüglich vorteilhafter Behandlungsstrategien abgeleitet werden. Somit gilt auch für diese Modelle, dass ihr Nutzen im Bereich der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks zum einen in der Ableitung von Modellierungsansätzen für die entsorgungslogistischen Prozesse und zum anderen in einer möglichen nachgelagerten Modellanwendung liegt.

Modelle zur Bewertung von Distributionsnetzwerken sind meist weniger detailliert als die zuvor genannten Ansätze. Neben der Abbildung der Transporte dienen diese Modelle zur Ermittlung von Anlagen- und Lagerstandorten sowie der notwendigen Lagerkapazitäten. Aufgrund ihres Betrachtungsgegenstandes werden allerdings keine Umwandlungsprozesse berücksichtigt, weshalb eine Anwendung dieser Modelle für die Abbildung eines Entsorgungssystems nicht ohne Erweiterungen möglich ist. Darüber hinaus sind wegen der Unterschiede zwischen Abfallsammlung und Warendistribution weitere Anpassungen bei der Abbildung der Transporte notwendig<sup>165</sup>.

Zur Diskussion der Eignung der Ansätze des Strategic Network Planning für die techno-ökonomische Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks werden im Folgenden einige in der Literatur diskutierte Erweiterungen vorgestellt, die in demnach die Grenzen der bisher eingesetzten Modelle aufzeigen. Die Standortentscheidung sollte mit der Entscheidung über die dort herzustellenden Produktgruppen kombiniert werden, da nur dann Aussagen über die tatsächlich anfallenden fixen und variablen Kosten getroffen werden können. Des Weiteren ermöglicht diese integrierte Sichtweise die Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen Zulieferunternehmen und Hersteller. Allerdings werden zur Modellierung dieser Entscheidung zusätzliche binäre Variablen benötigt (vgl. [Cohen et al. 1991] und [Arntzen et al. 1995]). [Fleischmann 2002] führt folgende Gründe

---

<sup>165</sup> Vgl. hierzu auch die Ausführungen zur Übertragung des vehicle routing problems in Kapitel 5.3.1.

bezüglich der Weiterentwicklung der Modelle von einer statischen Betrachtungsweise hin zu einer zeitschrittübergreifenden Analyse auf:

- Die zukünftige Entwicklung des gegenwärtigen Netzwerkes kann abgeleitet werden, indem z.B. jede lokale Entscheidung einer bestimmten Zeitperiode zugeordnet wird.
- Ein mehrperiodiges Modell ermöglicht die Berücksichtigung der Ein- und Auszahlungen in den entsprechenden Zeitperioden.

Ein weiterer Diskussionspunkt betrifft die detaillierte Abbildung der Transporte v.a. bei nationalen Netzwerken, um so Größendegressionseffekte berücksichtigen zu können (vgl. [Fleischmann 1999])<sup>166</sup>.

Schwerpunkt des SNP ist die Ausgestaltung globaler oder zumindest nationaler Netzwerke, weshalb diesen Modellen eine starke Aggregation der Eingangsdaten zugrunde liegt. Es werden meist keine Produktgruppen, technischen und technologischen Aspekte, Perioden, Abschreibungen und Größendegressionseffekte berücksichtigt, sodass vom Einsatz des SNP zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks abgesehen wird.

Die aus dem Bereich der Entsorgung stammenden Modelle, die sämtliche relevanten Prozesse berücksichtigen, zeichnen sich ebenfalls durch einen hohen Aggregationsgrad bei der Modellierung aus. Aufgrund der Zielsetzung nationale oder regionale Entsorgungssysteme zu analysieren bzw. die Auswirkungen unterschiedlicher Politikansätze miteinander zu vergleichen, werden in diesen Modellen die einzelnen Prozesse approximiert dargestellt. Abgesehen von dem von [Scheel 1999] vorgestellten Modell werden in allen der in Kapitel 5.3.2 präsentierten Modelle unter Berücksichtigung sämtlicher entsorgungslogistischer Prozesse die Transporte nach folgendem Schema abgebildet: Für jedes Quelle-Senken-Paar werden durchschnittliche Transportkosten pro Mengeneinheit festgelegt, und diese werden mit der Gesamtmenge, die zwischen Quelle und Senke fließt, multipliziert. Die wechselseitigen Einflüsse zwischen Lagerung und Transporten werden in diesen Modellen somit nicht erfasst. Im Gegensatz dazu werden diese Zusammenhänge bei [Scheel 1999] detailliert betrachtet, wobei in diesem Ansatz aufgrund der Zielsetzung der Optimierung von Sammelsystemen die Abfallbehandlung stark vereinfacht in die Modellierung eingeht. Im Hinblick auf die techno-ökonomische Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks sind sowohl die stark aggregierte Abbildung der Transporte als auch die vereinfachte Abbildung der Behandlungsanlage als problematisch einzustufen, da das betrachtete System eine möglichst detaillierte Berücksichtigung aller entsorgungslogistischen Prozesse erfordert.

Zusammenfassend kann aus den beschriebenen Modellen abgeleitet werden, dass einerseits sehr differenzierte Modelle zur Abbildung einzelner entsorgungs-

---

<sup>166</sup> Zusätzliche Erweiterungen werden z.B. hinsichtlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten wie beispielsweise der Nachfrage, Preisen und Wechselkursen (vgl. [Vidal et al. 2000] und [Fleischmann et al. 2002]) und der Integration von finanziellen Einflussgrößen in der Zielfunktion, zur Abbildung der Beeinflussung globaler Netzwerke durch Wechselkurse und nationale Steuern (vgl. [Popp 1983], [Canel et al. 1997] und [Vidal et al. 2001]) gefordert.

logistischer Prozesse und andererseits integrative Ansätze auf regionaler, nationaler und globaler Ebene existieren. Demgegenüber mangelt es an integrativen Ansätzen auf Werksebene, weshalb im folgenden Kapitel die Entwicklung eines geeigneten Modells zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks präsentiert wird.

## 5.4 Modellbeschreibung LINK<sup>opt</sup>-WMP

### 5.4.1 Einführung

Zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks unter verschiedenen Rahmenbedingungen wurde das Stoffflussmodell LINK<sup>opt</sup>-WMP<sup>167</sup> entwickelt<sup>168</sup>. Die Variante LINK<sup>opt</sup>-WMP basiert auf demselben Ansatz wie das in Kapitel 4.4 vorgestellte Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP, weshalb sowohl die Modellarchitektur als auch das mathematische Gleichungssystem der beiden Modellvarianten in weiten Teilen identisch sind. Da sich aus dem Transfer des Ansatzes auf die entsorgungslogistischen Prozesse einige grundlegende Veränderungen ergeben bzw. Erweiterungen notwendig sind, wird aus Gründen der Vollständigkeit und der Übersichtlichkeit das Modell erneut beschrieben.

Neben den Zubauentscheidungen für Neuanlagen und Stilllegungsentscheidungen für bestehende Anlagen sowie Zeitpunkt und Umfang deren Nutzung sind in LINK<sup>opt</sup>-WMP werden die Transporte zwischen den einzelnen Anlagen und die Möglichkeit zur Lagerung der angefallenen Abfälle optimiert. Bezüglich der Lagerung werden analog zu den abgebildeten Anlagen die Kapazität und Nutzung, d.h. Zeitpunkt der Lagerung einer Abfallart sowie die gelagerte Menge, optimiert. Im Rahmen der Transportplanung werden die Anzahl der Transporte sowie die Zusammensetzung der Ladung geregelt. Es wird hierbei also festgelegt, welcher Container zu welchem Zeitpunkt mit welchem Transportmittel befördert wird. Die gleichzeitige Berücksichtigung der Lagerungs-, Transport- und Behandlungsalternativen stellt eine wichtige Voraussetzung für die mittel- bis langfristige Ausgestaltung eines Entsorgungskonzeptes dar. Wie auch in LINK<sup>opt</sup>-JPP kann in LINK<sup>opt</sup>-WMP der Betrachtungszeitraum flexibel gewählt werden. Aufgrund der spezifischen Anforderungen des Anwendungsfalls beträgt er jedoch üblicherweise 5 Jahre.

Primär sollen folgende Fragestellungen durch den Einsatz des entwickelten Modells LINK<sup>opt</sup>-WMP untersucht werden:

- Inwieweit können durch die Durchführung von Entsorgungsdienstleistungen auf dem Werksgelände von Abfallemittenten ökonomische Vorteile für das Gesamtsystem bzw. die einzelnen Akteure erzielt werden?
- Wie sollte ein Entsorgerpark unter den gegebenen Rahmenbedingungen ausgestaltet sein? Welche Anlagen sollten für welche Abfallarten implementiert

---

<sup>167</sup> LINK<sup>opt</sup> steht für to link (engl. verbinden) und to optmise (engl. optimieren). WMP: **W**aste **M**anagement **P**ark.

<sup>168</sup> Da dieses Modell das erste der LINK<sup>opt</sup>-Modellvarianten darstellt, wurde im Rahmen der Vorstellung des Prototypen lediglich die Bezeichnung LINK<sup>opt</sup> verwendet (z.B. in [Tietze-Stöckinger et al. 2003b]).

werden? Inwieweit sollten Abfälle bereits auf dem Werksgelände der Abfallerzeuger gelagert werden?

- Ist durch die Errichtung eines Entsorgerparks eine Reduktion der zurückgelegten Transportkilometer möglich?
- Welche Veränderungen der Rahmenbedingungen wirken sich vorteilhaft auf das Konzept eines Entsorgerparks aus?

Das Modell LINK<sup>opt</sup>-WMP ist in der Programmiersprache GAMS<sup>169</sup> implementiert, und zur Lösung wird wie auch bei LINK<sup>opt</sup>-JPP der kommerzielle Solver CPLEX 9.0<sup>170</sup> eingesetzt. Der methodische Ansatz ist bei beiden LINK<sup>opt</sup>-Modellvarianten die mehrperiodige, gemischt-ganzzahlige, lineare Optimierung mit der Zielfunktion, alle auf das Basisjahr diskontierten entscheidungsrelevanten Systemausgaben zu minimieren. Wesentliche Charakteristika des realen Entsorgungssystems werden mittels technischer und ökonomischer Restriktionen abgebildet.

Treibende Größe des Modells ist die für sämtliche Produktionsunternehmen exogen vorgegebene Menge anfallenden Abfalls. Diese Abfälle können sowohl mittels der bestehenden Entsorgungsstrukturen als auch über zugebaute Neuanlagen bzw. Lager im Entsorgerpark entsorgt werden. Die unterschiedlichen Anlagen werden in LINK<sup>opt</sup>-WMP anhand von technischen und ökonomischen Parametern abgebildet. Im Rahmen der Systemoptimierung wird unter der Berücksichtigung gegebener systemtechnischer Restriktionen eine unternehmensübergreifend ausgabenminimale Struktur des Entsorgungssystems zur Entsorgung der exogen vorgegebenen Abfallmenge ermittelt.

Das reale Entsorgungssystem wird mittels einer Graphenstruktur (siehe Kapitel 5.4.2.1) in LINK<sup>opt</sup>-WMP dargestellt. Da diese Graphenstruktur primär die Charakteristika leitungsgebundener Güter widerspiegelt, sind zur Abbildung der Transportvorgänge zusätzliche Restriktionen notwendig. Die differenzierte Parametrisierung der Entsorgungsstrukturen umfasst deshalb in LINK<sup>opt</sup>-WMP die Behandlung und Lagerung der Abfälle sowie deren Transport zwischen den jeweiligen Standorten der Anlagen und Lager.

Zuzüglich einer realitätsnahen Abbildung der tatsächlichen Behandlungs- und Lagerungsmöglichkeiten ist im Rahmen der Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks eine adäquate Wiedergabe der Transporte von zentraler Bedeutung. Die unterschiedlichen Transportmittel differieren nicht nur hinsichtlich ihrer ökonomischen Charakteristika, sondern auch bezüglich ihrer maximalen Zuladung sowie der Ladungsträger bzw. deren Kombination. Neben technischen Restriktionen zur Abbildung der Unterschiede der einzelnen Behandlungsanlagen werden im Modell deshalb weitere technische Restriktionen zur Modellierung der unterschiedlichen Transportvarianten integriert (siehe Kapitel 5.4.2.3.2).

Wie auch in LINK<sup>opt</sup>-JPP können zwei Gruppen von Optimiervariablen in LINK<sup>opt</sup>-WMP unterschieden werden: Fluss- und Kapazitätsvariablen. Kapazitäts-

---

<sup>169</sup> General Algebraic Modelling System (vgl. [Brooke et al. 1998]).

<sup>170</sup> Vgl. hierzu auch [GAMS 2004].

variablen umfassen sämtliche Zubauentscheidungen (sowohl Neuanlagen als auch Erweiterungen). Sämtliche Entscheidungen bezüglich des Anlageneinsatzes, der gelagerten Abfallmengen und der Transporte der Abfälle werden mittels der Flussvariablen erfasst. Die Berücksichtigung Zeitschritt übergreifender Aspekte im Rahmen dieses mehrperiodigen Bottom-Up-Ansatzes bezieht sich im Wesentlichen auf den Einfluss einer Investitionsentscheidung auf die in Folgeperioden zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Behandlungsanlagen und Lager.

## 5.4.2 Mathematische Beschreibung des LINK<sup>opt</sup>-WMP Modells

### 5.4.2.1 Modellelemente, Parameter und Variablen

Die Modellstruktur von LINK<sup>opt</sup>-WMP entspricht einem gerichteten Graphen, in dem zur Abbildung des realen Entsorgungssystems Kanten und Knoten verwendet werden. Die Kanten dienen zur Darstellung der Stoffflüsse, während die Knoten so genannte Produzenten darstellen. Produzenten entsprechen in LINK<sup>opt</sup>-WMP den Standorten der einzelnen Behandlungsanlagen und Lager, in denen die Abfälle umgewandelt, gelagert oder nachgefragt werden. Die Modellarchitektur von LINK<sup>opt</sup>-WMP basiert auf sechs Grundelementen auf unterschiedlichen Hierarchieebenen (vgl. Abbildung 21).

Sektoren (Index *sec*, Indexmenge *SEC*) stellen eine der Strukturebene des Modells übergeordnete Aggregationsebene dar und dienen der Gruppierung der Produzenten zu höher aggregierten Einheiten. Im Rahmen der hier adressierten Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks repräsentieren sie die beteiligten Unternehmen sowie eine Gruppe von Anlagen, die sich im Besitz von Unternehmen außerhalb der Kooperation befinden.

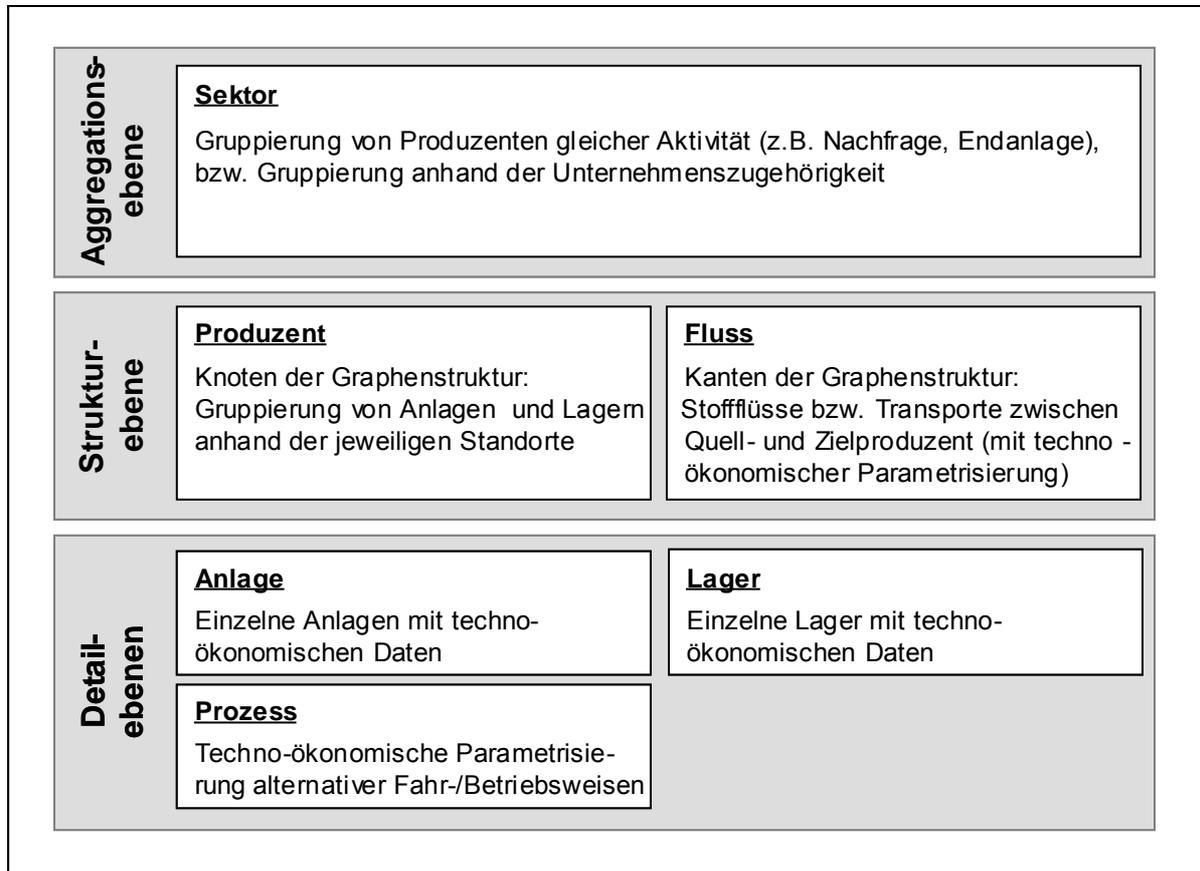
Produzenten (Index *prod* (bzw. *prod'*), Indexmenge *PROD* (bzw. *PROD'*)) und Flüsse bilden die Strukturebene des Modells. Produzenten, die den Knoten des gerichteten Graphen entsprechen, werden durch Flüsse verbunden. Den Produzenten können Anlagen und Lager mit ihren entsprechenden Prozesstätigkeiten zugeordnet sein. Das Modell folgt einem streng hierarchischen Aufbau, sodass jeder Produzent eindeutig einem einzigen Sektor und jede Anlage bzw. jedes Lager einem einzigen Produzenten zugeordnet ist.

Flüsse werden durch den Quellproduzenten *prod*, den Zielproduzenten *prod'* und der übertragenen<sup>171</sup> Abfallart (Index *mt*, Indexmenge *MT*) eindeutig beschrieben. Die übertragene Abfallmenge wird mittels der Variablen  $FL_{prod,prod',mt,seas,t}$  (*mt*-Fluss von *prod* nach *prod'* in der Zeitscheibe *seas* der Periode *t*) abgebildet und wird im Rahmen der Systemoptimierung ermittelt. Wichtige Parameter zur Beschreibung der Flüsse sind

- variable Flusskosten  $Cvar_{prod,prod',mt,t}$ ,
- Flussobergrenzen  $FLMax_{prod,prod',mt,t}$  (maximal übertragbare Abfallmenge),

<sup>171</sup> Im Rahmen der hier beschriebenen Zusammenhänge wird der Begriff Transport ausdrücklich vermieden, da die Flüsse lediglich zur Verbindung der Produzenten dienen und nicht die im Modell hinerlegten Transportvorgänge widerspiegeln. Zur Modellierung der Transportvorgänge siehe Kapitel 5.4.2.3.2.

- Flussuntergrenzen  $FLMin_{prod,prod',mt,t}$  (Mindestübertragungsmenge) und
- exogen determinierte Übertragungsmengen  $FLLev_{prod,prod',mt,t}$



**Abbildung 21:** Modellelemente und Hierarchieebenen des Modells LINK<sup>opt</sup>-WMP<sup>172</sup>

Anlagen (Index  $unit$ , Indexmenge  $UNIT$ ) stellen die Behandlungsanlagen des realen Entsorgungssystems dar. Ihre Kapazitäten werden mittels der Variablen  $Cap_{unit,t}$  (installierte Kapazität einer Anlage  $unit$  in der Periode  $t$ ) und  $NewCap_{unit,t}$  (Zubau oder Kapazitätzuwachs der Anlage  $unit$  in der Periode  $t$ ) beschrieben. Die techno-ökonomische Parametrisierung der Anlagen umfasst

- $MaxCap_{unit,t}$  (maximal zulässige, installierte Leistung einer Anlage  $unit$  in Periode  $t$  zur Begrenzung des Zubaus),
- $ResCap_{unit,t}$  (zur Verfügung stehende, gegenwärtig bereits installierte Leistung einer Anlage) und
- $FacCap_{unit,t}$  (Kapazität einer Anlage, deren ganzzahliges Vielfaches zugebaut werden kann).

Weitere Parameter zur techno-ökonomischen Beschreibung der Anlagen sind

- die fixen Leistungsausgaben  $Cfix_{unit,t}$  einer Anlage  $unit$  in Periode  $t$  und

<sup>172</sup> In LINK<sup>opt</sup>-WMP wird auf die Aggregationsebene Region verzichtet, da aufgrund der Struktur der Fallstudie die Einheiten bereits auf Sektorebene zu den einzelnen Unternehmen gruppiert werden.

- für den Fall eines Anlagenzubaus die spezifischen Investitionen  $C_{inv_{unit,t}}$ .

Den Anlagen sind zur Abbildung der unterschiedlichen Anlagenfahrweisen jeweils ein oder mehrere Prozesse (Index  $proc$ , Indexmenge  $PROC$ ) zugeordnet. Auch in LINK<sup>opt</sup>-WMP sind sowohl die Wahl zwischen alternativ nutzbaren Prozessen als auch deren zeitliche Einlastung Gegenstand der Optimierung. Zur Beschreibung der Prozessnutzung werden die Variablen  $PL_{proc,t}$  und bei saisonal differenzierter Betrachtung  $PL_{proc,seas,t}$  (Aktivitätsniveaus eines Prozesses  $proc$  in der Zeitscheibe  $seas$  in Periode  $t$ ) verwendet. Zur techno-ökonomischen Charakterisierung der Prozesse dienen nachstehende Parameter:

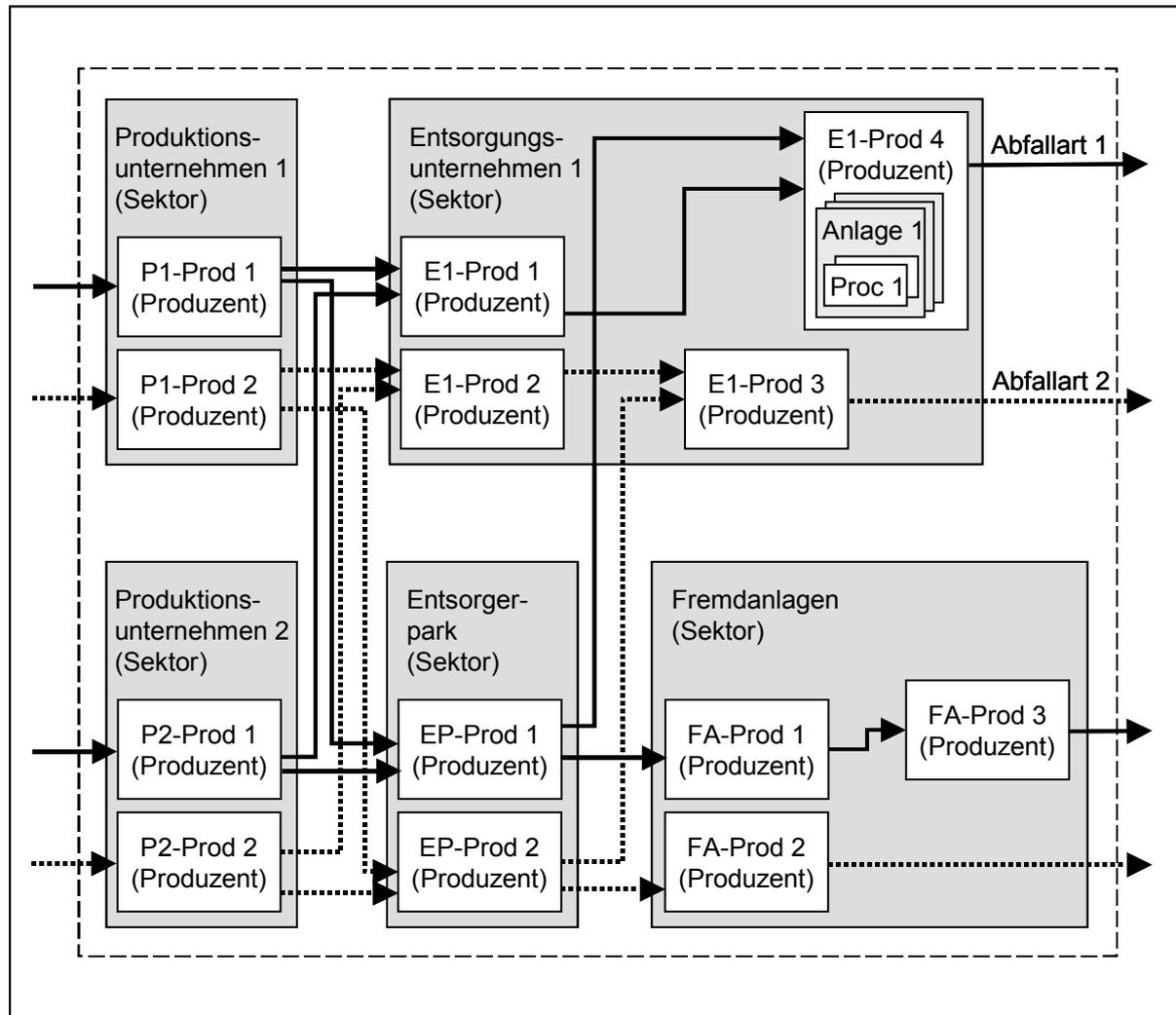
- $\eta_{proc,t}$  (Wirkungsgrad),
- $Cvar_{proc,t}$  (variable Ausgaben) und
- $\alpha_{proc,mt}$  (Anteile der verschiedenen Stoffarten am Output).

In Analogie zum Grundelement Anlagen wurde das Grundelement Lager (Index  $stor$ , Indexmenge  $STOR$ ) in die Modellarchitektur integriert. Die Kapazitäten der Lager sind Gegenstand der Optimierung und werden mit den Variablen  $Cap_{stor,t}$  (installierte Kapazität eines Lagers  $stor$  in der Periode  $t$ ) und  $NewCap_{stor,t}$  (Zubau oder Kapazitätzuwachs des Lagers  $stor$  in der Periode  $t$ ) beschrieben. Des Weiteren wird die Variable Lagerbestand  $SL_{stor,mt,seas,t}$  (des Stoffes  $mt$  in einem Lager  $stor$  in der Zeitscheibe  $seas$  der Periode  $t$ ) optimiert. Die techno-ökonomische Parametrisierung der Lager entspricht der Parametrisierung der Anlagen:

- $MaxCap_{stor,t}$  ist die maximal zulässige, installierte Leistung eines Lagers  $stor$  in Periode  $t$  zur Begrenzung des Zubaus.
- $ResCap_{stor,t}$  stellt die zur Verfügung stehende, gegenwärtig bereits installierte Kapazität eines Lagers dar.
- $FacCap_{stor,t}$  beschreibt die Anzahl der Stellplätze eines Lagers, deren ganzzahliges Vielfaches zugebaut werden kann.
- $Cfix_{stor,t}$  sind die fixen Ausgaben bestehender und zugebauter Lager.
- $Cinv_{stor,t}$  stellen die im Falle eines Lagerzubaus aufzuwendenden spezifischen Investitionen dar.

Zusätzlich zu diesen mit der Parametrisierung der Anlagen identischen Parametern werden die Lager durch die variablen Ausgaben für die Lagerung eines Stoffes  $mt$  im Lager  $stor$  in Periode  $t$  durch den Parameter  $Cvar_{stor,mt,t}$  beschrieben.

In Abbildung 22 wird eine vereinfachte Darstellung der Grundstruktur des LINK<sup>opt</sup>-WMP Modells wiedergegeben, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich zwei unterschiedliche Abfallarten in der Darstellung abgebildet wurden.



**Abbildung 22:** Vereinfachte Darstellung der Modell-Grundstruktur des Modells LINK<sup>opt</sup>-WMP

Aus den Quellen des Graphen fließen vorgegebene Jahresabfallmengen in die Produzenten der Sektoren Produktionsunternehmen 1 und Produktionsunternehmen 2 ein. In diesen Produzenten werden die Jahresabfallmengen gemäß der Zusammenhänge im abzubildenden realen System auf die einzelnen Zeitscheiben verteilt. Entsprechend der Entsorgungspfade des realen Systems werden Flüsse zwischen den Produzenten der Produktionsunternehmen und den Produzenten des Entsorgungsunternehmens, denen der Fremdanlagen und des Entsorgerparks definiert. Abfallart 1 kann u.a. über die Produzenten E1-Prod 1 und E1-Prod 4 (beispielhaft für alle Produzenten enthält E1-Prod 4 in der Darstellung mehrere Anlagen und Prozesse) des Sektors Entsorgungsunternehmen 1 entsorgt werden oder über EP-Prod 1 des Sektors Entsorgerpark und FA-Prod 1 sowie FA-Prod 3 des Sektors Fremdanlagen durchgeführt werden.

Die vom Benutzer vorgegebene und zwingend zu entsorgende Jahresabfallmenge der einzelnen Unternehmen stellt die treibende Größe des Modells dar. Ziel der Systemoptimierung ist die Ermittlung derjenigen Systemstruktur und Nutzung der einzelnen Anlagen und Flüsse, in deren Rahmen die Entsorgung dieser exogen

vorgegebenen Abfallmenge unter Berücksichtigung aller gegebenen Restriktionen bei minimalen Gesamtausgaben möglich ist.

#### 5.4.2.2 Zielfunktion

Im Modell LINK<sup>opt</sup>-WMP werden die bei der Entsorgung der vorgegebenen Abfallmengen entstehenden Systemausgaben minimiert. Der Zielfunktionswert ergibt sich aus der Summe aller auf das Basisjahr diskontierten, entscheidungsrelevanten Ausgaben (siehe Gleichung (5.1)).

$$\min \sum_{t \in T} \alpha_t \cdot \left( \begin{aligned} & \left( \sum_{prod \in PROD} \sum_{mt \in MT} \sum_{prod' \in PROD'}_{prod, mt} \left( FL_{prod, prod', mt, t} \cdot Cvar_{prod, prod', mt, t} \right) \right) \\ & + \left( \sum_{exp \in EXP} \sum_{mt \in MT} \sum_{prod \in PROD} \left( FL_{prod, exp, mt, t} \cdot Cvar_{prod, exp, mt, t} \right) \right) \\ & + \sum_{seas \in SEAS} \sum_{prod \in PROD} \sum_{prod' \in PROD'}_{prod} \left( \begin{aligned} & TR1_{prod, prod', t, seas} \cdot Ctr1_{prod, prod', t} \\ & + TR2_{prod, prod', t, seas} \cdot Ctr2_{prod, prod', t} \\ & + TR12_{prod, prod', t, seas} \cdot Ctr12_{prod, prod', t} \\ & + TR13_{prod, prod', t, seas} \cdot Ctr13_{prod, prod', t} \\ & + TR24_{prod, prod', t, seas} \cdot Ctr24_{prod, prod', t} \end{aligned} \right) \\ & + \left( \sum_{proc \in PROC} \left( PL_{proc, t} \cdot Cvar_{proc, t} \right) \right) \\ & + \left( \sum_{stor \in STOR} \left( SL_{stor, mt, t, seas} \cdot Cvar_{stor, mt, t} \right) \right) \\ & + \left( \sum_{unit \in UNIT} \left( \begin{aligned} & \left( Cap_{unit, t} \cdot Cfix_{unit, t} \right) \\ & + \left( NewCap_{unit, t} \cdot Cinv_{unit, t} \right) \end{aligned} \right) \right) \\ & + \left( \sum_{stor \in STOR} \left( \begin{aligned} & \left( Cap_{stor, t} \cdot Cfix_{stor, t} \right) \\ & + \left( NewCap_{stor, t} \cdot Cinv_{stor, t} \right) \end{aligned} \right) \right) \end{aligned} \right) \quad (5.1)$$

Alle flussabhängigen Ausgaben sind im ersten Summenterm der Zielfunktion enthalten. Im zweiten Term werden die Ausgaben der zur Entsorgung notwendigen, verschiedenen Einzeltransporte erfasst<sup>173</sup> (hinsichtlich der unterschiedlichen

<sup>173</sup> Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Transportmittel wird hierbei nicht berücksichtigt. Dies liegt jedoch nicht im Modellansatz begründet, sondern vielmehr in den Datensätzen, die im Rahmen des konkreten Anwendungsfalles von den Praxispartnern zur Verfügung gestellt wurden. Analog zu den Lagern und Anlagen ist eine Integration der Kapazitätsbeschränkungen der Transportmittel in das hier beschriebene Modell möglich.

Transportarten siehe auch Kapitel 5.4.2.3.2). Der dritte Term der Zielfunktion umfasst die variablen Ausgaben für Prozesse, d.h. die Behandlung der Abfälle, sowie die variablen Ausgaben für eine etwaige Lagerung der Abfälle. Der unterste Zielfunktionsterm enthält die fixen Ausgaben für den Gesamtbestand an Anlagen und Lagern sowie Investitionen für zugebaute Anlagen und Lager.

### 5.4.2.3 Restriktionen

Im Folgenden werden die technischen, ökonomischen und ökologischen Nebenbedingungen von LINK<sup>opt</sup>-WMP dargestellt. Auch in diesem Anwendungsfall bzw. in dieser Modellvariante kommen dem Umgang mit Nicht-Linearitäten sowie der Wahl eines dem analysierten Problem entsprechenden Detaillierungsgrads eine wichtige Bedeutung zu. Durch die Integration ganzzahliger Variablen werden in der hier beschriebenen Modellvariante gegenüber rein linearen Optimierproblemen entscheidende Verbesserungen bezüglich des Anlagenzubaus und der Darstellung der Entsorgungstransporte erzielt. Während in rein linearen Modellen die Transporte auf der Basis im Vorfeld ermittelter Transportkostensätze pro beförderter Einheit dargestellt werden, kann durch die Verwendung ganzzahliger Variablen in LINK<sup>opt</sup>-WMP zusätzlich die Auslastung der Transporte optimiert werden.

#### 5.4.2.3.1 Stoffflussbilanzgleichungen

Zentrale Restriktionen in LINK<sup>opt</sup>-WMP betreffen die Stoffflussbilanzen in den einzelnen Produzenten des Modells. In LINK<sup>opt</sup>-WMP sind zwei leicht abweichende Gleichungen zur Sicherstellung der Stoffflussbilanz auf Jahres- und saisonaler Betrachtungsebene implementiert: Neben eingehenden und ausgehenden Stoffströmen sowie der Umwandlung von Stoffen wird in den einzelnen Zeitscheiben zusätzlich die Lagerung von Stoffen in den Gleichungen berücksichtigt.

Die Gleichungen (5.2) fordern, dass die Summe aller in einen Produzenten von den Quellen des Graphen  $imp$  oder anderen Produzenten innerhalb des Systems  $prod'$  eingehenden Stoffströme auf Jahresebene zuzüglich der in dem Produzenten erzeugten Stoffmenge den aus dem Produzenten abfließenden Stoffströmen entspricht. Der Verbrauch eines Stoffes  $mt$  bzw. dessen Umwandlung in einen anderen Stoff  $mt'$  wird in diesen Gleichungen berücksichtigt, indem  $_{proc,mt}$  ein negativer Wert für in einen Prozess eingehende Stoffe zugewiesen wird. Die Gleichungen (5.3) gewährleisten für jede Zeitscheibe, dass die Summe aller eingehenden Stoffströme, der produzierten (bzw. verbrauchten Stoffmenge) und dem Lagerbestand der vorangegangenen Zeitscheibe ( $seas-1$ ) gleich der Summe aller ausgehenden Stoffströme zuzüglich dem Lagerbestand der betrachteten Zeitscheibe  $seas$  ist.

$$\begin{aligned}
& \sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,mt,t} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,mt}} FL_{prod',prod,mt,t} \\
& + \sum_{proc \in PROC_{prod,mt}} PL_{proc,t} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \\
& = \sum_{exp \in EXP} FL_{prod,exp,mt,t} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,mt}} FL_{prod,prod',mt,t}
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$\forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD; \quad \forall mt \in MT;$

$$\begin{aligned}
& \sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,mt,t,seas} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,mt}} FL_{prod',prod,mt,t,seas} \\
& + \sum_{proc \in PROC_{prod,mt}} PL_{proc,t,seas} \cdot \frac{\lambda_{proc,mt}}{\eta_{proc,t}} \\
& + \sum_{stor \in STOR_{prod}} SL_{stor,mt,t,(seas-1)} \\
& = \sum_{exp \in EXP} FL_{prod,exp,mt,t,seas} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,mt}} FL_{prod,prod',mt,t,seas} \\
& + \sum_{stor \in STOR_{prod}} SL_{stor,mt,t,seas}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

$\forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD; \quad \forall mt \in MT; \quad \forall seas \in SEAS;$

Mittels Konsistenzgleichungen wird gewährleistet, dass die Summe der in den einzelnen Zeitscheiben verrichteten Arbeit  $PL_{proc,t,seas}$  der jährlichen Arbeit  $PL_{proc,t}$  (Gleichungen (5.4)) und die Summe der in den einzelnen Zeitscheiben zwischen zwei Produzenten fließenden bzw. beförderter Stoffmenge  $FL_{prod,prod',mt,t,seas}$  dem Jahreswert der Flussnutzung  $FL_{prod,prod',mt,t}$  (Gleichungen (5.5)) entsprechen.

$$\sum_{seas \in SEAS} PL_{proc,t,seas} = PL_{proc,t} \tag{5.4}$$

$\forall t \in T; \quad \forall proc \in PROC;$

$$\sum_{seas \in SEAS} FL_{prod,prod',mt,t,seas} = FL_{prod,prod',mt,t} \tag{5.5}$$

$\forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD; \quad \forall prod' \in PROD'; \quad \forall mt \in MT;$

#### 5.4.2.3.2 Transporte

Im Rahmen des hier betrachteten Anwendungsfalls werden zwei unterschiedliche Behältertypen differenziert, für die jeweils zwischen drei Transportarten gewählt

werden kann. Die Ungleichungen (5.6) stellen für Abfälle im Behältertyp *MP* sicher, dass das Produkt aus der Anzahl der Transporte zwischen den Produzenten *prod* und *prod'* und der maximal hierauf beförderten Behälter (1 oder 2) mindestens der zwischen diesen Produzenten fließenden Stoffmenge entspricht. Analoges hierzu fordern die Ungleichungen (5.7) für Abfälle in IBC, von denen bis zu 12 bzw. 24 unterschiedliche Behälter zu einem Transport kombiniert werden können.

$$\sum_{prod' \in PROD'} \left( \begin{array}{l} TR1_{prod, prod', t, seas} \cdot 1 \\ + TR2_{prod, prod', t, seas} \cdot 2 \\ + TR13_{prod, prod', t, seas} \cdot 1 \end{array} \right) \geq \sum_{mt \in MT_{mp}} FL_{prod, prod', mt, t, seas} \quad (5.6)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD; \quad \forall seas \in SEAS;$$

$$\sum_{prod' \in PROD'} \left( \begin{array}{l} (TR12_{prod, prod', t, seas} \cdot 12) \\ + (TR13_{prod, prod', t, seas} \cdot 12) \\ + (TR24_{prod, prod', t, seas} \cdot 24) \end{array} \right) \geq \sum_{mt \in MT_{ibc}} FL_{prod, prod', mt, t, seas} \quad (5.7)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD; \quad \forall seas \in SEAS;$$

Aus dieser Abbildungsweise der Transporte ergibt sich zwingend, dass die zu entsorgende Abfallmenge in der Einheit „Anzahl Behälter vom Typ MP“ bzw. „Anzahl Behälter vom Typ IBC“ vom Benutzer vorgegeben werden muss. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in einer deutlichen Reduktion der benötigten ganzzahligen Variablen, da eine jeweilige Umrechnung der Abfallmengen in zu transportierende Behälter entfällt. Demgegenüber müssen hierdurch folgenden Konventionen im Rahmen der Abbildung des realen Systems eingehalten werden:

- Definition zweier Stoffformen *mt* und *mt'* für dieselbe Abfallart in unterschiedlichen Behältern sowie entsprechende Zuweisung dieser Stoffformen zu den Sets  $MT_{mp}$  und  $MT_{ibc}$ ,
- Eingabe sämtlicher Parameter bezogen auf die Behälterart (z.B. €/IBC und €/MP) sowie
- Darstellung des Umschlags einer Abfallart als Prozess (z.B. Umwandlung von  $MT_{ibc}$  in  $MT_{mp}$ ) mit entsprechendem Wirkungsgrad zur Umrechnung der jeweils enthaltenen Abfallmenge.

Zur Begrenzung der Transporte sind die Gleichungen (5.8) und (5.9) in LINK<sup>opt</sup>-WMP integriert. Durch Festsetzung einer Obergrenze<sup>174</sup> für die Variable  $Mil_t$  bzw.  $MilMot_t$  werden die in einer Periode *t* insgesamt zurückgelegten Transportkilometer  $Mil_t$  bzw.

<sup>174</sup> Neben der Vorgabe einer Obergrenze können die Transportkilometer durch deren Berücksichtigung in der Zielfunktion im Rahmen eines Distance-to-Target-Ansatzes stärker gewichtet werden (vgl. hierzu auch [Tietze-Stöckinger et al. 2004b]).

die auf Autobahnen zurückgelegten Transportkilometer  $MilMot_t$  entsprechend beschränkt.

Aus diesen Gleichungen wird bereits ersichtlich, dass nicht sämtliche Transporte mittels der ganzzahligen Variablen  $TRX_{prod,prod',t,seas}$  ( $X \in \{1,2,12,13,24\}$ ) abgebildet wurden, sondern auch auf die in rein linearen Optimierproblemen bzw. Modellen mit höherem Aggregationsgrad übliche Abbildung mit Hilfe durchschnittlicher Ausgaben bzw. Entfernung pro beförderter Einheit zurückgegriffen wurde. Hinsichtlich einer Erklärung dieser unterschiedlichen Vorgehensweisen innerhalb des hier vorgestellten Modells wird an dieser Stelle auf Kapitel 5.5.5 verwiesen.

$$Mil_t = \sum_{seas \in SEAS} \left( \sum_{prod \in PROD} \sum_{prod' \in PROD'} \left( \begin{array}{l} TR1_{prod,prod',t,seas} \\ + TR2_{prod,prod',t,seas} \\ + TR12_{prod,prod',t,seas} \\ + TR13_{prod,prod',t,seas} \\ + TR24_{prod,prod',t,seas} \\ + \sum_{mt \in MT} FL_{prod,prod',mt,t,seas} \end{array} \right) \cdot Dist_{prod,prod'} \right) + \sum_{exp \in EXP} \sum_{mt \in MT} \sum_{prod \in PROD_{exp,mt}} (FL_{prod,exp,mt,t,seas} \cdot Dist_{prod,exp}) \quad (5.8)$$

$\forall t \in T;$

$$MilMot_t = \sum_{seas \in SEAS} \left( \sum_{prod \in PROD} \sum_{prod' \in PROD'} \left( \begin{array}{l} TR1_{prod,prod',t,seas} \\ + TR2_{prod,prod',t,seas} \\ + TR12_{prod,prod',t,seas} \\ + TR13_{prod,prod',t,seas} \\ + TR24_{prod,prod',t,seas} \\ + \sum_{mt \in MT} FL_{prod,prod',mt,t,seas} \end{array} \right) \cdot DistMot_{prod,prod'} \right) + \sum_{exp \in EXP} \sum_{mt \in MT} \sum_{prod \in PROD_{exp,mt}} (FL_{prod,exp,mt,t,seas} \cdot DistMot_{prod,exp}) \quad (5.9)$$

$\forall t \in T;$

### 5.4.2.3.3 Kapazitätsrestriktionen

Neben der Anzahl der Entsorgungstransporte und deren Auslastung sind auch die Kapazitäten der Lager und Anlagen sowie deren Nutzung (siehe Kapitel 5.4.2.3.4 und 5.4.2.3.5) Gegenstand der Optimierung<sup>175</sup>.

$$Cap_{unit,t} = ResCap_{unit,t} + \sum_{t'=(t-LLT_{unit})}^t NewCap_{unit,t'} \quad (5.10)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T;$$

$$NewCap_{unit,t} = FacCap_{unit,t} \cdot NCap_{unit,t} \quad (5.11)$$

$$\forall unit \in UNIT; \quad \forall t \in T;$$

$$Cap_{stor,t} = ResCap_{stor,t} + \sum_{t'=(t-LLT_{stor})}^t NewCap_{stor,t'} \quad (5.12)$$

$$\forall stor \in STOR; \quad \forall t \in T;$$

$$NewCap_{stor,t} = FacCap_{stor,t} \cdot NCap_{stor,t} \quad (5.13)$$

$$\forall stor \in STOR; \quad \forall t \in T;$$

Die gesamte installierte Kapazität einer Anlage  $Cap_{unit,t}$  (Gleichungen (5.10)) sowie die eines Lagers  $Cap_{stor,t}$  (Gleichungen (5.12)) resultiert aus Addition der vor dem Betrachtungszeitraum installierten Kapazitäten ( $ResCap_{unit,t}$  und  $ResCap_{stor,t}$ ) und der bis zur oder in der betrachteten Periode  $t$  neu installierten Kapazitäten ( $NewCap_{unit,t}$  und  $NewCap_{stor,t}$ ). Durch die Gleichungen (5.11) wird für Anlagen, (5.13) für Lager sichergestellt, dass die zugebauten Kapazitäten einem ganzzahligen Vielfachen der hinterlegten Blockgrößen bzw. der Standardanzahl an Stellplätzen entsprechen.

### 5.4.2.3.4 Anlagenfahrweisen und Prozessnutzung

Die Beschränkung jeglicher Prozessnutzung auf die zur Verfügung stehenden Kapazitäten der entsprechenden Anlagen wird mittels der Ungleichungen (5.14) auf Jahresebene und (5.15) auf saisonal differenzierter Betrachtungsebene gewährleistet. In diesen Ungleichungen spiegeln sich auch die Wechselwirkungen zwischen der Ausbau- und Einsatzplanung der Anlagen wider: Sollen Prozesse einer Anlage über die bestehenden Kapazitäten hinaus betrieben werden, so ist eine Kapazitätserweiterung gemäß der Gleichungen (5.10) und (5.11) notwendig.

<sup>175</sup> Im Gegensatz zu LINK<sup>opt</sup>-JPP ist in LINK<sup>opt</sup>-WMP kein Rückbau bestehender Anlagen oder Lager möglich. Dies liegt jedoch nicht in einer mangelnden Funktionalität des Modells begründet, sondern erklärt sich aus den Spezifika des hier betrachteten Anwendungsfalls.

$$Cap_{unit,t} \cdot h_{year} \geq \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,t} \cdot \Omega_{proc,t}) \quad (5.14)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT;$$

$$Cap_{unit,t} \cdot h_{seas} \geq \sum_{proc \in PROC_{unit}} (PL_{proc,seas,t} \cdot \Omega_{proc,t}) \quad (5.15)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT; \quad \forall seas \in SEAS;$$

Eine weitere Einschränkung der Prozessnutzung ist notwendig, um für jede im Modell abgebildete Abfallart exakt einen Entsorgungspfad zu bestimmen. Ohne eine solche Einschränkung können in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen (z.B. unterschiedliche Abfallmengen der einzelnen Abfallarten in einzelnen Zeitscheiben) innerhalb einer Periode  $t$  mehrere unterschiedliche Entsorgungspfade genutzt werden. Dies würde jedoch die Entscheidungsunterstützung für die betrachteten Unternehmen maßgeblich schmälern, weshalb die nachstehenden Ungleichungen (5.16) und (5.17) in das Gleichungssystem des Modells LINK<sup>opt</sup>-WMP integriert wurden. Die Ungleichungen (5.16) bestimmen den Aktivitätszustand eines jeden Prozesses, der in einer Verzweigung des Entsorgungssystems angesiedelt ist und die Ungleichungen (5.17) fordern, dass maximal ein Prozess einer Anlage an einer Verzweigung den Aktivitätszustand 1 aufweist. Werden nun an jeder Verzweigung neben Prozessen, die zu einer tatsächlichen Veränderung der Stoffströme führen, auch fiktive Prozesse, die lediglich die Durchleitung eines Stoffstroms darstellen, in das Modell integriert, ist die Auswahl eines einzigen Entsorgungspfades je Abfallart sichergestellt.

$$PL_{proc,t} \leq Acti_{proc,t} \cdot M \quad (5.16)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall proc \in PROC_{path};$$

$$\sum_{proc \in PROC_{unit}} Acti_{proc,t} \leq 1 \quad (5.17)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT_{path};$$

#### 5.4.2.3.5 Lagernutzung

Hinsichtlich der Lagernutzung fordern die Ungleichungen (5.18), dass die zur Verfügung stehende Anzahl der Stellplätze  $Cap_{store,t}$  in jeder Zeitscheibe  $seas$  mindestens der Summe aller im Lager befindlichen Behälter  $SL_{stor,mt,t,seas}$  entspricht. Eine Differenzierung der unterschiedlichen Behälterarten ist im Rahmen dieser

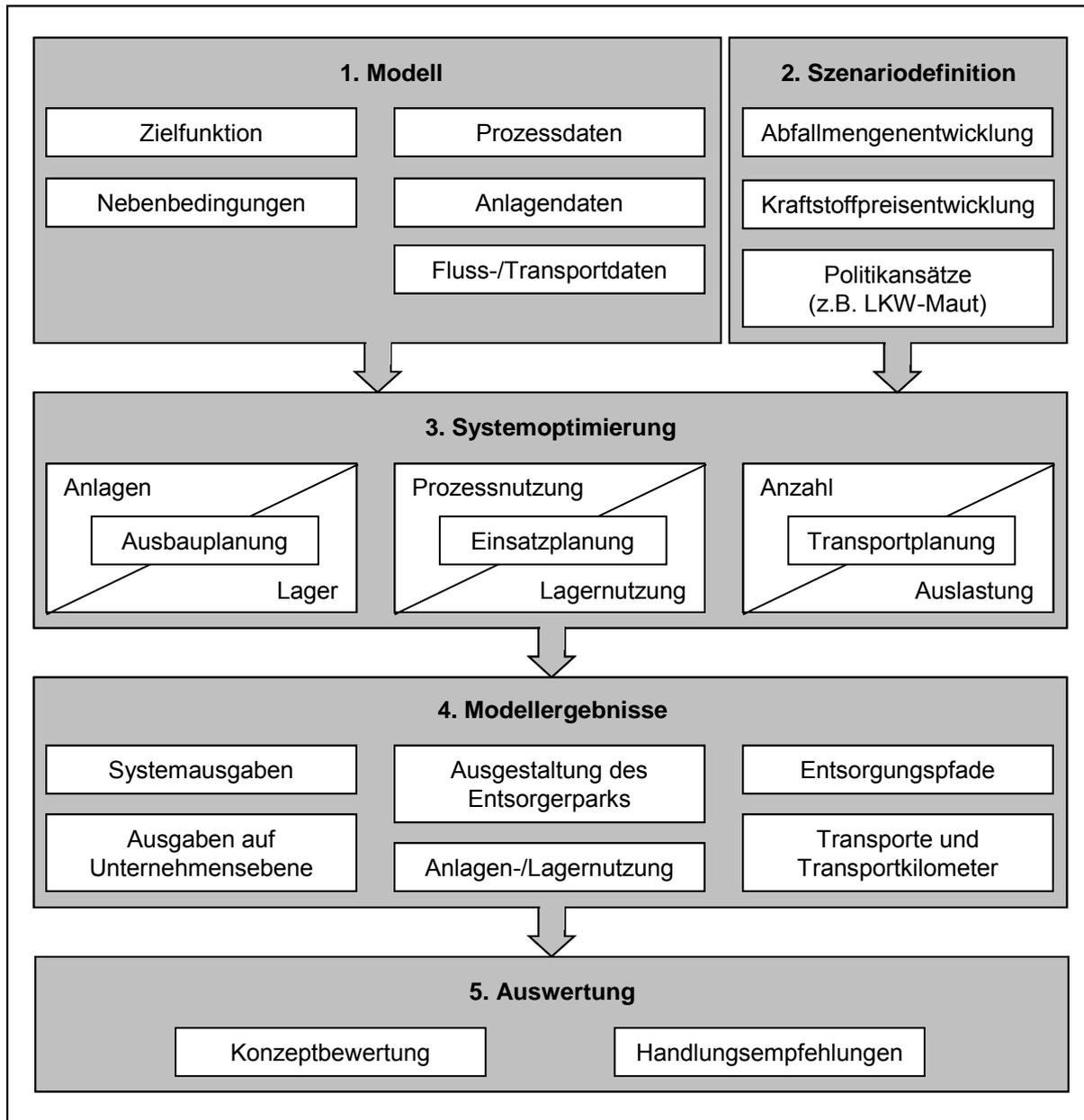
Ungleichungen (5.18) nicht notwendig, da die Struktur des Modells bereits eine fiktive Trennung eines Lagers in einen Teil zur Lagerung von IBC und einen zweiten Teil zur Lagerung von Abrollmulden und –pressen erfordert: Flüsse sind in LINK<sup>opt</sup>-WMP lediglich zwischen den Produzenten der Graphenstruktur definiert. Beim Umschlagen der Abfälle fließen diese nun aus einem Lager *prod* zu einem Produzenten, in dem eine Anlage mit Umschlagsprozess enthalten ist, und können anschließend direkt zur nächstgelegenen Behandlungsstation transportiert werden oder erneut zu einem Lager *prod'* fließen. Indem der Entfernung  $Dist_{prod,prod'}$  zwischen den Produzenten *prod* und *prod'* der Wert null zugewiesen wird, resultiert lediglich eine fiktive geographische Trennung der beiden Lagerteile.

$$Cap_{stor,t} \geq \sum_{mt \in MT} SL_{stor,mt,t,seas} \quad (5.18)$$

$$\forall t \in T; \quad \forall stor \in STOR; \quad \forall seas \in SEAS;$$

### 5.4.3 Modelleinsatz im Rahmen einer Szenarioanalyse

Das entwickelte Modelle LINK<sup>opt</sup>-WMP wird nun im Rahmen einer Szenarioanalyse zur Quantifizierung der Auswirkungen eines Entsorgerparks unter verschiedenen Rahmenbedingungen eingesetzt (vgl. Abbildung 23).



**Abbildung 23:** Ablaufschritte der Szenarioanalyse mit LINK<sup>opt</sup>-WMP

Auf Basis der ermittelten Modellergebnisse (siehe hierzu auch Tabelle 32) kann anschließend eine Bewertung des Konzeptes Entsorgerpark vorgenommen werden. Des Weiteren lassen sich Handlungsempfehlungen für die beteiligten Produktions- und Entsorgungsunternehmen ableiten.

**Tabelle 32:** Analyseoptionen des Modells LINK<sup>opt</sup>-WMP

Themenbereich	Modellergebnis
Ausgaben auf Unternehmens-ebene	Aufteilung der Gesamtsystemausgaben auf die beteiligten Unternehmen (ohne die durch Errichtung und Betrieb eines Entsorgerparks entstehenden Ausgaben)
	Anteile der Ausgaben für die einzelnen entsorgungslogistischen Prozesse an den Gesamtausgaben der Unternehmen
	Basis für die Ausgaben-/Einnahmenaufteilung durch Errichtung und Betrieb eines Entsorgerparks (in Verbindung mit den Ergebnissen hinsichtlich der Ausgestaltung eines Entsorgerparks und der Anlagen-/Lagernutzung durch die einzelnen Unternehmen)
Ausgestaltung eines Entsorgerparks	Art und Kapazität der Anlagen
	Anzahl der Lagerstellplätze in Abhängigkeit der differenzierten Behältertypen
Anlagen-/Lagernutzung	Auslastung der einzelnen Anlagen und Lager
	Umfang der Lager- und Anlagennutzung der unterschiedlichen Unternehmen
Entsorgungspfade	Auswahl eines Entsorgungspfad für jede Abfallart eines Unternehmens
	Veränderung der Entsorgungspfade durch einen Entsorgerpark oder exogene Einflüsse
Transporte und Transportkilometer	Zusammensetzung der Transportchargen
	Verwendete Transportmittel für die einzelnen Abfallarten
	Insgesamt zur Entsorgung zurückgelegte Transportkilometer bzw. auf Autobahnen zurückgelegte Transportkilometer

#### 5.4.4 Kritische Reflexion der gewählten Methodik

Wie bereits im Rahmen der Modellbeschreibung von LINK<sup>opt</sup>-JPP konstatiert wurde, ist eine kritische Reflexion der im Modell getroffenen Annahmen unerlässlich. Da LINK<sup>opt</sup>-JPP und LINK<sup>opt</sup>-WMP auf demselben methodischen Ansatz aufbauen, sollen auch hier

- das zugrundegelegte Akteursverhalten,
- die Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen im Modell und
- der Einfluss der vom Modellentwickler gesetzten Systemgrenzen auf die Modell-ergebnisse

kurz diskutiert werden.

##### 5.4.4.1 Zugrundegelegtes Akteursverhalten

Die Minimierung der entscheidungsrelevanten Systemausgaben über Unternehmensgrenzen hinweg ergibt auch in LINK<sup>opt</sup>-WMP wichtige Konsequenzen hinsichtlich des zugrundegelegten Akteursverhaltens. Während in anderen Modellen häufig Ausbau-, Einsatz und Transportplanung getrennt analysiert werden, bzw. die Transporte stark vereinfacht abgebildet werden, gestattet die integrierte Betrachtung mit LINK<sup>opt</sup>-WMP die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den drei Planungsbereichen. So determiniert auch in LINK<sup>opt</sup>-WMP der im Rahmen der

Ausbauplanung ermittelte Kapazitätzubau die der Einsatzplanung zur Verfügung stehenden Anlagen und Lager. Die optimierte Nutzung der einzelnen Anlagen und Lager bestimmt wiederum den Rahmen der Transportplanung. Eine Veränderung dieser Transporte bzw. deren Reduktion ist neben einer veränderten Anlagen- und Lagernutzung durch andere Behandlungsverfahren in neuen Anlagen oder auch durch einen Ausbau der Lagerkapazitäten möglich. Demnach kann die Sicherstellung einer „optimalen“ Lösung nur durch die integrierte Betrachtung der interdependenten Planungsaspekte gewährleistet werden. Mit der beschriebenen Zielfunktion wird diese Integration durch eine Summierung der jeweils relevanten Ausgaben aus allen drei Planungsbereichen erreicht.

Im Rahmen der Systemgrenzenerweiterung auf ein System aus mehreren Unternehmen müssen einerseits einheitliche Entscheidungskriterien festgelegt werden, andererseits jedoch auch wichtige unternehmensspezifische Unterschiede (wie unterschiedliche Schüttdichte derselben Abfallfraktion) Berücksichtigung finden. Analog zu LINK<sup>opt</sup>-JPP wird den einzelnen Akteuren in LINK<sup>opt</sup>-WMP ein rationales Verhalten unterstellt. Jedoch gilt auch hier, dass die Entscheidungen der Akteure nicht nur durch ökonomische sondern darüber hinaus durch weitere Kriterien beeinflusst werden<sup>176</sup>.

#### **5.4.4.2 Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen im Modell**

Der Vorteil der Wahl einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung liegt insbesondere in der Möglichkeit, die zu analysierenden Transport- und Lagervorgänge detailliert abbilden zu können<sup>177</sup>. Im Gegensatz zu rein linearen Modellen, die z.B. die Transportvorgänge als kontinuierliche Flüsse zwischen zwei Standorten abbilden, kann mit Hilfe von ganzzahligen Variablen die Transportbeladung in den Analysen optimiert werden.

Während im Rahmen der Energiesystemoptimierung der bei linearen Modellen auftretende Bang-Bang-Effekt<sup>178</sup> als Problem erachtet werden muss, ist dieser Effekt bei der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks weniger bedeutend. Die Analyse zielt hierbei nicht auf die Ermittlung eines ausgewogenen Systems, sondern auf die Identifikation einer besten Alternative. Dies gilt zum einen hinsichtlich des Zubaus von Anlagen auf dem Werksgelände, zum anderen jedoch auch für die Wahl der Entsorgungspfade für die unterschiedlichen Abfallfraktionen. Jedoch sind zur Sicherstellung der Wahl je eines Entsorgungspfad für die unterschiedlichen Abfallfraktionen zusätzlich Restriktionen notwendig, da die relative Vorteilhaftigkeit substituierbarer Entsorgungspfade in den einzelnen Zeitscheiben variieren kann. Maßgeblichen Einfluss hierauf besitzt die Summe aller in dieser Zeitscheibe zu transportierenden Abfälle.

Allerdings kann auch bei einer Analyse der Vorteilhaftigkeit eines Entsorgerparks bzw. bei der Optimierung eines Entsorgungssystems eine geringfügige Variation der

---

<sup>176</sup> Vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 2.5 und die Diskussion bezüglich der Implementierungsbarrieren in den Fallstudien in Kapitel 6.

<sup>177</sup> Zu den allgemeinen Vorteilen der gemischt-ganzzahligen Optimierung vgl. Kapitel 4.4.4.2.

<sup>178</sup> Siehe hierzu die kritische Reflexion von LINK<sup>opt</sup>-JPP in Kapitel 4.4.4.2.

Eingangsparameter zu deutlichen Unterschieden in den Modellergebnissen führen. Die Integration von Unsicherheiten relevanter Eingangsparameter in das Modell stellt in diesem Zusammenhang einen interessanten Ansatz dar, konnte jedoch aus Gründen der Modellgröße nicht realisiert werden. Des Weiteren ist infolge der betriebsübergreifenden Sichtweise die Festlegung der hierzu notwendigen Parameter wie Standardabweichung, Risikopräferenzen und Erwartungswert aufgrund der unterschiedlichen Einschätzung der Entscheidungsträger problematisch, weshalb insbesondere der Identifikation relevanter Parameter sowie deren unterschiedlicher Entwicklungen eine besondere Bedeutung zukommt. Im Rahmen von Szenarioanalysen muss deshalb der Einfluss von Variationen dieser Parameter analysiert und bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden, sodass durch eine vergleichende Auswertung der Modellergebnisse unterschiedlicher Szenarios auch hier eine belastbare Zukunftsstrategie abgeleitet werden kann.

#### **5.4.4.3 Systemgrenzen**

Auch bei LINK<sup>opt</sup>-WMP müssen die gewählten Systemgrenzen kritisch hinterfragt werden, da intersektorale Interdependenzen hier ebenfalls vernachlässigt werden. Im Gegensatz zum Energieversorgungsbereich ist dies im Rahmen des hier betrachteten Anwendungsbeispiels von untergeordneter Bedeutung, da makroökonomische Einflüsse üblicherweise in den Absatzprognosen der Produktionsunternehmen berücksichtigt werden, auf deren Basis wiederum die Abfallmengenprognose erstellt wird.

Weitaus kritischer ist im Rahmen des hier vorgestellten Modells, dass ein unterschiedlicher Detaillierungsgrad vergleichbarer Einheiten gewählt werden musste. Dies ist notwendig, da die Abfälle der zu betrachtenden Unternehmen an unterschiedlichen Stellen des Entsorgungssystems mit Abfällen von anderen Unternehmen (außerhalb des zu analysierenden Systems) zusammengeführt werden (können). Informationen hinsichtlich deren Qualität, zeitlichem Anfall und Quantität sind in der Regel für andere Produktionsunternehmen nicht verfügbar, da die Unternehmen befürchten, dass hierdurch Rückschlüsse auf Produktionsprozesse gezogen werden können. Diese fehlenden Informationen verhindern jedoch eine detaillierte Betrachtung der Transportströme nach einer Zusammenführung der Abfälle sowie Betrachtungen der Kapazitäten von externen Behandlungsanlagen und Lagern. Im Rahmen der Modellbildung wurde deshalb zum einen von einer ausreichenden Kapazität der externen Behandlungsanlagen ausgegangen, und zum anderen wurde eine durchschnittliche Transportauslastung nach einer Zusammenführung mehrerer Abfallströme exogen vorgegeben.

Ein vergleichbarer Detaillierungsgrad bei der Abbildung aller jeweils vergleichbaren Einheiten des betrachteten Systems ist nur im Zuge einer deutlich weiteren Ausdehnung der Systemgrenzen möglich. Hierzu müssten sämtliche Abfallströme, die in die einzelnen Behandlungsanlagen und Lager eingehen, ab dem Zeitpunkt und Ort ihrer Entstehung berücksichtigt werden. Jedoch müsste im Rahmen dieser Modellerweiterung aus Gründen der Modellgröße der Detaillierungsgrad der Abbildung deutlich reduziert werden. Hierdurch würde der wesentliche Vorteil eines solchen technologie-fokussierten Bottom-Up-Modells aufgehoben. Darüber hinaus

steht eine Verringerung des Detaillierungsgrades im Widerspruch zur Zielsetzung der Modellentwicklung, da LINK<sup>opt</sup>-WMP primär zur Analyse der Auswirkungen eines Entsorgerparks auf Unternehmensebene entwickelt wurde.

## 5.5 Modellaufbau und verwendete Datenbasis

Das im vorhergehenden Kapitel präsentierte Grundmodell ist weitgehend allgemein gehalten und deshalb auf eine Vielzahl unterschiedlicher Fälle aus dem Entsorgungsbereich anwendbar. Im Rahmen dieses Unterkapitels werden nun die Spezifika des in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfalls vorgestellt sowie dessen modelltechnische Abbildung skizziert.

Nach einer kurzen Vorstellung des betrachteten Systems bzw. der betrachteten Unternehmen und der Ist-Situation der Entsorgung werden Maßnahmen dargestellt, mittels derer Verbesserungspotenziale im Bereich der Entsorgung ausgeschöpft werden können. Darauf aufbauend wird ein Entsorgerpark für das hier betrachtete System konzipiert und beschrieben. Abschließend wird dargestellt, wie die einzelnen realen Transporte, Anlagen und Lager sowie systemtechnische Spezifika in das Modell integriert wurden.

### 5.5.1 Kurzvorstellung der Unternehmen

Im Rahmen der Analysen wurde ein System bestehend aus

- einem Standort eines Automobilherstellers,
- den auf dem Werksgelände in einem Zulieferpark angesiedelten Zulieferunternehmen und
- dem Generalentsorger des analysierten Werks des Automobilherstellers

betrachtet.

Im hier untersuchten Werk des Automobilherstellers werden Karosserien hergestellt, Oberflächen lackiert (Lackierung) und Fahrzeuge montiert. Mit dem Ziel, die Lieferverkehre zu reduzieren, wurde ein Zulieferpark auf dem Werksgelände errichtet, in dem zehn Lieferanten ca. 50 % des Teilevolumens für die Endmontage produzieren<sup>179</sup>. Darüber hinaus sollen mittels der durch die räumliche Nähe bedingten engen Kooperation und der partnerschaftlichen Verwirklichung des gemeinsamen Produktionszieles Kostenvorteile für alle beteiligten Unternehmen geschaffen werden.

Die Zulieferunternehmen sind in einem eigenen Gebäude angesiedelt, von dem aus die Erzeugnisse über eine Förderbrücke Just-in-Sequence<sup>180</sup> (JIS) zum Montageband des Automobilherstellers angeliefert werden. Der Vermieter des Zulieferparks ist der

---

<sup>179</sup> Laut Auskunft des Automobilherstellers konnte durch die Ansiedlung dieser Zulieferunternehmen auf dem Werksgelände das Transportaufkommen um 60 % (entsprechend einer Reduktion der zurückgelegten Transportkilometer um 6,1 Mio. km) gesenkt werden.

<sup>180</sup> Bei diesem Prinzip werden die benötigten Materialien am Bedarfsort genau in der Reihenfolge bereitgestellt, in der die Teile benötigt und eingebaut werden. Zu diesem Zweck wird der Lieferant produktionssynchron an das Montageband des Produzenten angebunden. Die Zulieferteile können somit punktgenau, varianten- und/oder farbsortiert bereitgestellt werden. Ziel ist es, den Warenbestand am Montageband auf nahezu Null zu reduzieren (vgl. [Sommerer 1998, S. 42 ff.]).

Automobilhersteller, der den Lieferanten Hallenfläche und Infrastruktur zur Belieferung der Produktion überlässt. Basis für die Inanspruchnahme von Mietflächen in diesem Zulieferpark ist die Lieferung von Teilen oder Teilegruppen für die auf dem Werksgelände hergestellte Baureihe. Die Mietdauer beläuft sich momentan längstens bis zum Auslauf der Baureihe, ist also an die Produktionsdauer des Endproduktes gebunden. Laut Vertragsentwurf ist es den Lieferanten nicht gestattet, vom Zulieferpark aus Dritte zu beliefern, die im gleichen Geschäftsfeld wie der Automobilhersteller tätig sind.

Der Generalentsorger ist für die Abfallentsorgung der in den Bereichen des Automobilherstellers anfallenden Abfälle verantwortlich<sup>181</sup>. Diese Aufgabe erfüllt er mit einer umfangreichen Fahrzeugflotte von ca. 250 Fahrzeugeinheiten, eigenen Sortier- und Umschlaganlagen und einem immissionsschutzrechtlich genehmigten Sonderabfallzwischenlager in ca. 60 km Entfernung vom Standort des Automobilherstellers.

Zur Vermeidung umständlicher Formulierungen werden die hier dargestellten Unternehmen im weiteren Verlauf dieses Kapitels mit folgenden (verkürzten) Ausdrücken beschrieben:

- Der Ausdruck Automobilhersteller bezieht sich grundsätzlich auf den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Standort, also ein einzelnes Werk, der Gesamtheit der Werke des Automobilherstellers.
- Für die auf dem Werksgelände angesiedelten Lieferanten wird der Begriff Zulieferunternehmen verwendet. Werden außerhalb des Werksgeländes angesiedelte Unternehmen betrachtet, so wird dies ausdrücklich in den jeweiligen Abschnitten erwähnt.
- Der Begriff Generalentsorger dient zur Abgrenzung des hier dargestellten Entsorgungsunternehmens von anderen Entsorgern.

### 5.5.2 Ist-Situation der Entsorgung

Der Generalentsorger des Automobilherstellers übernimmt die Entsorgung sämtlicher bei der Produktion anfallender Abfälle des Automobilherstellers, wobei die Zulieferunternehmen nicht an das Entsorgungskonzept angeschlossen sind<sup>182</sup>. Auf dem Werksgelände des Automobilherstellers wurden zwei Abfallsammelstellen errichtet. Die Abfälle werden am Ort der Entstehung in Behältern gesammelt und nach der vollständigen Befüllung dieser Behälter durch Mitarbeiter des Automobilherstellers zu einer der Sammelstellen transportiert.

Derzeit werden folgende Behälter zur Abfallentsorgung verwendet:

- Gitterbox-Tank (GB-Tank), Volumen 1 m<sup>3</sup>,
- Austauschbehälter für pastöse Sonderabfälle (ASP), Volumen 0,8 m<sup>3</sup>,

---

<sup>181</sup> Ausgenommen hiervon sind Abfälle wie Schrott, die von der Zentrale des Automobilherstellers verkauft werden.

<sup>182</sup> Die Analysen wurden in den Jahren 2001 bis 2003 im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmb+f) geförderten Projekts „ReduParks - Entsorgerparks als Option zur Reduktion zwischenbetrieblicher Transportströme“ durchgeführt. Die Ist-Situation der Entsorgung bezieht sich deshalb auf die im Jahre 2001 zu Beginn des Projektes vorgefundene Situation.

- Austauschbehälter für flüssige Sonderabfälle (ASF), Volumen 0,28 m<sup>3</sup>,
- Austauschbehälter für flüssige Sonderabfälle (ASF), Volumen 0,445 m<sup>3</sup>,
- Abrollmulde (ARM), Volumen 40 m<sup>3</sup>,
- Abrollpresse (ARP), Volumen 23 m<sup>3</sup> und
- Saugwagen, Volumen 20 m<sup>3</sup>.

Stückgütern werden in ASP, ASF oder GB-Tanks transportiert. Der Überbegriff für diese Abfallbehälter lautet International Bulk Container (IBC). Sammelgüter werden in Abrollmulden bzw. Abrollpressen oder im Saugwagen befördert.

Der Generalentsorger unterscheidet fünf Transporttypen hinsichtlich der beförderten Behälter:

- I. Transport einer Abrollmulde/Abrollpresse/Saugwagen,
- II. Transport zweier Abrollmulden/Abrollpressen,
- III. Transport einer Abrollmulde/Abrollpresse und 12 IBC,
- IV. Transport von 12 IBC und
- V. Transport von 24 IBC.

Transporte des Typs I und II werden in der Regel direkt zwischen dem Automobilhersteller und den jeweiligen Behandlungsanlagen durchgeführt. Zum Transport werden Fahrzeuge mit Hakenlift-System, Absetzkipper oder Saugwagen verwendet. Mit diesen Transporten werden meist Abfälle entsorgt, die in großen Mengen anfallen, bzw. ein großes Volumen besitzen (wie die Fraktion Papier/Pappe/Kartonagen). Beim Erreichen einer kritischen Füllmenge der Abrollmulden/Abrollpressen wird der Generalentsorger telefonisch benachrichtigt und ein Termin für die Abholung vereinbart. Im Falle einer Kombination zweier Abrollmulden/Abrollpressen, die unterschiedliche Abfallarten enthalten, werden die entsprechenden Behandlungsanlagen hintereinander angefahren.

Zur Gewährleistung effizienter Entsorgungstransporte entwickelte der Generalentsorger einen speziellen Ladungsträger, auf dem 12 GB-Tanks, ASF und ASP kombiniert werden können. Zwei Anhänger mit diesem Aufbau werden in den Sammelstellen auf dem Werksgelände bereitgestellt und durch Mitarbeiter des Automobilherstellers beladen. Mindestens täglich werden diese Ladungsträger von Mitarbeitern des Generalentsorgers abgeholt, zum Sonderabfallzwischenlager transportiert, und im Austausch werden neue Anhänger bereitgestellt. Bei Transporten des Typs IV und V werden die Behälter direkt zum Sonderabfallzwischenlager transportiert, bei einer Kombination des Typs III werden die entsprechende Behandlungsanlage und das Sonderabfallzwischenlager hintereinander beliefert.

Die Lagerung im Sonderabfallzwischenlager dient in erster Linie der Zusammenfassung der Abfälle mehrerer Abfallerzeuger zu Transportchargen, um eine hohe Auslastung der Transporte zu den teilweise weit entfernten Behandlungsanlagen zu erreichen. Ebenfalls mit dem Ziel einer bestmöglichen Transportauslastung findet im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers neben der Lagerung ein Umschlag der Abfälle in größere Behälter statt. Darüber hinaus besteht im Sonder-

abfallzwischenlager für bestimmte Kunststoffabfälle die Möglichkeit einer Volumenreduktion durch den Einsatz eines Schredders.

Die Abfälle der Zulieferunternehmen werden von unterschiedlichen Unternehmen entsorgt. Einige Zulieferunternehmen haben für bestimmte Abfallfraktionen Verwertungswege erschlossen, bei denen die Abfälle an andere Produktionsunternehmen abgegeben bzw. sogar verkauft werden können. Eine Befragung der Unternehmen ergab, dass viele Aspekte der betrieblichen Entsorgung bisher nicht zur Zufriedenheit aller Unternehmen gelöst werden konnten. V.a. werden eine mangelnde Transparenz sowie die Stellplätze der Abfallbehälter auf Anlieferflächen einiger Unternehmen bemängelt.

### **5.5.3 Zur Entwicklung effizienter Entsorgungslösungen**

Im Folgenden werden ausgewählte Möglichkeiten zur Verbesserung der Entsorgung hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte dargestellt, und es wird deren Bedeutung für die vorliegende Arbeit beschrieben.

Die im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz festgelegte Hierarchie der Abfallvermeidung vor der Abfallverwertung vor der Abfallbeseitigung ist in ihrer Allgemeinheit in Frage zu stellen, da immer das Gesamtsystem mit allen möglichen Entsorgungslösungen zu betrachten und nach ökonomischen und ökologischen Kriterien zu optimieren ist. So kann beispielsweise die Abfallverwertung gegenüber der Abfallvermeidung vorteilhaft sein, wenn durch ein Verwertungsnetzwerk anfallende Produktionsabfälle in anderen Produktionsunternehmen benötigte Rohstoffe substituieren. Allerdings werden hierbei an die Qualität der Abfälle hohe Anforderungen hinsichtlich der Reinheit gestellt. Zusätzlich müssen die Eigenschaften des so gewonnenen Wertstoffes denen des Primärwerkstoffes entsprechen. Diese Anforderungen werden nur in seltenen Fällen direkt erfüllt, weshalb häufig Aufbereitungsverfahren notwendig sind. Um diese Verwertungsoption bewerten zu können, müssen daher die Ressourceneinsparung durch die Wiederverwendung der Rohstoffe, Transportreduktion etc. und der Ressourceneinsatz zur Aufbereitung sorgfältig gegeneinander abgewogen werden. Die Analysen zum Wiedereinsatz von Abfällen in der Produktion sowie die Abwägung der Vorteilhaftigkeit einer Abfallvermeidung gegenüber der Abfallverwertung/-beseitigung erfordern allerdings Detailanalysen der gesamten Wertschöpfungskette, insbesondere der Produktionsprozesse, worauf im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden kann. Vielmehr sollen im Folgenden Möglichkeiten berücksichtigt werden, anfallende Abfälle in einem Entsorgerpark auf dem Werksgelände des Automobilherstellers aufzubereiten. Der Schwerpunkt der Fragestellungen lag hierbei weniger auf bereits bekannten verfahrenstechnischen Fragestellungen, sondern vielmehr auf der Integration dieser Aktivitäten im Rahmen des Entsorgerparks. Hierbei muss beachtet werden, dass die Veränderung der Abfallströme im Entsorgerpark Einfluss auf die weitere Entsorgung besitzt. Die Preise der Behandlungsanlagen für die Verwertung oder Beseitigung hängen von der Qualität der Abfälle ab, wobei die Qualität hier neben der Reinheit auch Aspekte wie Schüttdichte, Ballengewicht, maximale und minimale Kantenlänge der Abfälle umfasst. Durch Schreddern wird das Transportvolumen bestimmter Abfallfraktionen reduziert, und somit werden auch die

Transportausgaben gesenkt. Allerdings können aufgrund der durch den Schredder herbeigeführten Veränderung der Abfälle (z.B. Kantenlänge) die Ausgaben für die weitere Abfallbehandlung steigen, sodass evtl. zusätzlich entstehende Ausgaben für die Entsorgung dieser Abfallfraktionen berücksichtigt werden müssen. Ebenso kann durch Pressen der Abfälle zu Ballen die Anzahl der Transporte reduziert werden, indem die Transportmenge erhöht wird. Entsprechen Ballengewicht und –größe hierbei jedoch nicht den Vorgaben der Behandlungsanlagen entstehen zusätzliche Ausgaben für das Aufschneiden und Auflockern sowie das erneute Pressen der Abfälle.

Neben den Verfahren zur Volumenreduktion wird in dieser Arbeit untersucht, inwieweit durch eine Abfalllagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers die Gesamtausgaben reduziert werden können. Einerseits können durch das Lager auf dem Werksgelände die Entsorgungstransporte und somit die Transportausgaben verringert werden, andererseits resultieren Investitionen sowie fixe und variable Ausgaben für die Lagerung auf dem Werksgelände. Des Weiteren werden die Auswirkungen veränderter Transportrouten auf die Entsorgungskosten und Transportkilometer analysiert.

#### **5.5.4 Entsorgerpark-Konzept für das Werksgelände des Automobilherstellers**

Auf Basis der Ist-Analyse der vorherrschenden Stoffströme wurden 11 der 70 (entsprechend ca. 30 % der Gesamtabfallmenge) beim Automobilhersteller anfallenden Abfallarten für eine detaillierte Analyse des Entsorgerpark-Konzeptes ausgewählt. Auswahlkriterien waren u.a. Abfallmenge pro Jahr, Abfallbehältertyp, Schüttdichte (bzw. Anzahl der Abfallbehälter pro Jahr), Aggregatzustand und Entfernung der Behandlungsanlagen. Im Folgenden werden die ausgewählten Abfallarten, deren Entsorgung sowie alternative Entsorgungspfade kurz dargestellt. Eine Übersicht der Abfallarten, Entsorgungswege und alternativer Entsorgungspfade enthält Tabelle 33.

**Tabelle 33:** Übersicht der in den Analysen berücksichtigten Abfallarten

<b>Abfallart (AVV-Nummer)</b>	<b>Ist-Situation der Entsorgung</b>	<b>Alternative Entsorgungspfade</b>
Reinigungslösung (07 06 01)	Sammelgut, Direkttransport zur Behandlungsanlage	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stück- oder Sammelgut
Altlacke / Altfarben fest bis pastös (08 01 11)	Stückgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage als Sammelgut	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stück- oder Sammelgut
Leim- und Klebmittel nicht ausgehärtet (08 04 09)	Stückgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage als Sammelgut	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stück- oder Sammelgut
Metallhydroxid-schlämme (11 01 09)	Kammerfilterpresse auf dem Werksgelände, Stückgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage als Sammelgut	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stück- oder Sammelgut
Lösemittelgemisch (14 06 03)	Stückgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage als Sammelgut im Saugwagen	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stückgut oder als Sammelgut im Saugwagen
Papier/Pappe/ Kartonagen (15 01 01)	Sammelgut, Transport zu Behandlungsanlage, dort Fraktionierung und Sortierung, Weitertransport zu verschiedenen Papierfabriken	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Pressen auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Transport zu Behandlungsanlage, dort Fraktionierung und Sortierung, Weitertransport zu verschiedenen Papierfabriken
gemischte Abfälle zur Verwertung (15 01 09)	Sammelgut, Direkttransport zur Behandlungsanlage	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Pressen auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransport zur Behandlungsanlage
Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten (15 01 10)	Stückgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Zerkleinerung und Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage als Sammelgut	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stück- oder Sammelgut

<b>Abfallart (AVV-Nummer)</b>	<b>Ist-Situation der Entsorgung</b>	<b>Alternative Entsorgungspfade</b>
Kunststoffbehältnisse mit schädlichen Restinhalten (15 01 10)	Stückgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Zerkleinerung und Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage als Sammelgut	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stück- oder Sammelgut
ölverschmutzte Betriebsmittel (15 02 02)	Stückgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage als Sammelgut	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Direkttransporte zur Behandlungsanlage als Stück- oder Sammelgut
Kunststoffformabfälle ohne Folien (16 01 19)	Sammelgut, Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, Lagerung, Weitertransport zur Behandlungsanlage in Sattelzügen	Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers, Schreddern auf dem Werksgelände und anschließendes Recycling, Direkttransport zur thermischen Verwertung; Schreddern in Behandlungsanlagen und anschließendes Recycling

#### **5.5.4.1 Analyisierte Abfallfraktionen**

Die hier dargestellte Klassifizierung der analysierten Abfälle basiert auf der Abfallverzeichnisverordnung. Ein Auszug des Verzeichnisses, aus dem die Zugehörigkeit der im Rahmen des Projektes betrachteten Abfallarten ersichtlich wird, kann Tabelle 34 entnommen werden.

##### **5.5.4.1.1 Reinigungslösungen (AVV 070601)**

Beim Automobilhersteller anfallende Reinigungslösungen bestehen in erster Linie aus Wasser, das durch Reinigungsmittel und Schmutzpartikel verunreinigt ist. Laut [AVV 2001] zählen sie zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen.

Bis Mitte 2001 wurden die Reinigungslösungen als Stückgut in GB-Tanks gesammelt und transportiert. Seit August 2001 werden die Reinigungslösungen in Saugwagen entsorgt, wodurch ca. die 1,75fache Menge pro Transport befördert werden kann. Die Reinigungslösungen werden vom Werksgelände des Automobilherstellers direkt zur 6 km entfernten Sonderabfallbehandlungsanlage transportiert, wo sie einer chemisch-physikalischen Behandlung unterzogen werden.

Für die anfallenden Reinigungslösungen wurde eine Lagerung auf dem Werksgelände analysiert, um den Transport eines Saugwagens mit Anhänger zu ermöglichen. Zusätzlich wurde die Möglichkeit des Transportes in GB-Tanks im Modell integriert, um die Vorteilhaftigkeit der Umstellung auf Transporte in Saugwagen nachvollziehen zu können.

**Tabelle 34:** Auszug der Abfallverzeichnisverordnung

<b>Kapitel</b>	<b>07</b>	<b>Abfälle aus organisch-chemischen Prozessen</b>
Gruppe	07 06	Abfälle aus Herstellung, Zubereitung, Vertrieb und Anwendung von Fetten, Schmierstoffen, Seifen, Waschmitteln, Desinfektionsmitteln und Körperpflegemitteln
	07 06 01	wässrige Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen
<b>Kapitel</b>	<b>08</b>	<b>Abfälle aus Herstellung, Zubereitung, Vertrieb und Anwendung von Beschichtungen (Farben, Lacke, Email), Klebstoffen, Dichtmassen und Druckfarben</b>
Gruppe	08 01	Abfälle aus Herstellung, Zubereitung, Vertrieb, Anwendung und Entfernung von Farben und Lacken
	08 01 11	Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten
Gruppe	08 04	Abfälle aus Herstellung, Zubereitung, Vertrieb und Anwendung von Klebstoffen und Dichtmassen (einschließlich wasserabweisender Materialien)
	08 04 09	Klebstoff- und Dichtmassenabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten
<b>Kapitel</b>	<b>11</b>	<b>Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung und Beschichtung von Metallen und anderen Werkstoffen; Nichteisen-Hydrometallurgie</b>
Gruppe	11 01	Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung und Beschichtung von Metallen und anderen Werkstoffen (z.B. Galvanik, Verzinkung, Beizen, Ätzen, Phosphatieren, alkalisches Entfetten und Anodisierung)
	11 01 09	Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten
<b>Kapitel</b>	<b>14</b>	<b>Abfälle aus organischen Lösemitteln, Kühlmitteln und Treibgasen (außer 07 und 08)</b>
Gruppe	14 06	Abfälle aus organischen Lösemitteln, Kühlmitteln sowie Schaum- und Aerosoltreibgasen
	14 06 03	andere Lösemittel und Lösemittelgemische
<b>Kapitel</b>	<b>15</b>	<b>Verpackungsabfall, Aufsaugmassen, Wischtücher, Filtermaterialien und Schutzkleidung (a. n. g.)</b>
Gruppe	15 01	Verpackungen (einschließlich getrennt gesammelter kommunaler Verpackungsabfälle)
	15 01 01	Verpackungen aus Papier und Pappe
	15 01 09	gemischte Materialien
	15 01 10	Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind
Gruppe	15 02	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung
	15 02 02	Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich Ölfilter a. n. g.), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind
<b>Kapitel</b>	<b>16</b>	<b>Abfälle, die nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt sind</b>
Gruppe	16 01	Altfahrzeuge verschiedener Verkehrsträger (einschließlich mobiler Maschinen) und Abfälle aus der Demontage von Altfahrzeugen sowie der Fahrzeugwartung (außer 13, 14, 16 06 und 16 08)
	16 01 19	Kunststoffe

Erste Analysen ergaben, dass der Transport der Reinigungslösung in Saugwagen aus ökonomischer und ökologischer Sicht vorteilhaft gegenüber der Behandlung als Stückgut ist. Da die Entsorgung der Reinigungslösung im Saugwagen nicht mit der Entsorgung anderer Abfallarten kombiniert werden kann und keine Lagerung im Entsorgerpark, sondern am Ort des Anfalls der Reinigungslösung vorgesehen ist, wurde diese Abfallfraktion im weiteren Verlauf der Analysen nicht näher untersucht.

#### *5.5.4.1.2 Altlacke und Altfarben pastöser bis fester Konsistenz (AVV 080111)*

Altlacke und Altfarben gehören zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Im Rahmen der bisherigen Entsorgungslösung werden Altlacke und Altfarben beim Automobilhersteller in ASP zur Abholung bereitgestellt. Anschließend werden sie vom Generalentsorger zum Sonderabfallzwischenlager transportiert, wo sie bis zum Weitertransport als Sammelgut gelagert werden. Im Vergleich zum Stückguttransport kann dadurch die 3fache Menge pro Entsorgungstransport befördert werden. Während eines weiteren Zwischenstopps werden die Altlacke und Altfarben geschreddert und zur AVV-Nummer 190204<sup>183</sup> aufgemischt und anschließend in verschiedenen Sonderabfallverbrennungsanlagen innerhalb Deutschlands verwertet. Die gemittelte Entfernung zwischen dem Standort des Sonderabfallzwischenlagers des Generalentsorgers und den Sonderabfallverbrennungsanlagen beträgt 350 km.

Im Rahmen eines Entsorgerparks werden für diese Abfallfraktion die Lagerung auf dem Werksgelände in IBC oder ARM<sup>184</sup> analysiert sowie die Potenziale eines Direkttransports vom Automobilhersteller zur Behandlungsanlage untersucht. Aus technologischer Sicht wären darüber hinaus sowohl der Einsatz einer Destillationsanlage zur Verdampfung der Lösemittelanteile, eine mechanische Entfrachtung oder eine Entfrachtung mittels Kryogenverfahren und anschließender Verhüttung der Metallanteile zur Behandlung der Altlacke und Altfarben einsetzbar. Aufgrund hoher Investitionen und Betriebskosten werden diese Verfahren bisher jedoch lediglich selten und nur im Großmaßstab angewendet, weshalb sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

#### *5.5.4.1.3 Nicht ausgehärtete Leim- und Klebemittel (AVV 080409)*

Die beim Automobilhersteller anfallenden Tücher, Lappen und Fässer, die durch Leim- und Klebemittel verunreinigt wurden, zählen zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Den Hauptbestandteil bilden hierbei verunreinigte Fässer, in denen die Leim- und Klebemittel geliefert werden.

Die Leim- und Klebemittelabfälle werden auf dem Werksgelände in ASP bereitgestellt. Im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers werden die Leim- und

---

<sup>183</sup> Kap. 19: Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasseranlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke, Gruppe 02: Abfälle aus der physikalisch-chemischen Behandlung von Abfällen, Abfallart 04: vorgemischte Abfälle, die wenigstens einen gefährlichen Abfall enthalten (besonders überwachungsbedürftig). (Vgl. [AVV 2001])

<sup>184</sup> Im Folgenden wird grundsätzlich die Abkürzung ARM zur Bezeichnung der Abrollmulden und Abrollpressen verwendet.

Klebstoffe umgeschlagen (ca. 3,5fache Menge pro Transport<sup>185</sup>) und als Sammelgut zu einer ca. 630 km entfernten Abfallverwertungsgesellschaft weitertransportiert, wo sie einer Verbrennung zugeführt werden.

Die Menge dieser Abfallfraktion kann durch eine Umstellung der Zulieferung reduziert werden. Anstatt verunreinigte Fässer zu entsorgen, können diese vom Zulieferer zurückgenommen und erneut befüllt werden. Im Verlauf der vorliegenden Arbeit werden für diese Fraktion die Lagerung auf dem Werksgelände und der direkte Transport als Sammelgut vom Werksgelände des Automobilherstellers zur Behandlungsanlage untersucht.

#### *5.5.4.1.4 Metallhydroxidschlämme (AVV 110109)*

Metallhydroxidschlämme entstehen im Werk des Automobilherstellers bei der Abwasserbehandlung durch die Fällung von Metallinhaltsstoffen; diese sind als besonders überwachungsbedürftige Abfälle eingestuft. Zur Reduktion des Transportvolumens werden die Metallhydroxidschlämme auf dem Werksgelände des Automobilherstellers in einer Kammerfilterpresse behandelt und anschließend in ASP zur Abholung durch Mitarbeiter des Automobilherstellers bereitgestellt. Diese ASP werden zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers transportiert, wo sie gelagert und umgeschlagen werden (ca. 3fache Menge pro Transport). In der ca. 360 km entfernten Behandlungsanlage werden die Metallhydroxidschlämme mit Koksruß gesintert und anschließend verhüttet.

Bisher sind im Vergleich zur Entwässerung in einer Kammerfilterpresse keine wirtschaftlicheren Verfahren bekannt, die auf dem Werksgelände des Abfallerzeugers durchgeführt werden könnten. Dementsprechend wird für Metallhydroxidschlämme analog zu den vorher beschriebenen Abfallarten die Lagerung auf dem Werksgelände des Automobilherstellers und der Direkttransport als Sammelgut untersucht.

#### *5.5.4.1.5 Lösemittelgemische (AVV 140603)*

Beim Automobilhersteller anfallende Ethylmethylketone und Isopropanol werden unter dem Begriff Lösemittelgemisch zusammengefasst und zählen laut [AVV 2001] zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Diese Fraktion wird bis zum Transport zum Generalentsorger in ASF gesammelt. Im Sonderabfallzwischenlager wird das Lösemittelgemisch gelagert, bis es in Saugwagen (ca. 6fache Menge pro Transport) zur ca. 65 km entfernten Behandlungsanlage transportiert wird. In dieser Anlage werden die Lösemittelgemische fraktioniert und erneut gelagert, bis die einzelnen Fraktionen zur Verwertung zu verschiedenen Kraftwerken und Zementwerken in Deutschland befördert werden. Die Entfernung von der Behandlungsanlage zur Verwertung beträgt durchschnittlich ca. 350 km.

Eine Volumenreduktion dieser Abfallfraktion könnte durch eine Destillation der Lösemittelanteile auf dem Werksgelände erreicht werden. Da bei der Produktion des Automobilherstellers lediglich geringe Mengen an Lösemittelgemisch anfallen, wurde

---

<sup>185</sup> Der hier sowie in den folgenden Unterkapiteln angegebene Faktor bezieht sich jeweils auf einen Vergleich des Transports als Sammelgut mit einer Beförderung als Stückgut.

dieses Verfahren aufgrund der hierfür notwendigen Investitionen und des Energieaufwandes einer Destillation als nicht wirtschaftlich eingestuft und nicht näher betrachtet. Daher wurden für diese Abfallfraktion lediglich eine Lagerung auf dem Werksgelände in IBC oder ARM und Direkttransporte vom Automobilhersteller zur Behandlungsanlage vorgesehen.

#### *5.5.4.1.6 Papier/Pappe/Kartonagen (AVV 150101)*

Verpackungsabfälle wie Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) sind nicht überwachungsbedürftig und fallen sowohl in den Produktionshallen als auch in den Verwaltungsgebäuden an. Dementsprechend fällt diese Abfallfraktion nicht nur beim Automobilhersteller sondern auch bei den Zulieferunternehmen an, wobei der Anteil der Abfallfraktion Papier/Pappe/Kartonagen aus den Zulieferunternehmen ca. 20 % des Gesamtanfalls beträgt. Eine Vermeidung dieser Abfallfraktion kann in erster Linie durch eine Umstellung der Zulieferverpackungen erreicht werden.

Die Abfallfraktion Papier/Pappe/Kartonagen des Automobilherstellers wird in den Abfallsammelstellen auf dem Werksgelände in ARP gesammelt. In einer ca. 35 km entfernten Behandlungsanlage wird diese Abfallfraktion in unterschiedliche Papierklassen fraktioniert, die Verwertung findet in Papierfabriken in Deutschland und im übrigen Europa statt. Die Wahl der Papierfabrik ist abhängig von den Preisen bzw. Erlösen, die erheblichen Schwankungen unterliegen. Die durchschnittliche Entfernung zwischen Behandlungsanlage und Papierfabrik beträgt ca. 300 km.

Die Zulieferunternehmen sammeln die Abfallfraktion Papier/Pappe/Kartonagen in Abrollmulden im Zulieferpark. Bisher werden die in den Zulieferunternehmen anfallenden Papier/Pappe/Kartonagen nicht vom Generalentsorger sondern von unterschiedlichen Entsorgungsunternehmen verwertet, sodass keine Daten zur Ist-Situation ermittelt werden konnten. Statt dessen wurde deshalb angenommen, dass die Zulieferunternehmen und der Automobilhersteller denselben Entsorgungspfad nutzen.

Eine Volumenreduktion der Abfallfraktion Papier/Pappe/Kartonagen kann mittels einer Ballenpresse auf dem Werksgelände erreicht werden, wobei die bereits beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der Ballengröße und des Ballengewichts gelten. In dieser Arbeit wird eine Ballenpresse mit Ballenlager untersucht, die das spezifische Transportgewicht um den Faktor 2,3 erhöht. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich bei dieser Ballenpresse um eine nach BImSchG genehmigungsbedürftige Anlage handelt.

#### *5.5.4.1.7 Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten (AVV 150110)*

Unter dem Begriff Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten werden Eisenbehältnisse wie Kanister, Spraydosen und Fässer mit schädlichen Verunreinigungen zusammengefasst. Aufgrund dieser Verunreinigungen zählt diese Fraktion zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen.

Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten werden beim Automobilhersteller in ASP bereitgestellt. Im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers wird die Schüttdichte durch Schreddern erhöht, und die Abfälle werden bis zum

Weitertransport als Sammelgut gelagert. Hierdurch kann pro Transport etwa die 7fache Menge befördert werden. In einer vom Sonderabfallzwischenlager ca. 55 km entfernten Behandlungsanlage werden die zerkleinerten Metallbehältnisse fraktioniert und bis zum Transport zur Verwertungsanlage in ca. 490 km Entfernung gelagert.

Der Einsatz eines Schredders auf dem Werksgelände des Automobilherstellers für diese Abfallfraktion erfordert eine spezielle Genehmigung aufgrund der enthaltenen Spraydosen. Da die anfallende Menge dieser Fraktion jedoch gering ist, konnte anhand einer Abschätzung die Unwirtschaftlichkeit dieser Option ermittelt werden, weshalb auf eine modellgestützte Analyse eines speziellen Schredders für diese Fraktion verzichtet wurde. Insbesondere für Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten erscheinen eine Lagerung auf dem Werksgelände und Direkttransporte zur Behandlungsanlage viel versprechend, da die Distanz vom Automobilhersteller zur Behandlungsanlage lediglich 6 km beträgt (gegenüber 115 km bei einer Zwischenlagerung und Behandlung beim Generalentsorger).

#### *5.5.4.1.8 Kunststoffbehältnisse mit schädlichen Restinhalten (AVV 150110)*

Aufgrund der schädlichen Verunreinigungen der Kunststoffbehältnisse gehört auch diese Abfallfraktion zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen.

Die verunreinigten Kunststoffbehältnisse werden auf dem Werksgelände des Automobilherstellers ebenfalls in ASP bereitgestellt. Durch Schreddern und Lagern der Abfallfraktion im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers kann die 8fache Menge pro Transport zur 350 km entfernten Behandlungsanlage befördert werden, in der die Kunststoffbehältnisse thermisch verwertet werden.

Auch für diese Abfallfraktion kann der Einsatz eines Schredders auf dem Werksgelände des Automobilherstellers aufgrund der geringen Mengen ausgeschlossen werden. Die Analysen in dieser Arbeit beschränken sich daher auf eine Lagerung der Abfallfraktion auf dem Werksgelände und der Berücksichtigung von Direkttransporten als Stück- oder Sammelgut.

#### *5.5.4.1.9 Ölverschmutzte Betriebsmittel (AVV 150202)*

Zu ölverschmutzten Betriebsmitteln zählen u.a. Lappen, Kehricht, Bürsten, etc., die mit Öl verunreinigt wurden. Aufgrund des Ölanteils wird diese Abfallfraktion als besonders überwachungsbedürftig eingestuft.

Ölverschmutzte Betriebsmittel werden auf dem Werksgelände des Automobilherstellers in ASP gesammelt. Im Sonderabfallzwischenlager werden die Abfälle in ARM umgeschlagen und bis zum Weitertransport gelagert. Hierdurch kann auf dem Weitertransport zur 350 km entfernten Behandlungsanlage die ca. 3fache Menge pro Transport befördert werden.

Die Heterogenität dieser Abfallfraktion schließt eine Volumenreduktion der Abfälle auf dem Werksgelände aus. Im Rahmen dieser Arbeit werden eine Lagerung in IBC oder ARM und der Direkttransport vom Werksgelände zur Behandlungsanlage analysiert.

#### 5.5.4.1.10 *Kunststoffformabfälle (AVV 160119)*

Die Abfallfraktion Kunststoffformabfälle besteht aus Karosserie- und Interieurteilen aus verschiedenen Kunststoffen und gehört zu den nicht überwachungsbedürftigen Abfällen. Kunststoffformabfälle entstehen sowohl beim Automobilhersteller (ca. 20 %) als auch bei den Zulieferunternehmen (ca. 80 %).

Die Kunststoffformabfälle des Automobilherstellers werden in ARM zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers befördert, wo sie umgeschlagen und gelagert werden. Zur thermischen Verwertung in ca. 350 km Entfernung wird diese Abfallfraktion in Plansatteln transportiert, wobei ca. die 4fache Abfallmenge pro Transport befördert werden kann. Die Kunststoffformabfälle der Zulieferunternehmen werden ebenfalls in einer ca. 350 km entfernten Behandlungsanlage thermisch verwertet.

Da für geschredderte Kunststoffformabfälle die Möglichkeit des Recycling besteht, wurden folgende Optionen untersucht:

- Schreddern in Behandlungsanlage 1: Kunststoffformabfälle werden vom Werksgelände des Automobilherstellers zur 55 km entfernten Behandlungsanlage 1 in ARM transportiert. Durch Schreddern wird die Schüttdichte der Kunststoffformabfälle verdoppelt, wodurch auf dem Transport zur 320 km entfernten Recyclinganlage die doppelte Menge befördert werden kann.
- Schreddern in Behandlungsanlage 2: In diesem Fall wird analog zu Behandlungsanlage 1 verfahren, lediglich die Entfernungen sowie die Behandlungspreise differieren: Die Entfernung zwischen dem Automobilhersteller und Behandlungsanlage 2 beträgt ca. 145 km, zwischen Behandlungsanlage 2 und Recyclinganlage ca. 220 km.
- Schreddern auf dem Werksgelände: Der Einsatz eines Schredders auf dem Werksgelände ermöglicht im Vergleich zur Ist-Situation den Direkttransport der doppelten Menge pro Transport zur Recyclinganlage. Darüber hinaus sinken die zurückgelegten Transportkilometer, da die Entfernung zwischen dem Automobilhersteller und der Recyclinganlage 335 km beträgt (Entsorgungspfad Ist-Situation: 410 km, Entsorgungspfad über Behandlungsanlage 1: 375 km, Entsorgungspfad über Behandlungsanlage 2: 365 km).
- Darüber hinaus wird, um eine bestmögliche Auslastung der Transporte gewährleisten zu können, die Lagerung der Kunststoffformabfälle auf dem Werksgelände in das Entsorgerpark-Konzept integriert.

#### 5.5.4.1.11 *Gemischte Abfälle zur Verwertung (AVV 150109)*

Gemischte Abfälle zur Verwertung (AZV) zählen zu den nicht überwachungsbedürftigen Abfällen und fallen sowohl beim Automobilhersteller (ca. 20 %) als auch bei den Zulieferunternehmen (ca. 80 %) an. Gemischte Abfälle zur Verwertung des Automobilherstellers werden als Sammelgut direkt vom Werksgelände des Automobilherstellers zu einer ca. 50 km entfernten Behandlungsanlage transportiert. Im Anschluss an die dort durchgeführte Sortierung werden die einzelnen Fraktionen einer stofflichen Verwertung zugeführt.

Da die in den Zulieferunternehmen anfallenden gemischten Abfälle zur Verwertung bisher nicht vom Generalentsorger sondern von unterschiedlichen Entsorgungsunternehmen verwertet werden, konnten keine Daten zur Ist-Situation der Entsorgung dieser Abfallfraktion ermittelt werden. Deshalb wurde angenommen, dass für die Entsorgung der gemischte Abfälle zur Verwertung der Zulieferunternehmen der Entsorgungspfad des Automobilherstellers genutzt wird.

Durch eine genehmigungspflichtige Ballenpresse auf dem Werksgelände des Automobilherstellers für die Abfallfraktion Papier/Pappe/Kartonagen kann auch eine Volumenreduktion der Abfallfraktion „gemischte Abfälle zur Verwertung“ erzielt werden. Aufgrund deren Heterogenität ist durch die gewählte Ballenpresse allerdings lediglich eine Volumenreduktion um ca. 30 % möglich.

#### **5.5.4.2 Komponenten des Entsorgerparks auf dem Werksgelände des Automobilherstellers**

Tabelle 35 enthält die Transformationen, die im Entsorgerpark auf dem Werksgelände des Automobilherstellers für die jeweiligen Abfallarten durchgeführt werden können. Die dargestellten Dienstleistungen stellen lediglich eine Auswahl der berücksichtigten Verfahren dar. Wie bereits im Kapitel 5.5.4.1 bei der Beschreibung einiger Abfallarten angedeutet wurde, konnten viele der aus technischen bzw. technologischen und transportmindernden Aspekten interessanten Verfahren ausgeschlossen werden, da in Einzelanalysen die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren ausgeschlossen werden konnte. Die berücksichtigten Komponenten wurden in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Unternehmen ausgewählt, um die Umsetzung des Konzeptes in die Praxis zu erleichtern.

**Tabelle 35:** Dienstleistungen im Entsorgerpark in Abhängigkeit der Abfallarten

<b>Abfallart</b>	<b>Lagerung in IBC</b>	<b>Lagerung in ARM</b>	<b>Schreddern</b>	<b>Pressen</b>
Reinigungslösung	X	X		
Altlacke / Altfarben (fest bis pastös)	X	X		
Leim- und Klebemittel	X	X		
Metallhydroxidschlämme	X	X		
Lösemittelgemisch	X	X		
Papier/Pappe/ Kartonagen		X		X
Metallbehältnisse m. schäd. Restinhalten	X	X		
Kunststoffbehältnisse m. schäd. Restinhalten	X	X		
ölverschmutzte Betriebsmittel	X	X		
Kunststoffformabfälle ohne Folien		X	X	
gemischte Abfälle zur Verwertung		X		X

An die Lagerung von (besonders) überwachungsbedürftigen Abfällen werden seitens des Gesetzgebers bestimmte Anforderungen gestellt. Für die Lagerung der Abfälle in

IBC muss deshalb in eine spezielle Einhausung der Container investiert werden, die in der Standardausführung 12 Stellplätze für IBC vorsieht. Zusätzlich werden Personal und ein Gabelstapler benötigt, damit die Lkws mit IBC aus dem Lager beladen werden können. Soll ein Umschlag von Abfällen auf dem Werksgelände stattfinden, fallen Investitionen für größere Transportbehälter an. Zum Betrieb von Ballenpresse oder Schredder werden zusätzlich Anschüttboxen und ein Radlader benötigt sowie Personal zum Bedienen der Anlagen. Die Abfälle werden in so genannten Anschüttboxen zwischengelagert und vom Radlader zu Presse oder Schredder befördert. Nach dem Schreddern werden die Abfälle in ARM aufbewahrt. Um gepresste Ballen bis zum Abtransport lagern zu können, wird zusätzliche Lagerfläche benötigt. Darüber hinaus müssen ausreichende Rangierflächen für Gabelstapler und Lkw bei der Planung eines Entsorgerparks berücksichtigt werden.

Tabelle 36 enthält eine Übersicht der Investitionen, jährlichen Fixkosten und Lebensdauern der Komponenten.

**Tabelle 36:** Investitionen, jährliche Fixkosten und Lebensdauer der Komponenten

Komponente	Investition	jährliche Fixkosten für Instandhaltung und Wartung	Technische Lebensdauer
Schredder	185.000 €	18.500 €/a	5 Jahre
Presse	120.000 €	6.000 €/a	8 Jahre
Ballenlager	Investitionen und Fixkosten für zusätzliche Fläche		
Anschüttboxen	10.000 €		5 Jahre
Gabelstapler	55.000 €	1.650 €/a	5 Jahre
Radlader	80.000 €	4.000 €/a	8 Jahre
Lager für 12 IBC	15.000 €	150 €/a	10 Jahre
Lager für 3 ARM	9.050 €	300 €/a	5 Jahre
Personal		50.000 €/a	
Gebäude	Investitionen und Fixkosten für neue Gebäude		

### 5.5.5 Modelltechnische Umsetzung

Die Basis der Analyse bilden die Abfalldaten des Automobilherstellers und der Zulieferunternehmen des Jahres 2001. Um die Modellgröße zu reduzieren, wurde aus diesen Jahreswerten ein typischer Monat mit zwanzig charakteristischen (Arbeits-)Tagen gebildet.

Die Systemgrenzen entsprechen auf der Inputseite den in den Abfallsammelstellen angelieferten Abfallmengen des Automobilherstellers bzw. den von den entsprechenden Entsorgungsunternehmen abgeholt Abfallmengen der Zulieferunternehmen. Die durchgeführten Entsorgungsaktivitäten und die damit verbundenen Investitionen und Ausgaben werden bis zur Übernahme durch ein nachgeschaltetes Entsorgungsunternehmen, das nicht zum Generalentsorger gehört, abgebildet und

optimiert. Da keine Daten zur Kostenstruktur der nachgeschalteten Entsorger ermittelt werden konnten, wurden die von diesen Unternehmen in Rechnung gestellten Beträge als Konstanten in das Modell integriert. Dies ist zwingend erforderlich, um die Vergleichbarkeit der Abfallarten untereinander zu gewährleisten. Der Generalentsorger kann für bestimmte Abfallarten die vollständige Entsorgung durchführen, während andere Abfallarten lediglich gelagert oder aufbereitet werden und durch einen nachgeschalteten Entsorger beseitigt oder verwertet werden. Indem die in Rechnung gestellten Beträge der nachgeschalteten Entsorger berücksichtigt werden, ist gewährleistet, dass für alle Abfallarten sämtliche entscheidungsrelevanten Ausgaben in die Untersuchung eingehen. Darüber hinaus besitzt der Grad der Vorbehandlung einen Einfluss auf die Preise der weiteren Entsorgung, was ebenfalls eine Berücksichtigung dieser Ausgaben erfordert, um die Auswirkungen von auf dem Werksgelände durchgeführten Entsorgungsdienstleistungen möglichst vollständig zu erfassen.

Die Komponenten Anschüttboxen und Radlader werden sowohl für eine Presse als auch für einen Schredder benötigt. Demnach können die hierfür notwendigen Investitionen und Fixkosten nicht zu denen der Presse oder des Schredders addiert werden, da bei einem Zubau beider Komponenten diese Ausgaben doppelt berücksichtigt würden. Gleiches gilt bezüglich der Ausgaben für die benötigte Rangierfläche, die von der Zusammenstellung der Komponenten abhängt. Aus diesen Gründen wurde von der Modellierung der Einzelkomponenten als Zubauoptionen abgesehen, und es wurden vier Varianten eines Entsorgerparks mit festgesetzten Komponenten modelliert. Die Bestandteile der einzelnen Varianten können Tabelle 37 entnommen werden.

**Tabelle 37:** Komponenten der unterschiedlichen Entsorgerpark-Varianten

<b>Komponente</b>									
<b>Variante</b>	<b>Schredder</b>	<b>Presse</b>	<b>Ballenlager</b>	<b>Anschüttboxen</b>	<b>Gabelstapler</b>	<b>Radlader</b>	<b>Lager für IBC</b>	<b>Lager für ARM</b>	<b>Personal</b>
<b>kein Entsorgerpark</b>									
<b>Entsorgerpark 1</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Entsorgerpark 2</b>		X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Entsorgerpark 3</b>	X			X	X	X	X	X	X
<b>Entsorgerpark 4</b>					X		X	X	X

Zur Ermittlung der Gesamtinvestition einer Variante des Entsorgerparks musste eine Lebensdauer der Varianten festgelegt werden. Da vier der Komponenten eine Lebensdauer von 5 Jahren besitzen und dies der durchschnittlichen Fertigungsdauer einer Baureihe entspricht, wurden fünf Jahre als Lebensdauer der Entsorgerpark-Varianten festgesetzt. Da die Komponenten jedoch eine unterschiedliche Lebensdauer besitzen (5, 8 und 10 Jahre) wurde zur Ermittlung der

Gesamtinvestition der Entsorgerpark-Varianten für jede einzelne Komponente die Annuität entsprechend der technischen Lebensdauer berechnet. Die Annuitäten nach der angenommenen Lebensdauer von 5 Jahren wurden abgeschnitten und die Annuitäten der ersten 5 Jahre entsprechend rückdiskontiert. Die somit errechneten Barwerte der einzelnen Komponenten wurden zur Gesamtinvestition addiert. Für diese Berechnungen sowie für die modellgestützten Analysen wurde ein Zinssatz von 10 % angesetzt (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 4.5.7).

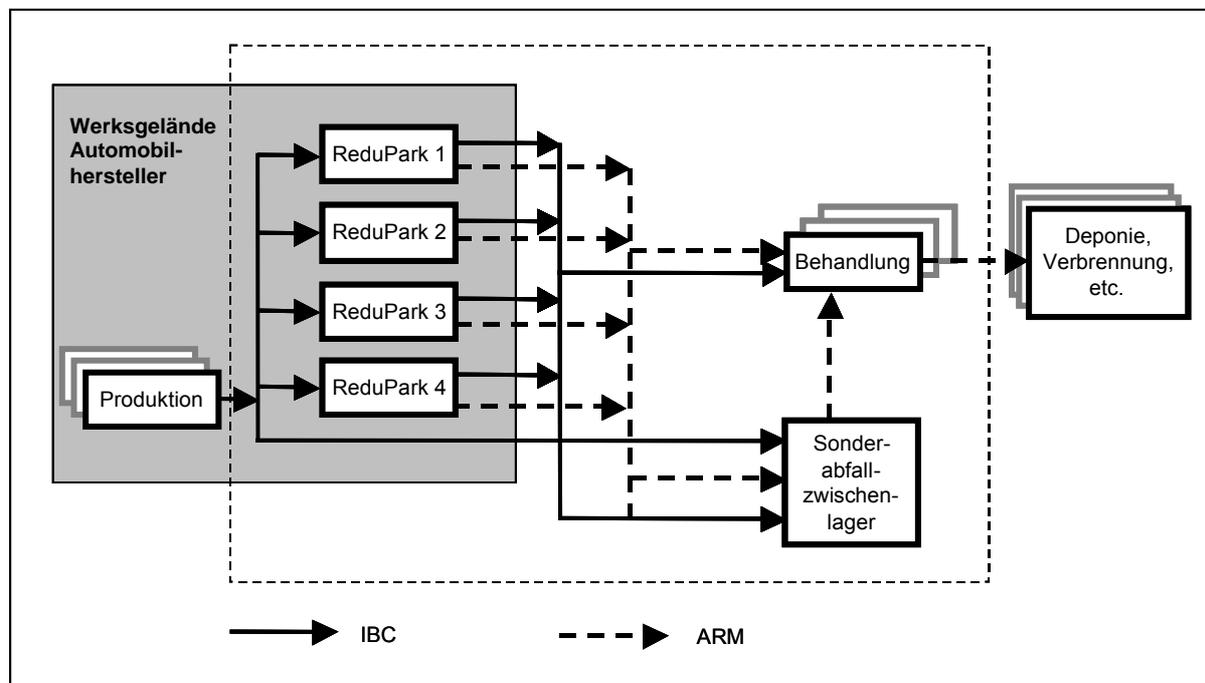
Für den Zubau der Lager wurden jeweils Kapazitätseinheiten definiert, deren ganzzahliges Vielfaches zugebaut werden kann. Die Kapazitätseinheit für ein IBC-Lager beträgt 12 Stellplätze, da dies der Anzahl der Stellplätze in der Standardausführung der Hersteller entspricht. Hinsichtlich des Lagers für ARM wurde die Kapazitätseinheit von 3 Stellplätzen festgelegt. Die Motivation für die Festlegung solcher Kapazitätseinheiten entstand zum einen aus der Standardgröße für IBC-Lager und zum anderen aus dem Anspruch, robuste Lösungen zu erhalten, da insbesondere die Lagerkapazität durch Schwankungen der angefallenen Abfallmenge beeinflusst wird.

Am Beispiel eines beliebigen Stückgutes können anhand von Abbildung 24 die möglichen Flüsse im Modell nachvollzogen werden. Flüsse der Einheit IBC pro Abfallart und Tag sind als durchgezogene Pfeile abgebildet, Flüsse der Einheit ARM pro Abfallart und Tag sind gestrichelt dargestellt. Im Rahmen der Ist-Situation der Entsorgung werden Stückgüter vom Werksgelände des Automobilherstellers in IBC zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers transportiert. Dort werden die Stückgüter in größere Transportbehälter wie ARM umgeschlagen und anschließend zur Behandlungsanlage transportiert, von wo aus sie nach der Behandlung in ARM zur Beseitigung oder Verwertung verbracht werden. Zusätzlich zur Ist-Situation wurde die Möglichkeit integriert, die Abfälle in IBC direkt vom Werksgelände des Automobilherstellers zur Behandlungsanlage zu transportieren. Die Stückgüter können zudem auf dem Werksgelände in ARM umgeschlagen werden und anschließend zum Sonderabfallzwischenlager oder direkt zur Behandlungsanlage transportiert werden.

In der Realität werden im Sonderabfallzwischenlager neben den Abfällen des hier betrachteten Automobilherstellers Abfälle weiterer Unternehmen gelagert und umgeschlagen, sowie in den Behandlungsanlagen die Abfälle anderer Produktionsunternehmen verwertet oder beseitigt werden. Da in Bezug auf diese Abfälle nur wenig Informationen hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs des Abfallaufkommens zur Verfügung stehen, werden die Kapazitäten des Sonderabfallzwischenlagers sowie dieser Abfallbehandlungsanlagen nicht optimiert, sondern werden im Rahmen der Analysen grundsätzlich als ausreichend betrachtet. Laut Angaben des Generalentsorgers kann durch das Zusammenführen der Abfälle mehrerer Abfallerzeuger im Sonderabfallzwischenlager eine ca. 85 %ige Auslastung der nachgelagerten Transporte erzielt werden. Aufgrund der bereits oben angesprochenen begrenzten Information hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs des Abfallaufkommens anderer Produktionsunternehmen, wurde auf eine detaillierte Modellierung der Transporte vom Sonderabfallzwischenlager zu den Behandlungsanlagen verzichtet, und die Transportkosten werden auf der Basis einer 85 %igen Auslastung für einzelne

Behälter umgerechnet. Hinsichtlich der Transportströme ab den Behandlungsanlagen wurde analog verfahren.

Derzeit sind 12 externe Abfallbehandlungsanlagen, in denen die Aufbereitung, Verwertung oder Beseitigung der Abfälle stattfindet, und das Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers abgebildet. Dies entspricht mindestens zwei unterschiedlichen Entsorgungspfaden pro Abfallfraktion, da einige Abfallfraktionen im Rahmen der Ist-Situation der Entsorgung zu denselben Behandlungsanlagen transportiert werden können. Mittels 125 Prozessen werden die unterschiedlichen Fahrweisen der Anlagen, die Lagerung und das Umschlagen der Abfallfraktionen modelliert. Darüber hinaus sind die Transportwege für 14 verschiedene Abfallfraktionen nachgebildet, da zwischen den Abfällen des Automobilherstellers und der Zulieferunternehmen differenziert wird, um die Kosten der einzelnen Partner ausweisen zu können. Zusätzlich sind Lager, Schredder und Ballenpressen als Zubauoptionen auf dem Werksgelände des Automobilherstellers modelliert.



**Abbildung 24:** Flussstruktur der Stückgüter

Die Größe des zu lösenden gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems hängt maßgeblich von der Anzahl der berücksichtigten Perioden ab. Bei zwei Optimierungsperioden mit der Dauer von zwei und drei Jahren zur Analyse des Betrachtungszeitraums 2001 bis 2005 enthält das Modell ca.

- 100.000 Gleichungen,
- 70.000 Variablen (davon 25.000 ganzzahlige Variablen) und
- 7,5 Mio. Non-Zero-Elemente.

Die Rechenzeiten auf einem IBM kompatiblen PC (2,4 GHz, 2 GB RAM) der einzelnen Szenarios weichen deutlich voneinander ab: Während einige Szenarios bereits nach einem Tag gelöst wurden, reichten für andere Szenarios mehrere Tage

Rechenzeit nicht aus, um die optimale Lösung zu bestimmen<sup>186</sup>. Aus diesem Grund wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Ermittlung der Reihenfolge der fünf unterschiedlichen Entsorgungsstrukturen (vier Entsorgerpark-Varianten sowie kein Zubau eines Entsorgerparks) gewählt:

- In Szenarios, für die innerhalb von fünf Tagen die optimale Lösung bestimmt werden konnte, wurde die Reihenfolge der unterschiedlichen Entsorgungsstrukturen ermittelt, indem die jeweils beste Lösung für erneute Berechnungen ausgeschlossen (deaktiviert) wurde (insgesamt fünf Berechnungen).
- Zur Lösung von Szenarios, für die innerhalb von fünf Tagen keine optimale Lösung bestimmt werden konnte, wurde das Problem in kleinere Teilprobleme zerlegt, in denen der Zeitpunkt des Zubaus sowie die zugebaute Entsorgerpark-Variante vorgegeben wurde (insgesamt 9 Berechnungen). Reichte auch diese Zerlegung des Problems nicht aus, um innerhalb von fünf Tagen die optimale Lösung des Teilproblems zu bestimmen, wurden diese Berechnungen abgebrochen, sobald mittels der von CPLEX geschätzten Abweichung<sup>187</sup> von der optimalen Lösung gewährleistet war, dass der Zielfunktionswert dieser Berechnung den Zielfunktionswert einer anderen Entsorgerpark-Variante sicher unter- oder überschreitet.

## **5.6 Modellgestützte Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks**

### **5.6.1 Szenariodefinitionen und Ergebnisdarstellung**

In Kapitel 5.4.3 wurde bereits skizziert, dass das entwickelte Modell zur Analyse unterschiedlicher Szenarios eingesetzt werden kann. Nach einer Beschreibung des Basisszenarios sowie der für die einzelnen Szenarios vorgenommenen Parametervariationen werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der untersuchten Szenarios vorgestellt.

Die Analysen des Basisszenarios (siehe Kapitel 5.6.2) basieren auf der Annahme, dass in der Periode 2001 bis 2002 sämtliche Parameter – abgesehen von den Zubaumöglichkeiten eines Entsorgerparks – dem Ist-Zustand der Entsorgung entsprechen. In der Periode 2003 bis 2005 ist in diesem Szenario die zu entsorgende Abfallmenge jeder Abfallart um 10 % erhöht (entsprechend den Absatzprognosen des Automobilherstellers). Die Transportkostensätze für die Periode 2001 bis 2002 wurden nach Angaben des Generalentsorgers auf der Basis eines Preises von 72 Cent/l Dieselkraftstoff berechnet, für die Jahre 2003 bis 2005 wurde auf der Grundlage der historischen Preisentwicklung<sup>188</sup> ein Preis von 76 Cent/l abgeschätzt.

---

<sup>186</sup> Gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme gehören zu den kombinatorischen Optimierungsproblemen und sind NP-vollständig (vgl. [Feindor 1980] und [Ibaraki 1987]). Die Anzahl der benötigten Rechenschritte exakter Verfahren wächst exponentiell mit der Problemgröße gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme, weshalb bei praxisrelevanten Modellgrößen die optimale Lösung häufig nicht in vertretbarer Rechenzeit bestimmt werden kann. Aus diesem Grund werden für diese Probleme zunehmend Heuristiken eingesetzt, die mit geringerem Zeitaufwand zwar in der Regel nicht die optimale, jedoch eine hinreichend gute Lösung bestimmen.

<sup>187</sup> Siehe hierzu [GAMS 2004, S. 78 f.]

<sup>188</sup> Vgl. [LfU 2001] und [ADAC 2004].

Die Ergebnisse des Basisszenarios ohne den Zubau einer Entsorgerpark-Variante entsprechen der (optimierten) Ist-Situation der Entsorgung und werden im Folgenden als Referenzfall bezeichnet. Da aufgrund der sensiblen Unternehmensdaten eine Ergebnisdarstellung in realen Kosten- bzw. Ausgabeneinheiten nicht möglich ist, dienen die (nicht diskontierten) Kosten aus dem Jahr 2001 des Referenzfalls als Bezugsgröße: Ihnen wird der fiktive Wert von 100 Geldeinheiten zugewiesen und alle anderen Kosten und Ausgaben entsprechend umgerechnet.

Zu Beginn des Kapitels 5.5.5 wurde dargestellt, dass ein Jahr mittels eines charakteristischen Monats abgebildet wird, wobei dieser Umrechnung eine kontinuierliche Abfallentstehung zugrunde gelegt wurde. Die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise wird durch die realitätsgetreue Abbildung der angefallenen Abfallmenge sowie des Abholungszeitpunkts in ausgewählten Monaten des Jahres 2001 überprüft (Kapitel 5.6.3). Da diese Daten nur für das Jahr 2001 vorlagen, wird in diesen Szenarios von einer Berücksichtigung der Jahre 2002 bis 2005 Abstand genommen.

Sämtliche weiteren Szenarios wurden durch Variation der Parameter Abfallmenge in der Periode 2003 bis 2005 und/oder Transportkostensätze in der Periode 2003 bis 2005 generiert:

- Die im Werk des Automobilherstellers anfallende Abfallmenge korreliert mit der Anzahl der produzierten Fahrzeuge. Schwankungen in der Produktionsmenge hängen wiederum u.a. von der gesamtwirtschaftlichen Lage Deutschlands ab. Einen weiteren wichtigen Einflussfaktor bezüglich der absetzbaren Menge stellt der Produktlebenszyklus einer in der Regel über ca. fünf Jahre produzierten Baureihe dar. Zu Beginn einer Baureihe ist die Nachfrage eher verhalten, im Anschluss daran steigt sie stark an und stagniert auf diesem Niveau bis die Nachfrage nach dieser Baureihe wieder abfällt. Um mögliche Extreme dieser Nachfrage in die Analysen zu integrieren wurden Szenarios berechnet, in denen die Abfallmenge in den Jahren 2003 bis 2005 im Vergleich zur Periode 2001 bis 2002 um 25 % reduziert sowie für den Fall eines Anstiegs um 50 % erhöht wurde.
- Die Motivation zur Berechnung von Szenarios mit erhöhten Transportkostensätzen ergab sich u.a. aus der geplanten Einführung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen mit schweren Nutzfahrzeugen (so genannte Lkw-Maut) [ABMG 2002], die ab dem 31.8.2003 auf bundesdeutschen Autobahnen erhoben werden sollte. Obwohl der Starttermin aufgrund technischer Probleme bei der Umsetzung verschoben werden musste<sup>189</sup>, werden im Folgenden dennoch Ergebnisse von Szenarios mit Berücksichtigung der Lkw-Maut ab dem Jahr 2003 dargestellt, um den Einfluss dieser politisch motivierten Maßnahme zur Reduktion des Lkw-Verkehrs auf das analysierte Entsorgungssystem erfassen zu können. Die Höhe der streckenbezogenen Gebühren wurde auf der Basis einer angestrebten durchschnittlichen Lkw-Maut von 12,4 Cent/km berechnet und beträgt in

---

<sup>189</sup> Voraussichtlicher neuer Starttermin mit leicht eingeschränkter Funktionalität ist der 1.1.2005. Zum 1.1.2006 soll das System dann mit vollständiger Funktionalität eingeführt werden.

Abhängigkeit der Achslast und der Emissionen der Fahrzeuge zwischen 9 und 14 Cent/km [MautHV 2003]. Im Modell wird die Lkw-Maut durch Addition eines zusätzlichen Terms in der Zielfunktion berücksichtigt, in dem die auf bundesdeutschen Autobahnen zurückgelegten Transportkilometer mit der durchschnittlichen Lkw-Maut von 12,4 Cent/km multipliziert werden. Neben dieser Erhöhung der Transportkosten wurden Szenarios berechnet, in denen der Preis für Dieselkraftstoff in den Jahren 2003 bis 2005 durchschnittlich 95 Cent/l beträgt, um den Einfluss erhöhter Kraftstoffpreise auf das System nachvollziehen zu können.

### 5.6.2 Modellergebnisse des Basisszenarios

Die unterschiedlichen Zielfunktionswerte des Referenzfalls sowie der vier Entsorgerpark-Varianten (EP) sind in Abbildung 25 dargestellt. Während im Referenzfall über den gesamten Betrachtungszeitraum ca. 400 Geldeinheiten (GE) zur Entsorgung der Abfälle ausgegeben werden müssen, können durch den Zubau aller vier Entsorgerpark-Varianten niedrigere Gesamtausgaben erreicht werden. Allerdings sei an dieser Stelle kurz angemerkt, dass es sich bei dem hier dargestellten Referenzfall bereits um die optimierte Ist-Situation der Entsorgung handelt, in der die Kunststoffformabfälle der Zulieferunternehmen nicht thermisch verwertet werden, sondern in der externen Behandlungsanlage 2 geschreddert und anschließend einer Recyclinganlage zugeführt werden. Diese Veränderung des Entsorgungspfades führt bereits zu einer deutlichen Reduktion der Gesamtausgaben und der zurückgelegten Transportkilometer. Da diese Verringerung jedoch nicht auf das Entsorgerpark-Konzept zurückgeführt werden kann, wird das bereits um diesen Aspekt veränderte Entsorgungssystem als Referenz herangezogen.

Die optimale Lösung des Basisszenarios stellen Zubau und Betrieb des Entsorgerparks 3 (Schredder und Lager) dar, durch den die Gesamtausgaben von 398 GE auf 278 GE reduziert werden können. Durch Entsorgerpark 1 mit Schredder, Lager und Presse kann eine vergleichbare Reduktion auf 279 GE erzielt werden, sodass durch beide dieser Entsorgerpark-Varianten die Gesamtausgaben um ca. 30 % verringert werden können. Die drittbeste Lösung stellen Zubau und Betrieb eines Lagers ohne weitere Anlagen (Entsorgerpark 4) auf dem Werksgelände des Automobilherstellers dar, wodurch sich eine Ausgabenreduktion um ca. 15 % auf 340 GE erzielen lässt. Entsorgerpark 2 stellt aus ökonomischer Sicht die am wenigsten attraktive Entsorgerpark-Variante dar. Dennoch können auch durch diese Variante die Gesamtausgaben im Vergleich zum Referenzfall auf ca. 360 GE bzw. 90 % reduziert werden.

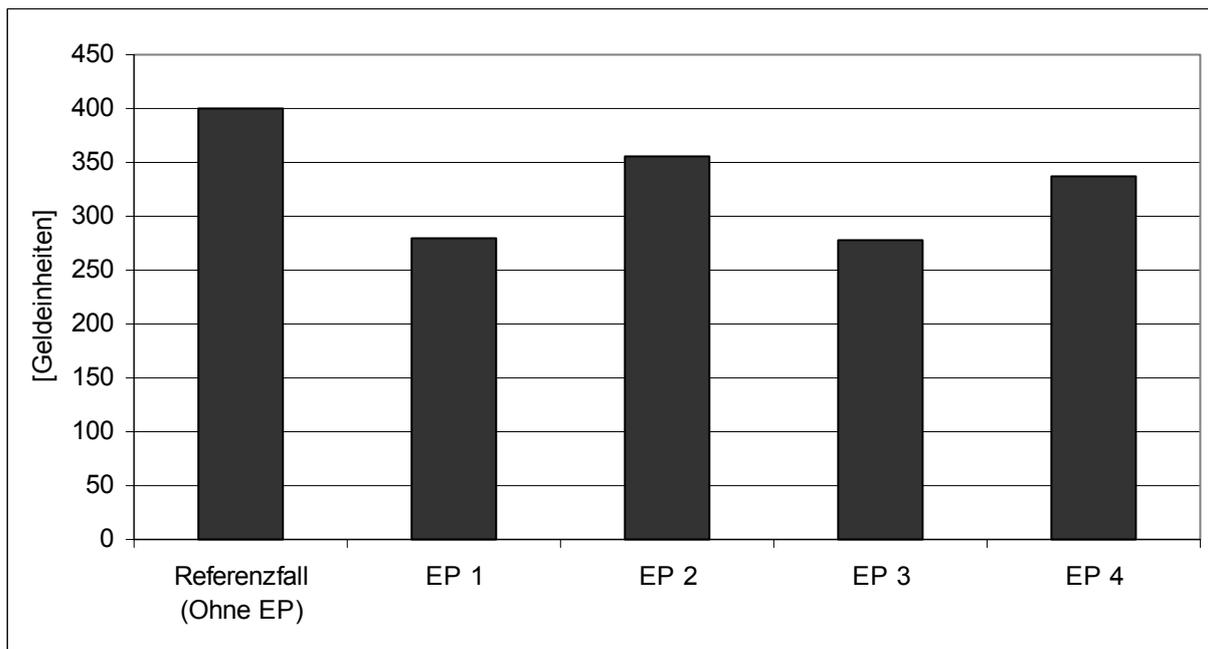


Abbildung 25: Zielfunktionswerte des Basisszenarios

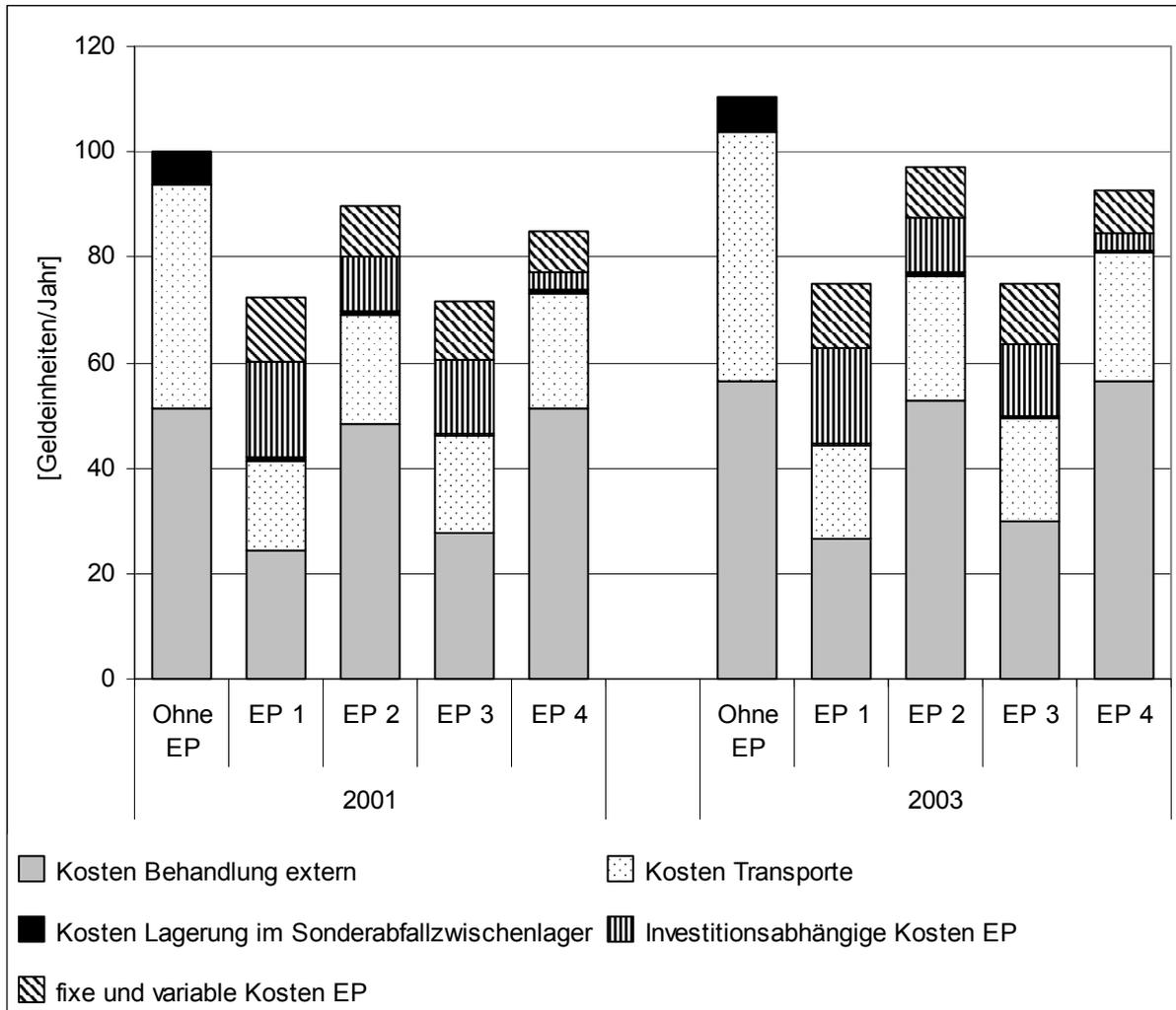
Bereits bei näherer Betrachtung der Zielfunktionswerte zeigt sich, dass insbesondere durch jene Entsorgerpark-Varianten signifikante Ausgabenreduktionen erzielt werden können, in denen u.a. ein Schredder für Kunststoffformteile vorgesehen ist. Im Folgenden werden nun die Veränderungen durch die unterschiedlichen Entsorgerpark-Varianten in der Reihenfolge ihrer Vorteilhaftigkeit detailliert beschrieben. Vergleichende Übersichten hinsichtlich der Kostenzusammensetzung, der Kostenverursacher sowie der zurückgelegten Transportkilometer sind in Abbildung 26 bis Abbildung 28 dargestellt.

### 5.6.2.1 Entsorgerpark-Variante 3

Die im Vergleich zum Referenzfall durch Entsorgerpark 3 erzielbare Ausgabenreduzierung ergibt sich maßgeblich aus einer Verringerung der Ausgaben für eine Behandlung der Abfälle in externen Anlagen und der Ausgaben für die Entsorgungstransporte. Die Kosten für die Errichtung und den Betrieb dieser Entsorgerpark-Variante betragen in beiden betrachteten Jahren ca. 25 GE, wobei das Verhältnis zwischen investitionsabhängigen und fixen/variablen Kosten in etwa bei 3:2 liegt. Neben den bereits durch die Variantenbildung festgelegten Komponenten wird im Jahr 2001 ein Lager mit 12 Stellplätzen für IBC und 6 Stellplätzen für ARM zugebaut.

Da die Kosten für die externe Behandlung der Kunststoffformabfälle einen maßgeblichen Anteil der Kosten für die externe Behandlung bilden, können durch Schreddern dieser Abfallfraktion auf dem Werksgelände des Automobilherstellers in beiden betrachteten Perioden diese Kosten um etwa 40 % gesenkt werden: Im Referenzfall betragen die Kosten für die externe Behandlung der Abfälle im Jahr 2001 insgesamt ca. 50 GE (2003 ca. 55 GE), bei Zubau des Entsorgerparks 3 ergeben sich in beiden Jahren ca. 30 GE für die externe Behandlung. Die Errichtung und der Betrieb des Entsorgerparks führen in beiden Jahren zu Transportkosten in

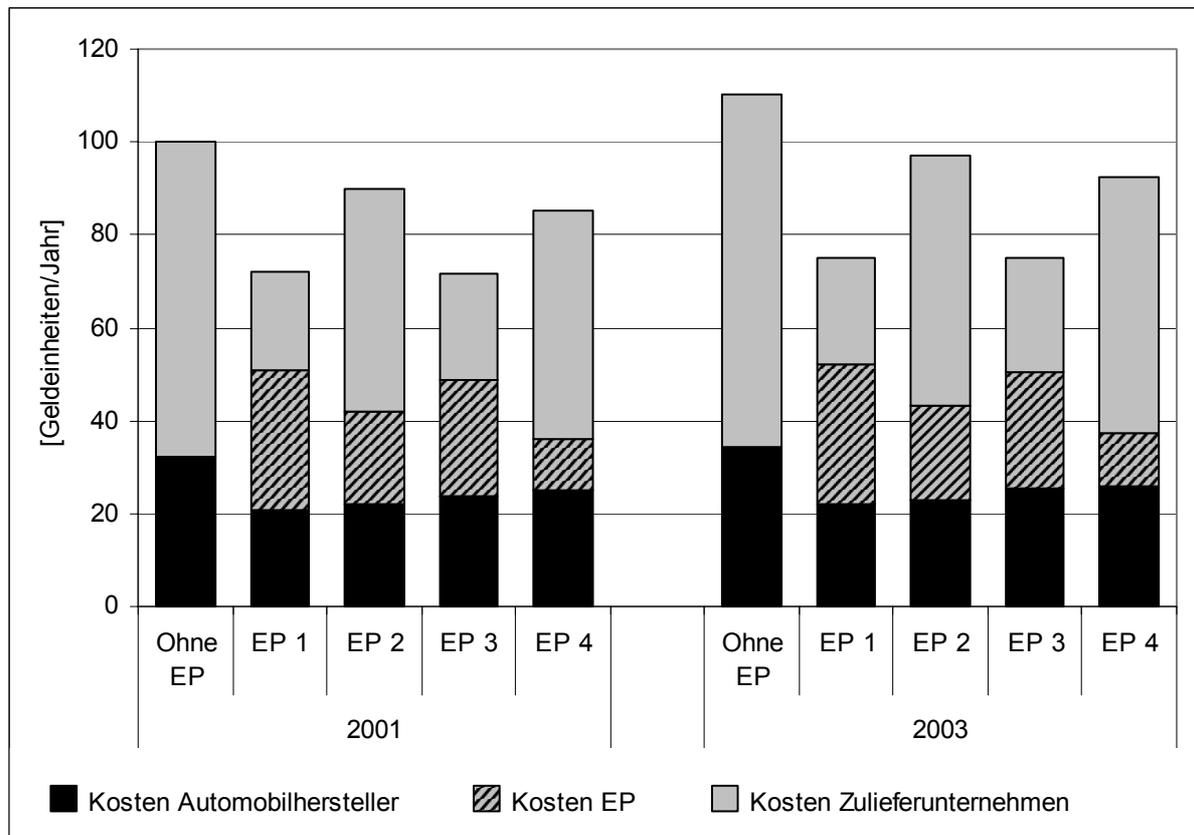
Höhe von ca. 20 GE (Referenzfall: 2001 ca. 40 GE, 2003 ca. 45 GE) und die Kosten für die Abfalllagerung im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers liegen unter 1 GE (Referenzfall ca. 5 GE in beiden Jahren).



**Abbildung 26:** Kostenzusammensetzung im Basisszenario

Im Referenzfall gehen in den Jahren 2001 und 2003 ca. 30 % der Kosten auf die Entsorgung der Abfälle des Automobilherstellers zurück, ca. 70 % der Kosten entstehen jeweils bei der Entsorgung der Abfälle der Zulieferunternehmen. Durch Entsorgerpark-Variante 3 resultieren in beiden betrachteten Jahren Kosten für die Errichtung und den Betrieb von insgesamt ca. 25 GE. Des Weiteren entstehen dem Automobilhersteller direkt zurechenbare Kosten in Höhe von ca. 25 GE und den Zulieferunternehmen direkt zurechenbare Kosten in Höhe von ebenfalls ca. 25 GE. Aufgrund des deutlich höheren Anteils der Kunststoffformabfälle an der Gesamtabfallmenge der Zulieferunternehmen verglichen mit dem Anteil der Kunststoffformabfälle an der Gesamtabfallmenge des Automobilherstellers ergeben sich ohne Berücksichtigung der Kosten für den Entsorgerpark für die Zulieferunternehmen Kosteneinsparpotenziale von bis zu ca. 70 % im Jahr 2003, während sich die

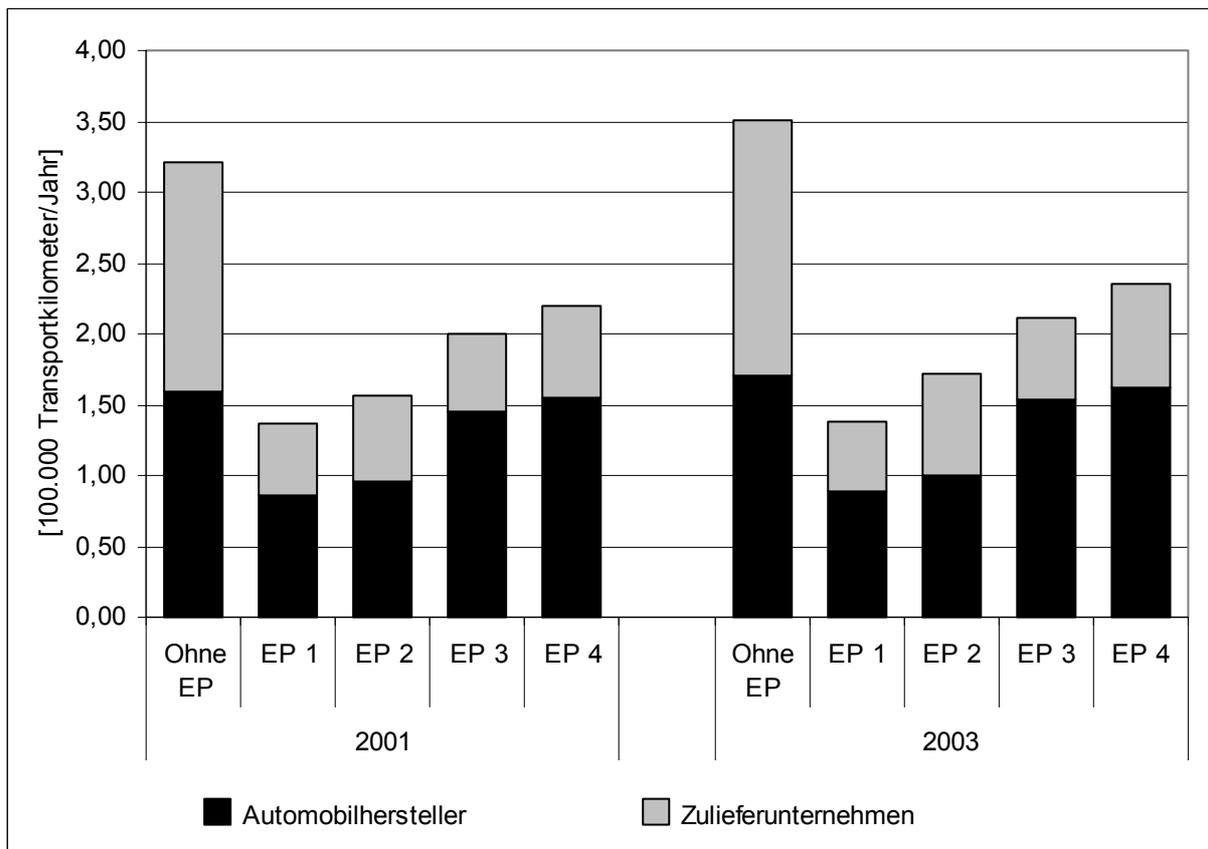
Einsparpotenziale für den Automobilhersteller auf ca. 25 % der Kosten des Referenzfalls belaufen.



**Abbildung 27:** Kosten des Automobilherstellers, der Zulieferunternehmen und der Entsorgerpark-Varianten im Basisszenario

Die im vorangegangenen beschriebenen Kostenreduktionen lassen sich neben dem Schreddern der Kunststoffformabfälle im Entsorgerpark durch folgende Veränderungen gegenüber dem Referenzfall erreichen:

- Lagerung der Abfallfraktionen Kunststoffbehältnisse und Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten, Altlacke/Altfarben, Lösemittelgemisch sowie överschmutzte Betriebsmittel im IBC-Lager auf dem Werksgelände,
- Umschlag der Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel sowie Metallhydroxidschlämme von IBC in ARM im Entsorgerpark,
- Lagerung der Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel, Metallhydroxidschlämme, Papier/Pappe/Kartonagen (PPK), Kunststoffformteile und gemischte Abfälle zur Verwertung (AZV) in ARM auf dem Werksgelände und
- Direkttransporte der Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel, Metallhydroxidschlämme, PPK, Kunststoffformteile und AZV vom Werksgelände des Automobilherstellers zu den Behandlungsanlagen.



**Abbildung 28:** Zurückgelegte Transportkilometer im Basisszenario

Die beiden auf dem Werksgelände von IBC in ARM umgeschlagenen Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel sowie Metallhydroxidschlämme, stellen bezogen auf die in IBC gesammelten Abfallarten mengenmäßig die bedeutendsten Abfallfraktionen dar. Da diese nun direkt und nicht über das Sonderabfallzwischenlager zu den entsprechenden Behandlungsanlagen transportiert werden, können zum einen die Transporte mit 12 oder 24 IBC zum Sonderabfallzwischenlager deutlich reduziert werden, und zum anderen entfallen für diese Abfallfraktionen die Kosten für die Lagerung im Sonderabfallzwischenlager.

Der Lagerbestand im IBC-Lager auf dem Werksgelände steigt im Jahr 2001 bis zum 11. Arbeitstag auf 12 IBC an, bevor am 12. Arbeitstag diese 12 Behälter aus dem Lager mit zwei am 12. Tag angefallenen IBC vom Automobilhersteller zum Sonderabfallzwischenlager transportiert werden. Die Auslastung auf diesem Transport beträgt ca. 60 %. Ab diesem Zeitpunkt steigt der Lagerbestand erneut auf 12 IBC an, bis die Behälter am letzten betrachteten Tag zum Sonderabfallzwischenlager transportiert werden (Transportauslastung 100 %). Im Jahr 2003 entwickelt sich der Bestand im IBC-Lager vergleichbar, wobei aufgrund der erhöhten Abfallmenge in diesem Jahr der erste Transport bereits am 10. Arbeitstag stattfindet.

Das Lagern der Abfälle in ARM ermöglicht die Beförderung von zwei Behältern auf einem Direkttransport vom Werksgelände zu den Behandlungsanlagen. Transporte mit einem Behälter finden nur statt, wenn im Betrachtungszeitraum eine ungerade Anzahl an Behältern anfällt oder die sechs Stellplätze im Lager bereits vollständig

belegt sind. Im letzteren Fall wird grundsätzlich die Abfallart für den Einzeltransport ausgewählt, deren Behandlungsanlage die geringste Entfernung aufweist, da hierdurch auch die geringsten Transportkosten entstehen.

Durch die vorgenannten Veränderungen im Vergleich zum Referenzfall wird neben der Reduktion der Transportkosten auch ein deutlicher Rückgang der zurückgelegten Transportkilometer erzielt. Während im Referenzfall im gesamten Betrachtungszeitraum von fünf Jahren ca. 1,7 Mio. Transportkilometer zur Entsorgung der Abfälle zurückgelegt werden, sinken die Transportkilometer durch Entsorgerpark 3 auf ca. 1 Mio. Transportkilometer. Im Referenzfall entspricht das Verhältnis der Transportkilometer zwischen Automobilhersteller und Zulieferunternehmen etwa 1:1. Durch die Volumenreduktion der Kunststoffformabfälle kann die größte Transportreduktion erzielt werden, weshalb die durch die Zulieferunternehmen bedingten Transportkilometer um ca. 65 % und die des Automobilherstellers um ca. 10 % durch Entsorgerpark 3 gesenkt werden können.

#### **5.6.2.2 Entsorgerpark-Variante 1**

Im Vergleich zu Entsorgerpark 3 führt Entsorgerpark 1 zu höheren Gesamtausgaben (ca. 1 GE). Da neben den im Rahmen von Entsorgerpark 3 vorgesehenen Komponenten zusätzlich der Zubau einer Presse für die Abfallfraktionen Papier/Pappe/Kartonagen und gemischte Abfälle zur Verwertung vorgesehen ist, ergeben sich im Vergleich zu Entsorgerpark 3 höhere Gesamtkosten für die Errichtung und den Betrieb von Entsorgerpark 1. Des Weiteren wird im Jahr 2001 in Verbindung mit Entsorgerpark 1 ein Lager mit 12 Stellplätzen für IBC und 9 Stellplätzen für ARM (6 Stellplätze für ARM bei Entsorgerpark-Variante 3) zugebaut. Die jährlichen investitionsabhängigen Kosten der Entsorgerpark-Variante 1 belaufen sich auf ca. 20 GE, die Summe aus Fixkosten und variablen Betriebskosten beträgt ca. 10 GE.

Verglichen mit dem Referenzfall können die Kosten für die Behandlung der Abfälle in externen Behandlungsanlagen durch Schreddern und Pressen auf dem Werksgelände des Automobilherstellers in beiden betrachteten Jahren in etwa halbiert werden (jeweils ca. 25 GE). Die Transportkosten können in den betrachteten Perioden im Vergleich zum Referenzfall auf ca. 60 % reduziert werden, und die Kosten für die Lagerung der Abfälle im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers liegen bei Einführung von Entsorgerpark 1 in den Jahren 2001 und 2003 unter einer Geldeinheit.

Bezüglich der beteiligten Unternehmen zeigt sich, dass die direkt auf den Automobilhersteller zurückzuführenden Kosten in beiden Jahren um 35 % verringert werden können. Demgegenüber bestehen hinsichtlich der direkt zurechenbaren Kosten der Zulieferunternehmen Einsparpotenziale von ca. 70 %. Hinsichtlich der hier angegebenen Einsparpotenziale muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese noch anhand eines geeigneten Aufteilungsschlüssels um die für die Errichtung und den Betrieb eines Entsorgerparks anfallenden Kosten verringert werden müssen.

Die im Vorfeld angeführten Einsparpotenziale resultieren aus folgenden Veränderungen des Entsorgungssystems bzw. der Entsorgungspfade im Vergleich zum Referenzfall:

- Volumenreduktion der Kunststoffformabfälle durch den Einsatz eines Schredders auf dem Werksgelände des Automobilherstellers,
- Volumenreduktion der Abfallfraktionen Papier/Pappe/Kartonagen und gemischte Abfälle zur Verwertung durch den Einsatz einer Presse auf dem Werksgelände,
- Lagerung der Abfallfraktionen Kunststoffbehältnisse/Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten, överschmutzte Betriebsmittel, Altlacke/Altfarben und Lösemittelgemisch im IBC-Lager auf dem Werksgelände,
- Umschlag der Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel sowie Metallhydroxidschlämme von IBC in ARM im Entsorgerpark,
- Lagerung der Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel, Metallhydroxidschlämme, PPK, Kunststoffformteile und AZV in ARM auf dem Werksgelände und
- Direkttransporte der Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel, Metallhydroxidschlämme, PPK, Kunststoffformteile und AZV vom Werksgelände des Automobilherstellers zu den Behandlungsanlagen.

Da auch bei der Implementierung dieser Entsorgerpark-Variante die Abfallfraktionen Metallhydroxidschlämme sowie Leim- und Klebemittel auf dem Werksgelände in größere Transportbehälter umgeschlagen werden und anschließend direkt zu den Behandlungsanlagen befördert werden, findet eine deutliche Verringerung der Transporte mit 12 oder 24 IBC vom Werksgelände des Automobilherstellers zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers statt. Des Weiteren resultiert hierdurch eine signifikante Reduktion der beim Generalentsorger gelagerten Abfallmenge, wodurch die Lagerkosten im Sonderabfallzwischenlager verringert werden.

Die Entwicklung des IBC-Lagerbestands sowie die Transportvorgänge zwischen dem Werksgelände des Automobilherstellers und dem Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers entsprechen den im Rahmen der Ausführungen zur Entsorgerpark-Variante 3 skizzierten Vorgängen: Der Lagerbestand im IBC-Lager steigt an, bis alle 12 Stellplätze belegt sind. Am darauf folgenden Tag werden die an diesem Tag in IBC angefallenen Abfälle und die 12 gelagerten IBC transportiert. Anschließend werden bis zum letzten Tag des betrachteten Jahres sämtliche angefallenen IBC gelagert und dann zum Sonderabfallzwischenlager transportiert.

Um die Beförderung von zwei ARM auf einem Transport zu ermöglichen, werden die entsprechenden Abfallfraktionen auf dem Werksgelände gelagert. Wie auch bei Zubau der Entsorgerpark-Variante 3 finden Einzeltransporte nur bei einer ungeraden Anzahl der im charakteristischen Monat angefallenen Behälter oder bei bereits vollständiger Belegung des Lagers statt. Die im Rahmen der Beschreibung des Entsorgerparks 3 skizzierten Zusammenhänge bezüglich der Auswahl der im letzteren Falle beförderten Abfallart gelten analog. Verglichen mit den Ergebnissen der Entsorgerpark-Variante 3 wird bei Entsorgerpark-Variante 1 ein um drei Stellplätze größeres Lager für ARM zugebaut. Dies ist erforderlich, da durch Pressen der Abfallfraktionen PPK und AZV von diesen Abfallarten nunmehr nicht nur ein,

sondern ein zweiter Behälter bis zu seiner vollständigen Befüllung gelagert werden muss, um die Einsparpotenziale der Beförderung zweier Behälter mit einem Transport ausschöpfen zu können.

Durch die im Vergleich zur Entsorgerpark-Variante 3 zusätzliche Volumenreduktion der Abfallfraktionen PPK und AZV werden die zur Entsorgung der Abfälle notwendigen Transportkilometer weiter verringert. Verglichen mit dem Referenzfall können die Transportkilometer über den gesamten Betrachtungszeitraum um ca. 1 Mio. km (60 %) reduziert werden. Während sich das Einsparpotenzial der Zulieferunternehmen im Vergleich zum Entsorgerpark 3 lediglich geringfügig erhöht (2001: 69 %, 2003: 73%), können die zurückzulegenden Transportkilometer des Automobilherstellers durch die Volumenreduktion der Abfallfraktionen PPK und AZV deutlich reduziert werden: Im Jahr 2001 können etwa 75.000 km gegenüber dem Referenzfall, im Jahr 2003 ca. 80.000 km vermieden werden (Entsorgerpark 3: 2001 und 2003 je ca. 15.000 km).

#### **5.6.2.3 Entsorgerpark-Variante 4**

Im Rahmen von Entsorgerpark 4 wird ein Lager auf dem Werksgelände des Automobilherstellers zugebaut. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen stellen 12 Stellplätze für IBC und 6 Stellplätze für ARM die optimale Lagergröße dar, wofür jährlich variable und fixe Kosten von 8 GE und investitionsabhängige Kosten von ca. 3 GE entstehen. Die durch die Lagermöglichkeit auf dem Werksgelände erzielbare Reduktion der Gesamtausgaben von ca. 15 % lässt sich in erster Linie auf deutlich verringerte Transportkosten zurückführen. Darüber hinaus können durch Entsorgerpark 4 die Kosten für die Lagerung im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers von etwa 5 GE im Referenzfall in beiden betrachteten Jahren auf weniger als eine Geldeinheit gesenkt werden. Da im Rahmen von Entsorgerpark 4 keine Anlagen zur Vorbehandlung der Abfälle installiert werden, verändern sich die Ausgaben für die externe Behandlung nicht.

Ohne Berücksichtigung der für die Errichtung und den Betrieb des Entsorgerparks entstehenden Kosten ergibt sich durch die Abfalllagerung auf dem Werksgelände in beiden betrachteten Jahren für den Automobilhersteller ein Kosteneinsparpotenzial von ca. 22 %. Hinsichtlich der Abfallentsorgung der Zulieferunternehmen besteht ein etwas höheres Einsparpotenzial von ca. 28 %.

Im IBC-Lager werden die Abfallfraktionen

- Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten,
- Kunststoffbehältnisse mit schädlichen Restinhalten,
- Altlacke/Altfarben,
- överschmutzte Betriebsmittel und
- Lösemittelgemische

gelagert bis sämtliche Stellplätze mit IBC belegt sind. Am darauf folgenden Tag werden die gelagerten IBC mit den an diesem Tag angefallenen IBC zu einer Transportcharge kombiniert. Anschließend werden erneut IBC gelagert, bis sämtliche ab dem Zeitpunkt des ersten Transports angefallenen Behälter am letzten Tag des

betrachteten Jahres zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers transportiert werden.

Durch Umschlagen der Abfallfraktionen

- Leim- und Klebemittel sowie
- Metallhydroxidschlämme

auf dem Werksgelände, deren anschließende Lagerung und Direkttransporte zur Behandlungsanlage werden Transportkosten und Kosten für die Lagerung im Sonderabfallzwischenlager verringert. Des Weiteren werden die bereits im Rahmen der Ist-Situation in ARM transportierten Abfallfraktionen

- Papier/Pappe/Kartonagen,
- Kunststoffformteile und
- gemischte Abfälle zur Verwertung

auf dem Werksgelände gelagert, um zwei Behältern pro Transport zu befördern. Auch im Rahmen dieser Entsorgerpark-Variante werden nur dann Einzeltransporte durchgeführt, wenn im betrachteten Monat eine ungerade Behälteranzahl anfällt bzw. wenn das Lager bereits vollständig belegt ist. Im letzteren Falle wird der Behälter für den Einzeltransport ausgewählt, der die niedrigsten Transportkosten (die geringste Entfernung zur Behandlungsanlage) aufweist.

Durch die Lagerung auf dem Werksgelände können die Transportkilometer insgesamt um ca. 0,55 Mio. km verringert werden, wobei diese Einsparung fast ausschließlich aus der Reduktion der Transportkilometer der Zulieferunternehmen (ca. 0,5 Mio. km) resultiert. Diese deutlichen Unterschiede hinsichtlich der Transporteinsparpotenziale erklären sich durch die unterschiedliche Handhabung der Entsorgung im Rahmen der Ist-Situation. Da die Abfälle des Automobilherstellers bisher im Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers mit den Abfällen anderer Abfallerzeuger zu Transporten (mit einer durchschnittlichen Auslastung von ca. 85 %) kombiniert wurden, ergeben sich Effizienzsteigerungen primär für die Transporte zwischen dem Werksgelände des Automobilherstellers und dem Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers, während die Transporte zu den Behandlungsanlagen nur geringfügig reduziert werden. Beispielsweise werden im Referenzfall die Kunststoffformabfälle der Zulieferunternehmen direkt vom Werksgelände zu Behandlungsanlage 1 transportiert, die des Automobilherstellers im Sonderabfallzwischenlager mit den Kunststoffformabfällen anderer Abfallerzeuger zusammengefasst. Im Gegensatz zum Automobilhersteller können bei den Entsorgungstransporten der Zulieferunternehmen Verbesserungen über die gesamte Transportentfernung erzielt werden, weshalb sich vergleichsweise höhere Einsparpotenziale ergeben. Diese Unterschiede werden zwar im Fall des Zubaus von Entsorgerpark 4 am deutlichsten, treten aber bei sämtlichen Entsorgerpark-Varianten auf.

#### **5.6.2.4 Entsorgerpark-Variante 2**

Wie bereits einleitend festgestellt wurde, ist Entsorgerpark 2 die aus ökonomischer Sicht am wenigsten attraktive Zubauvariante. Dennoch lassen sich auch durch den

Zubau einer Presse für die Abfallfraktionen Papier/Pappe/Kartonagen und gemischte Abfälle zur Verwertung sowie durch ein Lager mit 12 Stellplätzen für IBC und 9 Stellplätzen für ARM die Gesamtausgaben um ca. 10 % reduzieren. Für die Errichtung und den Betrieb des Entsorgerparks betragen die jährlichen Kosten ca. 20 GE, wobei das Verhältnis zwischen investitionsabhängigen Kosten sowie der Summe aus fixen und variablen Kosten in etwa 1:1. beträgt. Das Pressen der Abfallfraktionen PPK und AZV auf dem Werksgelände führt lediglich zu geringen Kostenvorteilen hinsichtlich der externen Behandlung der Abfälle von ca. 5 GE pro Jahr, da hierdurch zwar die externe Vorbehandlung entfällt, jedoch keine Veränderungen in Bezug auf die Endbehandlung in den Papierfabriken bzw. die stoffliche Verwertung von AZV erzielt werden können. Die Reduktion der Gesamtausgaben lässt sich im Wesentlichen auf die Halbierung der jährlichen Transportkosten (2001/2003: Referenzfall 40/45 GE, Entsorgerpark 4 20/22,5 GE) zurückführen. Des Weiteren werden durch Umschlagen und Lagern der Abfälle im Entsorgerpark die Kosten für die Lagerung im Sonderabfallzwischenlager auf unter eine Geldeinheit reduziert.

Im Rahmen dieser Entsorgerpark-Variante besitzen der Automobilhersteller und die Zulieferunternehmen ein vergleichbares Kosteneinsparpotenzial von ca. 30 % gegenüber dem Referenzfall. Beispielsweise sinken die Kosten des Automobilherstellers im Jahr 2003 verglichen mit dem Referenzfall um ca. 10 GE auf 25 GE, die der Zulieferunternehmen um ca. 20 GE auf ca. 55 GE. Allerdings gilt auch bezüglich der hier angegebenen Werte, dass die Einsparpotenziale bzw. die für die einzelnen Unternehmen ausgewiesenen Kosten noch nicht um die für die Errichtung und den Betrieb des Entsorgerparks zu entrichtenden Kosten verringert worden sind.

Verglichen mit dem Referenzfall ergeben sich durch den Zubau und den Betrieb der Entsorgerpark-Variante 2 nachstehende Veränderungen:

- Volumenreduktion der Abfallfraktionen PPK und AZV durch Pressen auf dem Werksgelände,
- Lagerung von Metall- und Kunststoffbehältnissen mit schädlichen Restinhalten, ölverschmutzten Betriebsmitteln, Altlacken/Altfarben und Lösemittelgemischen in IBC auf dem Werksgelände,
- Umschlag von IBC in ARM der Abfallfraktionen Metallhydroxidschlämme und Leim- und Klebemittel auf dem Werksgelände,
- Lagerung von PPK, AZV, Kunststoffformabfällen, Metallhydroxidschlämmen sowie Leim- und Klebemitteln in ARM auf dem Werksgelände.

Wie bei den drei im vorigen dargestellten Entsorgerpark-Varianten werden auch bei Entsorgerpark 2 die Abfallfraktionen Metallhydroxidschlämme sowie Leim- und Klebemittel auf dem Wergsgelände umgeschlagen und direkt zu den Behandlungsanlagen transportiert. Hierdurch reduzieren sich die Transporte mit 12 bzw. 24 IBC vom Werksgelände des Automobilherstellers zum Sonderabfallzwischenlager sowie die vom Automobilhersteller beim Generalentsorger gelagerte Abfallmenge. Aufgrund dieser Verringerung werden die hierfür anfallenden Kosten deutlich vermindert.

Die Entwicklung des IBC-Lagerbestands und der Transporte zwischen Automobilhersteller und Sonderabfallzwischenlager entsprechen denen der drei bereits beschriebenen Entsorgerpark-Varianten, da dieselben Abfallarten im IBC-Lager

gelagert werden: Nach der vollständigen Belegung des IBC-Lagers findet ein Transport aller gelagerten und der am Transporttag angefallenen IBC statt. Danach werden wiederum alle in IBC gesammelten Abfälle gelagert, bis sie am Ende des betrachteten Monats zum Sonderabfallzwischenlager transportiert werden.

Durch Lagern der in ARM transportierten Abfallarten können zwei Behälter pro Transport befördert werden. Auch bei Entsorgerpark-Variante 2 werden Einzeltransporte vermieden, es sei denn dies ist aufgrund einer ungeraden Behälteranzahl oder Vollbelegung des Lagers nicht möglich. Die Lagergröße für ARM entspricht der Lagergröße der Entsorgerpark-Variante 1, die als einzige weitere Entsorgerpark-Variante die Komponente Presse vorsieht. Das Erfordernis eines für diese Varianten vergrößerten Lagers ergibt sich aufgrund der Lagerung von bis zu zwei Behältern (ein bereits vollständig befüllter und ein noch weiter zu befüllender Behälter) der Abfallfraktionen AZV und PPK neben den Behältern für die Abfallfraktionen Kunststoffformteile, Leim- und Klebmittel sowie Metallhydroxidschlämme.

Durch Pressen und Lagern auf dem Werksgelände können im gesamten Betrachtungszeitraum von fünf Jahren ca. 0,85 Mio. Transportkilometer eingespart werden, was etwa der Hälfte der im Referenzfall zurückgelegten Transportkilometer entspricht. Diese deutliche Reduktion ist primär auf den Einsatz der Presse auf dem Werksgelände zurückzuführen, da hierdurch nicht nur die Zulieferunternehmen die Transportkilometer in beiden betrachteten Jahren um ca. 60 % verringern können, sondern sich auch für den Automobilhersteller ein Einsparpotenzial von ca. 40 % gegenüber dem Referenzfall ergibt. Die beim Automobilhersteller eingesparten Transportkilometer lassen sich in erster Linie auf das Pressen der Fraktion Papier/Pappe/Kartonagen zurückführen, da sich dies auf die Entsorgungstransporte bis zu den Papierfabriken auswirkt.

#### **5.6.2.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse**

Wie bereits in der Einleitung der Ergebnisdarstellung des Basisszenarios ausgeführt wurde, kann durch alle Entsorgerpark-Varianten die Entsorgung des betrachteten Systems unter den gegebenen Rahmenbedingungen mit niedrigeren Gesamtausgaben durchgeführt werden als im Referenzfall. Hinsichtlich der ökonomischen Aspekte sind die Entsorgerpark-Varianten mit einem Schredder für Kunststoffformabfälle (3 und 1) den Varianten ohne Schredder (2 und 4) vorzuziehen, da durch die erstgenannten größere Kosteneinsparungen erzielt werden können. Wird das Potenzial zur Transportkilometereinsparung als Auswahlkriterium herangezogen, können durch die Varianten mit Presse für die Abfallfraktionen Papier/Pappe/Kartonagen und gemischte Abfälle zur Verwertung (2 und 1) die größten Minderungen erzielt werden.

Abgesehen von Entsorgerpark 2 sind die Kosteneinsparpotenziale der Zulieferunternehmen bei allen Entsorgerpark-Varianten größer als die des Automobilherstellers. Die Einsparpotenziale der Zulieferunternehmen übersteigen (bzw. im Fall von Entsorgerpark 2 egalisieren) die Kosten für einen Entsorgerpark unter den gegebenen Rahmenbedingungen, sodass ein Entsorgerpark für die Abfallströme der Zulieferunternehmen auch ohne Berücksichtigung der Abfallströme des Automobil-

herstellers zu Kostensenkungen führt. Durch eine Beteiligung des Automobilherstellers am Entsorgerpark-Konzept können die mit dem Entsorgerpark verbundenen Kosten jedoch zwischen den Partnern aufgeteilt werden, sodass für beide Parteien ein Anreiz besteht, an der Kooperation teilzunehmen. Darüber hinaus sind die Zulieferunternehmen auf dem Werksgelände des Automobilherstellers angesiedelt, wodurch die Möglichkeiten der Zulieferunternehmen, dieses Konzept ohne den Automobilhersteller zu implementieren, eingeschränkt sind.

Aufgrund der lediglich minimalen Ausgabenunterschiede zwischen Entsorgerpark 3 und Entsorgerpark 1 im Basisszenario findet an dieser Stelle noch keine Festlegung auf eine dieser beiden Varianten statt. Zur weiteren Entscheidungsunterstützung werden die ab Kapitel 5.6.4 dargestellten Szenarios unter Berücksichtigung erhöhter Transportkostensätze und/oder veränderter Abfallmengen herangezogen. Aufgrund der deutlichen höheren Kosteneinsparpotenziale der Entsorgerpark-Varianten 1 und 3 gegenüber den Varianten 2 und 4 wird bei den folgenden Ergebnispräsentationen auf die detaillierte Darstellung aller Varianten verzichtet, lediglich die Ergebnisse für die Varianten 1 und 3 werden näher erläutert. Die Ergebnisdarstellung bezüglich der Varianten 2 und 4 beschränkt sich auf die Präsentation der Zielfunktionswerte, damit die Aussagen zur ökonomischen Vorteilhaftigkeit der Entsorgerpark-Varianten mit Schredder auch bei der Ergebnisvorstellung der weiteren Szenarios nachvollzogen werden können.

### **5.6.3 Überprüfung der Zulässigkeit der Verwendung einer durchschnittlichen monatlichen Abfallmenge und eines kontinuierlichen Anfalls**

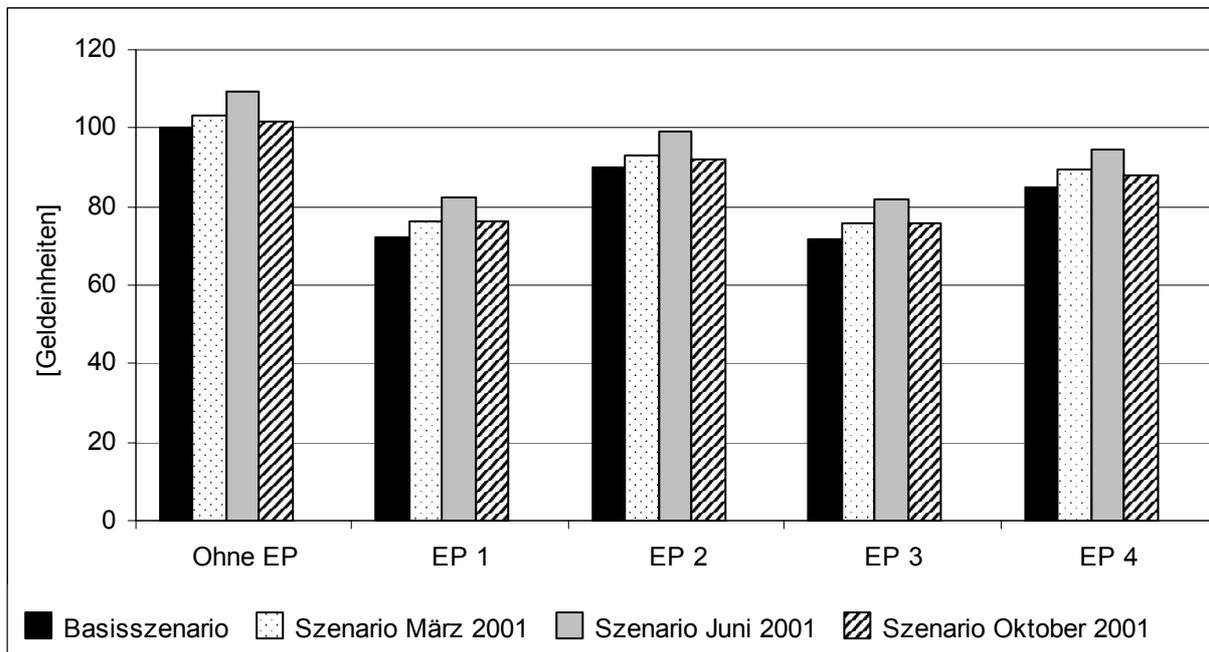
Auf Basis der täglichen Abfalldaten des Jahres 2001 wurden Menge und zeitlicher Verlauf der Abfallentstehung für einen charakteristischen Monat abgeleitet. Dies schien zulässig, da aus den zur Verfügung stehenden Daten ersichtlich war, dass die Abfallentstehung lediglich geringen Schwankungen unterlag. Um die Zulässigkeit dieser Vereinfachung zu überprüfen, wurden sämtliche Monate des Jahres 2001 hinsichtlich Abfallmenge sowie Zeitpunkt des Anfalls exakt abgebildet. Im Folgenden werden lediglich die Ergebnisse der Szenarios März, Juni und Oktober 2001 präsentiert, da diese Ergebnisse die größten Unterschiede im Vergleich zum Basis-szenario aufweisen.

In Abbildung 29 sind die Gesamtkosten des Basisszenarios sowie der einzelnen Monate bei einer Optimierung mit sowie ohne Zubaumöglichkeit dargestellt. Zwar ergeben sich in den einzelnen Szenarios jeweils unterschiedliche Gesamtkosten, jedoch weisen alle Szenarios dieselbe Tendenz auf:

- In sämtlichen Szenarios führt der Zubau aller Entsorgerpark-Varianten zu einer Reduktion der Gesamtkosten verglichen mit der optimierten Ist-Situation.
- Entsorgerpark 2 ist aus ökonomischer Sicht die am wenigsten attraktive Zubaualternative.
- Die Entsorgerpark-Varianten 1 und 3 weisen ein ähnliches Kosteneinsparpotenzial auf und führen zu den niedrigsten Gesamtkosten des Systems.

In den folgenden Kapiteln werden jeweils die Ergebnisse bei realitätsgetreuer Nachbildung eines Monats den Ergebnissen des Jahres 2001 des Basisszenarios

gegenübergestellt, wobei sich die Ausführungen auf die optimierte Ist-Situation sowie die Entsorgerpark-Varianten 1 und 3 beschränken.



**Abbildung 29:** Gegenüberstellung der Gesamtkosten im Jahr 2001 des Basisszenarios und der Szenarios März, Juni und Oktober 2001

### 5.6.3.1 Abbildung des Monats März 2001

Im Vergleich zum Basisszenario ist die zu entsorgende Abfallmenge im März 2001 um ca. 11 % erhöht bei einer annähernd unveränderten Anzahl zu entsorgender Behälter (vgl. Tabelle 38). Besteht keine Zubaumöglichkeit eines Entsorgerparks, bedingt die erhöhte Abfallmenge verglichen mit dem Referenzfall einen Anstieg der Gesamtkosten um ca. 3 % und der zurückgelegten Entfernung um ca. 6 %.

Die Erhöhung der Gesamtkosten kann vollständig auf die Zunahme der externen Behandlungskosten um ca. 3 GE zurückgeführt werden, da die Lagerkosten im Sonderabfallzwischenlager und die Transportkosten denen des Referenzfalls entsprechen. Trotz der gleich bleibenden Transportkosten erhöhen sich die Transportkilometer aufgrund der im Vergleich zum Basisszenario unterschiedlichen Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens<sup>190</sup>. Da die Veränderungen der Abfallmenge maßgeblich durch die Abfallströme des Automobilherstellers hervorgerufen werden, erhöht sich dessen Anteil der Entsorgungskosten um ca. 3 GE,

<sup>190</sup> Generell wird im Rahmen der Ergebnisdarstellung auf ganze Zahlen gerundet, sodass leicht unterschiedliche Ergebnisse durch die Normierung auf den Referenzfall und der Rundung in der Ergebnisdarstellung zu denselben Zahlen führen. Auf eine Darstellung der Werte mit Dezimalen wird bewusst verzichtet, da dies einen Genauigkeitsanspruch suggerieren würde, dem die Datenaggregation, die teilweise vorgenommene Vereinfachung im Rahmen der Modellbildung sowie die Abschätzung zukünftiger Eingangsparameter entgegensteht.

während sich die Kosten der Zulieferunternehmen im Vergleich zum Referenzfall lediglich um ca. eine Geldeinheit erhöhen.

**Tabelle 38:** Gegenüberstellung der veränderten Eingangsparameter und wesentlicher Ergebnisse des Basisszenarios und des Szenarios März 2001

	Basisszenario			März 2001		
Abfallmenge [%] (Basisszenario $\hat{=}$ 100 %)	100			111		
Anzahl zu entsorgender Behälter [%] (Basisszenario $\hat{=}$ 100 %)	100			99		
	Ohne EP	EP 1	EP 3	Ohne EP	EP 1	EP 3
Gesamtkosten [GE]	100	72	72	103	76	76
Kosten Behandlung extern [GE]	51	25	28	54	27	31
Kosten Transporte [GE]	43	17	18	43	19	20
Kosten Lagerung im Sonder- abfallzwischenlager [GE]	6	0	0	6	0	0
Investitionsabhängige Kosten Entsorgerpark [GE]	0	18	14	0	18	14
fixe und variable Kosten Entsorgerpark [GE]	0	12	11	0	12	11
Kosten Automobilhersteller [GE]	32	21	24	32	25	28
Kosten Zulieferunternehmen [GE]	68	21	23	69	21	23
Lagergröße IBC [Stellplätze]	0	12	12	0	12	12
Lagergröße ARM, etc. [Stellplätze]	0	9	6	0	9	6
zurückgelegte Transport- kilometer [km]	320.000	140.000	200.000	340.000	160.000	230.000

Im Rahmen der Analysen unter Einbeziehung der Zubauoptionen weist Entsorgerpark 3 geringfügig niedrigere Gesamtkosten als Entsorgerpark 1 auf (0,3 GE). Die optimale Lagergröße in Verbindung mit Entsorgerpark 3 beträgt sowohl im Basisszenario als auch im Szenario März 2001 12 Stellplätze für IBC und 6 Stellplätze für ARM. Ebenso werden in beiden Szenarios dieselben Entsorgungspfade für alle Abfallfraktionen ausgewählt. Die durch den Entsorgerpark erzielbaren Kosteneinsparungen liegen im Basisszenario bei ca. 28 %, bei Abbildung des Monats März 2001 können Einsparungen von ca. 26 % erzielt werden. Auch bezüglich der Transportkosten und der Kosten für die externe Behandlung können im Basisszenario etwas höhere Einsparpotenziale realisiert werden. Dies, so wie die geringere Reduktion der Transportkilometer, ist in erster Linie auf die zum einen erhöhten und zum anderen in ihrer Zusammensetzung veränderten Abfallströme des

Automobilherstellers zurückzuführen. Des Weiteren ergeben sich deshalb keine Veränderungen hinsichtlich der durch Entsorgerpark 3 für die Zulieferunternehmen erzielbaren Einsparungen, während das Einsparpotenzial des Automobilherstellers bei Abbildung des Monats 2001 lediglich die Hälfte des Basisszenarios beträgt.

In Verbindung mit dem Zubau des Entsorgerparks 1 stellt sowohl im Basisszenario als auch bei Abbildung des Monats März 2001 ein Lager mit Stellplätzen für 9 ARM und 12 IBC die kostenoptimale Lösung dar. Die hierdurch möglichen Kosten- und Transportkilometereinsparungen sind im Basisszenario leicht höher als bei Abbildung des Monats März 2001: Im Basisszenario können ca. 28 %, im Szenario März 2001 ca. 26 % der Gesamtkosten eingespart werden. Bezüglich der Transportkilometer ergibt sich für das Basisszenario ein Einsparpotenzial von 56 % gegenüber 53 % im Szenario März 2001. Die Entsorgungspfade sind bei Abbildung des Monats März 2001 gegenüber dem Basisszenario unverändert. Hinsichtlich der Kosten der einzelnen Unternehmen erhöht sich der Anteil des Automobilherstellers an den Gesamtkosten bzw. dessen Einsparpotenzial verringert sich im Vergleich zum Basisszenario. Wie bereits erwähnt wurde, liegt die Ursache hierfür in der erhöhten Abfallmenge des Automobilherstellers und den damit verbundenen höheren Kosten für die externe Behandlung der Abfälle. Darüber hinaus sinkt im hier betrachteten Monat die Reduktion der Transportkosten im Vergleich zum Basisszenario, was ebenfalls vollständig auf die veränderte Abfallmengen- und Zusammensetzung des Automobilherstellers zurückzuführen ist.

#### **5.6.3.2 Abbildung des Monats Juni 2001**

Die zu entsorgende Abfallmenge im Juni 2001 lag ebenfalls 11 Prozentpunkte über dem Monatsdurchschnitt, wobei im Gegensatz zu März 2001 auch die Anzahl der zu entsorgenden Behälter zunahm (113 % verglichen mit dem Basisszenario). Im Rahmen der optimierten Ist-Situation der Entsorgung resultiert im Szenario Juni 2001 aus dem Anstieg der externen Behandlungskosten um ca. 6 GE und der Lagerkosten im Sonderabfallzwischenlager um ca. 3 GE ein Anstieg der Gesamtkosten um ca. 9 GE, da sich die Transportkosten verglichen mit dem Referenzfall nicht verändern. Die zurückgelegte Transportentfernung ist ebenfalls mit der des Referenzfalls vergleichbar. Die Kosten des Automobilherstellers steigen um ca. 7 GE, die der Zulieferunternehmen um ca. 2 GE, da im Szenario Juni 2001 verglichen mit dem Basisszenario ebenfalls stärkere Abweichungen der Abfallströme des Automobilherstellers als der Abfallströme der Zulieferunternehmen vorherrschen.

**Tabelle 39:** Gegenüberstellung der veränderten Eingangsparameter und wesentlicher Ergebnisse des Basisszenarios und des Szenarios Juni 2001

	Basisszenario			Juni 2001		
	Ohne EP	EP 1	EP 3	Ohne EP	EP 1	EP 3
Abfallmenge [%] (Basisszenario $\hat{=}$ 100 %)	100			111		
Anzahl zu entsorgender Behälter [%] (Basisszenario $\hat{=}$ 100 %)	100			113		
Gesamtkosten [GE]	100	72	72	109	83	82
Kosten Behandlung extern [GE]	51	25	28	57	31	34
Kosten Transporte [GE]	43	17	18	43	21	21
Kosten Lagerung im Sonder- abfallzwischenlager [GE]	6	0	0	9	0	1
Investitionsabhängige Kosten Entsorgerpark [GE]	0	18	14	0	18	14
fixe und variable Kosten Entsorgerpark [GE]	0	12	11	0	12	11
Kosten Automobilhersteller [GE]	32	21	24	39	31	34
Kosten Zulieferunternehmen [GE]	68	21	23	70	22	23
Lagergröße IBC [Stellplätze]	0	12	12	0	12	12
Lagergröße ARM, etc. [Stellplätze]	0	9	6	0	9	6
zurückgelegte Transport- kilometer [km]	320.000	140.000	200.000	320.000	170.000	210.000

Auch im Szenario Juni 2001 ist Entsorgerpark 3 mit 12 Lagerstellplätzen für IBC und 6 Lagerstellplätzen für ARM die optimale Lösung. Die vom Modell ermittelten Entsorgungspfade stimmen für alle Abfallarten in beiden Szenarios überein. Durch Entsorgerpark 3 können im Szenario Juni 2001 die Gesamtkosten um ca. 25 % (Basisszenario 28 %), die Transportkilometer um ca. 34 % (Basisszenario 37 %) verringert werden. Das Basisszenario weist ein höheres Einsparpotenzial hinsichtlich der Kosten für die externe Behandlung der Abfälle und der Transportkosten auf. Demgegenüber ist das Einsparpotenzial bezüglich der Lagerkosten im Sonderabfallzwischenlager im Szenario Juni 2001 höher als im Basisszenario. Für die Zulieferunternehmen kann durch Entsorgerpark 3 mit Schredder und Lager eine Kostenreduktion um ca. 50 GE erzielt werden, was bei prozentualer Betrachtung dem Einsparpotenzial des Basisszenarios entspricht. Im Gegensatz dazu verringert sich das Einsparpotenzial des Automobilherstellers im Szenario Juni 2001 auf die Hälfte des Einsparpotenzials des Basisszenarios.

Durch Entsorgerpark 1 mit Schredder, Presse und einem Lager mit Stellplätzen für 12 IBC und 6 ARM können ca. 24 % der Gesamtkosten und ca. 47 % der Transportkilometer im Szenario Juni 2001 eingespart werden. Das Kosteneinsparpotenzial ist verglichen mit dem Basisszenario ca. 4 % geringer, die Einsparungen bei den Transportkilometern liegen ca. 9 % unter den Einsparungen des Referenzfalls. Das Einsparpotenzial hinsichtlich der Transportkosten beträgt im Szenario Juni 2001 ca. 51 % und ist damit verglichen zum Basisszenario 9 Prozentpunkte niedriger. Das verringerte Einsparpotenzial der Transportkosten und Transportkilometer ergibt sich aus einem verstärkten Anfall von Abfallfraktionen, für die sich bei der Errichtung eines Entsorgerparks lediglich geringe Einsparpotenziale zur Reduktion ergeben (Altlacke und Altfarben, Kunststoffbehältnisse mit schädlichen Restinhalten). Da die Veränderungen der Abfallmengenströme v.a. die Abfälle des Automobilherstellers betreffen (u.a. fallen Altlacke/Altfarben und Kunststoffbehältnisse mit schädlichen Restinhalten nur beim Automobilhersteller an), sinkt dessen Einsparpotenzial von ca. 35 % im Basisszenario auf ca. 20 % im Szenario Juni 2001, während sich bei prozentualer Betrachtung keine Veränderung des Einsparpotenzials der Zulieferunternehmen ergibt.

### **5.6.3.3 Abbildung des Monats Oktober 2001**

Im Oktober 2001 waren im Vergleich zum Monatsdurchschnitt maßgeblich die Abfallfraktionen Papier/Pappe/Kartonagen, Kunststoffformabfälle und gemischte Abfälle zur Verwertung erhöht, wobei die Abfallmengenströme des Automobilherstellers stärkeren Schwankungen unterlagen als die der Zulieferunternehmen. Verglichen mit dem Referenzfall erhöht sich die Gesamtabfallmenge um 6 %, während die Anzahl der zu entsorgenden Behälter um 2 % sinkt, da weniger Abfälle anfallen, die in IBC entsorgt werden. Die Gesamtkosten des Szenarios Oktober 2001 ohne Zubau eines Entsorgerparks entsprechen in etwa denen des Referenzfalls und die zurückgelegte Transportstrecke ist um ca. 3 % erhöht.

Wie in den beiden zuvor beschriebenen Szenarios führt auch im Szenario Oktober 2001 Entsorgerpark 3 zu den größten Einsparungen. Sowohl die vom Modell optimierte Lagergröße als auch die ausgewählten Entsorgungspfade für die Abfallarten entsprechen denen des Basisszenarios (bzw. aller voranstehenden Szenarios). Verglichen mit dem Basisszenario ist das Kosteneinsparpotenzial geringfügig niedriger (25 % gegenüber 28 %), und auch die Verringerung der Transportkilometer liegt unter der des Basisszenarios (30 % gegenüber 37 %). Während das Einsparpotenzial hinsichtlich der externen Behandlungskosten lediglich um 2 Prozentpunkte voneinander abweicht, können im Basisszenario die Transportkosten um ca. 58 %, im Szenario Oktober 2001 lediglich um ca. 52 %, reduziert werden. Das Einsparpotenzial der Zulieferunternehmen verändert sich nicht, das des Automobilherstellers liegt bei ca. 18 % (ca. 7 Prozentpunkte unter dem Einsparpotenzial des Basisszenarios).

**Tabelle 40:** Gegenüberstellung der veränderten Eingangsparameter und wesentlicher Ergebnisse des Basisszenarios und des Szenarios Oktober 2001

	Basisszenario			Oktober 2001		
	Ohne EP	EP 1	EP 3	Ohne EP	EP 1	EP 3
Abfallmenge [%] (Basisszenario $\hat{=}$ 100 %)	100			106		
Anzahl zu entsorgender Behälter [%] (Basisszenario $\hat{=}$ 100 %)	100			98		
	Ohne EP	EP 1	EP 3	Ohne EP	EP 1	EP 3
Gesamtkosten [GE]	100	72	72	101	76	76
Kosten Behandlung extern [GE]	51	25	28	53	26	30
Kosten Transporte [GE]	43	17	18	42	19	20
Kosten Lagerung im Sonder- abfallzwischenlager [GE]	6	0	0	6	0	1
Investitionsabhängige Kosten Entsorgerpark [GE]	0	18	14	0	18	14
fixe und variable Kosten Entsorgerpark [GE]	0	12	11	0	12	11
Kosten Automobilhersteller [GE]	32	21	24	34	24	28
Kosten Zulieferunternehmen [GE]	68	21	23	67	22	23
Lagergröße IBC [Stellplätze]	0	12	12	0	12	12
Lagergröße ARM, etc. [Stellplätze]	0	9	6	0	9	6
zurückgelegte Transport- kilometer [km]	320.000	140.000	200.000	330.000	160.000	230.000

Entsorgerpark 1 führt im Szenario Oktober 2001 zu einer Reduktion der Gesamtkosten um ca. 25 % (Basisszenario ca. 28 %) bei einer simultanen Reduktion der Transportkilometer um ca. 50 % (Basisszenario ca. 55 %). Auch hinsichtlich dieser Entsorgerpark-Variante ergeben sich verglichen mit dem Basisszenario dieselbe Lagergröße und dieselben Entsorgungspfade für alle abgebildeten Abfallarten. Sowohl im Basisszenario als auch bei Abbildung des Monats Oktober 2001 können ca. 50 % der externen Behandlungskosten vermieden werden. Die durch Entsorgerpark 1 erreichbare Reduktion der Transportkosten beträgt im Szenario Oktober 2001 ca. 55 %, im Basisszenario kann eine Verringerung um ca. 60 % erzielt werden. Im Szenario Oktober 2001 sinkt das Kosteneinsparpotenzial der betrachteten Unternehmen im Vergleich zum Basisszenario: Die dem Automobilhersteller direkt zurechenbaren Kosten können um ca. 30 % (gegenüber 35 % im Basisszenario), die der Zulieferunternehmen um ca. 65 % (gegenüber 70 % im Basisszenario) verringert werden.

#### **5.6.3.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse**

Zusammengefasst kann anhand dieser drei Szenarios konstatiert werden, dass die Verwendung der durchschnittlichen monatlichen Abfallmenge zulässig ist, da in allen drei betrachteten Monaten im Vergleich mit dem Basisszenario

- die Reihenfolge der Zubauoptionen hinsichtlich der Zielfunktionswerte dieselbe ist,
- ähnliche Gesamtkosteneinsparungen realisiert werden können,
- jeweils dieselbe (optimale) Lagergröße in Abhängigkeit der unterschiedlichen Entsorgerpark-Varianten ermittelt wird und
- in allen Szenarios für sämtliche Abfallarten dieselben Entsorgungspfade ausgewählt werden.

Somit tritt durch Abbildung eines charakteristischen Monats kein Unterschied hinsichtlich der wesentlichen Ergebnisse auf. Während die Zulieferunternehmen in allen hier vorgestellten Szenarios ähnliche Kosteneinsparungen realisieren können, zeigen sich für den Automobilhersteller in den Szenarios März, Juni und Oktober 2001 niedrigere Einsparpotenziale als im Basisszenario. Dies liegt in der unterschiedlichen Abfallmengen- und Zusammensetzung begründet, da in den hier berücksichtigten Monaten eine deutlich erhöhte Abfallmenge solcher Abfallarten zu entsorgen war, für die durch einen Entsorgerpark lediglich geringe Verbesserungspotenziale erzielt werden können.

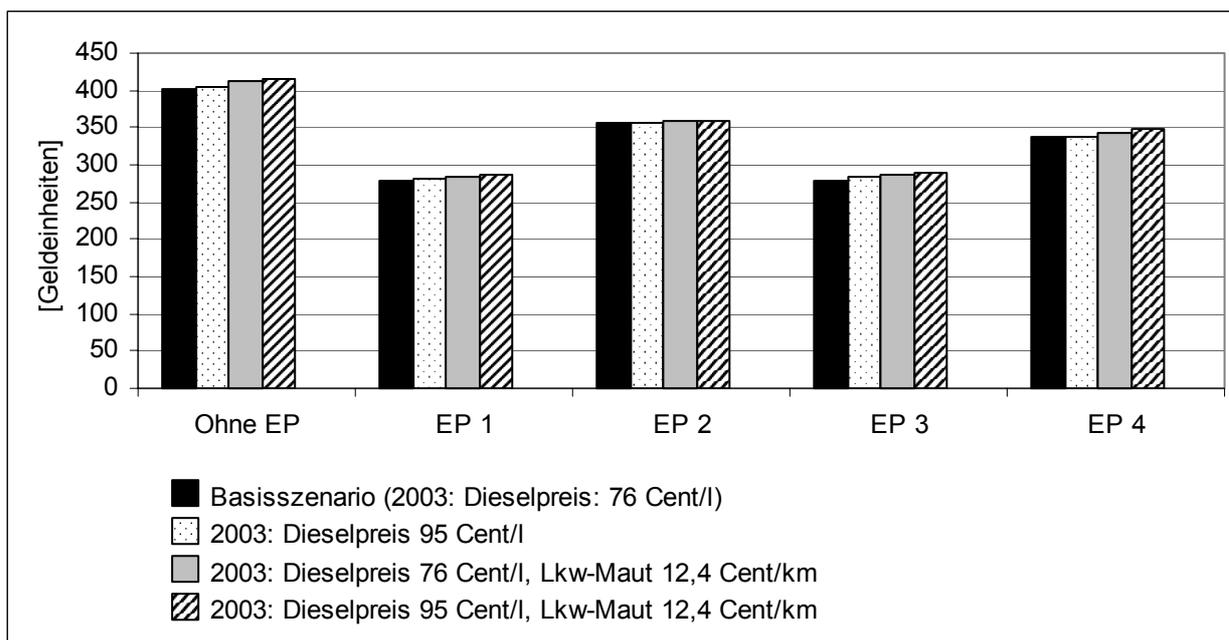
In der Einleitung dieses Kapitels wurde bereits erwähnt, dass die Ergebnisse der Monate dargestellt wurden, in denen sich die größten Unterschiede im Vergleich zum Basisszenario ergaben. Da auch in diesen Monaten die wesentlichen Ergebnisse denen des Basisszenarios entsprechen, wurden für alle weiteren Szenarios die zu einem charakteristischen Monat aggregierten Jahresdaten verwendet.

#### **5.6.4 Auswirkungen erhöhter spezifischer Transportkosten**

Im Rahmen dieses Unterkapitels werden die Szenarios behandelt, in denen im Vergleich zum Basisszenario die spezifischen Transportkosten ab dem Jahr 2003 aufgrund eines Anstiegs der Kraftstoffpreise und/oder der Einführung der Autobahn-maut erhöht sind. Abbildung 30 enthält eine Gegenüberstellung der Gesamtausgaben des Basisszenarios und der Szenarios mit erhöhten spezifischen Transportkosten für sämtliche Entsorgerpark-Varianten. Kein Zubau einer Entsorgerpark-Variante ergibt in allen vier Szenarios die höchsten Gesamtausgaben, wobei die Einführung der Lkw-Maut zu einem geringfügig höheren Anstieg der Gesamtausgaben führt als ein erhöhter Dieselpreis. Diese Tendenz zeigt sich auch bei den unterschiedlichen Gesamtausgaben der vier Entsorgerpark-Varianten.

Bezüglich der ökonomischen Vorteilhaftigkeit weisen Entsorgerpark 1 und Entsorgerpark 3 ein ähnliches, im Vergleich zu den Varianten 2 und 4 deutlich höheres, Einsparpotenzial auf. Während im Basisszenario Entsorgerpark 3 geringfügig höhere Einsparungen als Entsorgerpark 1 erzielt, führen erhöhte spezifische Transportkosten zu einer Umkehr dieses Zusammenhangs. In Szenarios, in denen die spezifischen Transportkosten entweder durch den Anstieg des Dieselpreises oder

durch die Lkw-Maut erhöht sind, liegen die Gesamtausgaben bei Zubau von Entsorgerpark 1 ca. 2 GE unter den Gesamtausgaben von Entsorgerpark 3. Bei simultaner Berücksichtigung der Lkw-Maut und einem erhöhten Dieselpreis führt der Zubau von Entsorgerpark 1 zu einem um ca. 3 GE niedrigeren Zielfunktionswert. Diese Veränderung erklärt sich durch das deutlich höhere Transportreduktionspotenzial von Entsorgerpark 1 (aufgrund der hier zusätzlich installierten Presse). Zwar entstehen für diesen Entsorgerpark deshalb auch höhere Ausgaben als für Entsorgerpark 3, jedoch führen eingesparte Transportkilometer aufgrund der erhöhten spezifischen Transportkosten in diesen Szenarios verglichen mit dem Basisszenario zu zusätzlichen Kosteneinsparungen.

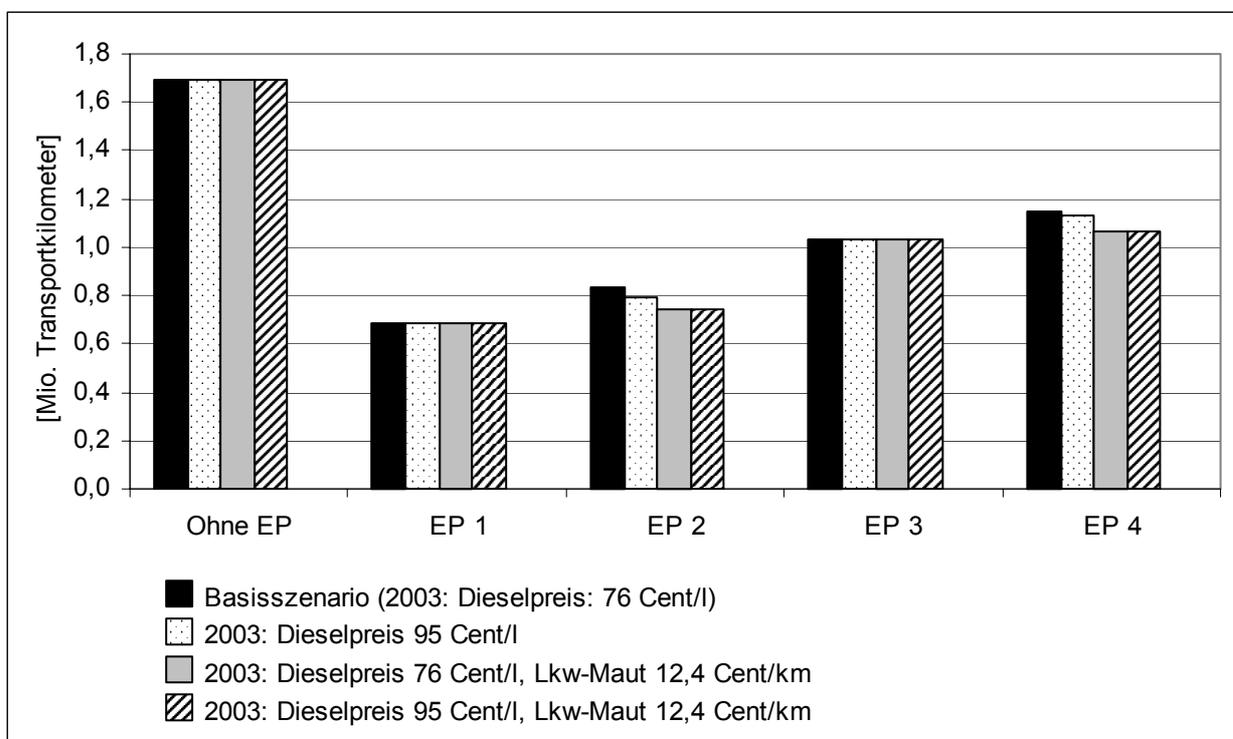


**Abbildung 30:** Gegenüberstellung der Gesamtausgaben des Basisszenarios und der Szenarios mit erhöhten Kraftstoffpreisen und/oder Berücksichtigung der Lkw-Maut

Ist der Zubau eines Entsorgerparks ausgeschlossen, ergeben sich durch erhöhte spezifische Transportkosten keine Veränderungen der zurückgelegten Transportkilometer (siehe Abbildung 31). Dies lässt den Schluss zu, dass falls eine weitere Transportreduktion möglich ist, diese nur durch eine Erhöhung der Investitionen sowie Ausgaben für die Behandlung und Lagerung der Abfälle erzielt werden kann, die über die zusätzlichen Ausgaben für die Transporte von 6 Geldeinheiten hinausgehen. Entsorgerpark 1 und Entsorgerpark 3 weisen ebenfalls in allen vier Szenarios dieselben Transportkilometer auf, während bei den Entsorgerpark-Varianten 2 und 4 mit zunehmenden spezifischen Transportkosten die Transportkilometer stärker verringert werden. Diese Verringerung wird primär durch eine Vergrößerung der Lagerkapazitäten auf dem Werksgelände erzielt, um die Auslastung der Transporte weiter zu erhöhen bzw. deren Anzahl zu senken.

### 5.6.4.1 Auswirkungen eines erhöhten Kraftstoffpreises

Da im Rahmen der Szenariobildung eine Erhöhung des Kraftstoffpreises erst ab dem Jahr 2003 vorgesehen wurde, stimmen die Ergebnisse dieses Szenarios bei Ausschluss aller Entsorgerpark-Varianten im Jahr 2001 mit den Ergebnissen des Referenzfalls im Jahr 2001 überein. Aufgrund der Erhöhung der spezifischen Transportkostensätze ab dem Jahr 2003 steigen die Transportkosten verglichen mit dem Referenzfall um eine Geldeinheit auf 48 GE an, während sich sowohl hinsichtlich der sonstigen Kosten als auch hinsichtlich der Transportkilometer keine Veränderungen ergeben. Da die Transportkilometer der Zulieferunternehmen und die des Automobilherstellers ohne einen Entsorgerpark in etwa gleich hoch sind, betrifft die Erhöhung der Transportkosten beide Unternehmen gleichermaßen.



**Abbildung 31:** Gegenüberstellung der im gesamten Betrachtungszeitraum zurückgelegten Transportkilometer des Basisszenarios und der Szenarios mit erhöhten Kraftstoffpreisen und/oder Berücksichtigung der Lkw-Maut

Wie bereits im Rahmen der Einleitung dieser Szenarios skizziert wurde, weist bei erhöhten spezifischen Transportkosten Entsorgerpark 1 geringfügig niedrigere Gesamtausgaben auf als Entsorgerpark 3. Bei beiden Entsorgerpark-Varianten werden auch bei einem erhöhten Kraftstoffpreis im Vergleich zum Basisszenario sowohl dieselbe Lagergröße als auch für alle Abfallarten dieselben Entsorgungspfade gewählt. Aus diesem Grund entsprechen, abgesehen von den Transportkosten, sämtliche Kosten des hier beschriebenen Szenarios auch im Jahr 2003 jeweils den Ergebnissen des Basisszenarios. Infolge der durch Zubau von Entsorgerpark 1 größeren Transportkilometereinsparungen steigen die Transportkosten im Jahr 2003 lediglich um ca. 0,5 GE, während sich die Transportkosten bei Zubau von Entsorger-

park 3 verglichen mit dem Basisszenario um ca. 1,5 GE erhöhen. Da das Jahr 2003 als Stützjahr für eine Periode von drei Jahren dient, während das Jahr 2001 lediglich eine Periode von zwei Jahren repräsentiert, reicht dieser Kostenunterschied gegenüber dem Basisszenario bereits aus, dass Entsorgerpark 1 insgesamt (minimal) niedrigere Gesamtausgaben als Entsorgerpark 3 aufweist.

Bezogen auf die einzelnen Unternehmen ergibt sich ebenso wie im Basisszenario auch bei einem erhöhten Dieselpreis für die Zulieferunternehmen ein Einsparpotenzial von je ca. 70 % bei Zubau der Entsorgerpark-Varianten 1 oder 3. Die Einsparpotenziale hinsichtlich der direkt dem Automobilhersteller zurechenbaren Kosten entsprechen ebenfalls den Einsparpotenzialen des Basisszenarios (Entsorgerpark 1 ca. 35 %, Entsorgerpark 3 ca. 25 %).

#### **5.6.4.2 Auswirkungen durch die Einführung der Lkw-Maut**

Wie auch die erhöhten Kraftstoffpreise wird die Lkw-Maut ebenfalls erst ab dem Jahr 2003 in den Analysen berücksichtigt. Ohne Entsorgerpark entsprechen deshalb auch nach Integration der Lkw-Maut die Ergebnisse des Jahres 2001 den Ergebnissen des Referenzfalls des Jahres 2001. Im Jahr 2003 sind die Transportkosten durch die Lkw-Maut um 4 GE erhöht, während die Kosten für die Lagerung und externe Behandlung der Abfälle im Vergleich zum Referenzfall unverändert sind. Aufgrund der im Basisszenario vergleichbaren Transportkilometer der beiden Unternehmen nehmen die Kosten des Automobilherstellers und der Zulieferunternehmen bezogen auf den Referenzfall jeweils um ca. 2 GE zu.

Wird im Jahr 2001 Entsorgerpark 1 mit Schredder, Presse und Lager mit 12 Stellplätzen für IBC und 9 Stellplätzen für ARM auf dem Werksgelände des Automobilherstellers zugebaut, ergeben sich bei Berücksichtigung der Lkw-Maut Ausgabeneinsparungen von ca. 31 % (Basisszenario: 30 %). Diese Erhöhung des Einsparpotenzials resultiert vollständig aus der im Vergleich zum Basisszenario höheren Kosteneinsparung je Autobahnkilometer im Jahr 2003, da die Ergebnisse hinsichtlich der gewählten Entsorgungspfade und Transportvorgänge identisch sind. Eine theoretisch weiter mögliche Reduktion der Transportkilometer durch Vergrößerung des Lagers würde demnach aufgrund der für das Lager anfallenden Investitionen zu einer Erhöhung der Gesamtausgaben führen. Die durch Entsorgerpark 1 realisierbaren Kosteneinsparpotenziale des Automobilherstellers und der Zulieferunternehmen gleichen denen des Basisszenarios, wobei sich die den Unternehmen direkt zurechenbaren Kosten aufgrund der Mautgebühren im Jahr 2003 im Vergleich zum Basisszenario jeweils um eine Geldeinheit erhöhen.

Auch bei Zubau von Entsorgerpark 3 entsprechen die Ergebnisse des Jahres 2001 des hier beschriebenen Szenarios denen des Basisszenarios. Über den gesamten Betrachtungszeitraum ergeben sich, abgesehen von den erhöhten Transportkosten im Jahr 2003, keine Veränderungen gegenüber dem Basisszenario. Die leicht höheren Gesamtausgaben von Entsorgerpark 3 verglichen mit Entsorgerpark 1 resultieren aus der vergleichsweise niedrigeren Transportreduktion von Entsorgerpark 3, weshalb die Transportkosten aufgrund der LKW-Maut im Jahr 2003 ca. 2,5 GE über denen des Basisszenarios liegen (Entsorgerpark 1 ca. 1,5 GE). Auch in

diesem Szenario entsprechen die Einsparpotenziale bezüglich der den Unternehmen direkt zurechenbaren Kosten bei prozentualer Betrachtung denen des Basis-szenarios.

#### **5.6.4.3 Auswirkungen eines erhöhten Kraftstoffpreises bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Lkw-Maut**

Im Rahmen dieses Szenarios erhöhen sich die Transportkosten im Jahr 2003 zum einen durch einen Anstieg des Kraftstoffpreises und zum anderen durch die Berücksichtigung der Lkw-Maut. Wie in den beiden vorangegangenen Szenarios hat dies keinen Einfluss auf die Ergebnisse des Jahres 2001 (sowohl ohne Zubau als auch mit Zubau einer beliebigen Entsorgerpark-Variante). Die beiden in den vorigen Kapiteln einzeln betrachteten Erhöhungen, führen ohne den Zubau eines Entsorgerparks zu einer Erhöhung der Transportkosten im Jahr 2003 um 6 GE, was der Summe der in den vorangegangenen Szenarios erfassten Transportkostenerhöhungen entspricht.

Durch Entsorgerpark 1 kann die größte Reduktion der Gesamtausgaben erzielt werden, wobei die Vorteilhaftigkeit gegenüber Entsorgerpark 3 vollständig aus der erhöhten Reduktion der Transporte und damit auch der Transportkosten im Jahr 2003 resultiert. Abgesehen von der Transportkostenerhöhung im Jahr 2003 ergeben sich bei beiden Entsorgerpark-Varianten auch in diesem Szenario keine Veränderungen (Entsorgerpark 1 gegenüber Basisszenario um 2 GE, Entsorgerpark 3 um 3 GE erhöht), weshalb auf eine erneute Darstellung der in den beiden vorangegangenen Szenarios beschriebenen Zusammenhänge verzichtet wird.

#### **5.6.4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse**

Im Gegensatz zum Basisszenario erwies sich in den hier betrachteten Szenarios Entsorgerpark 1 als kostenoptimale Lösung. Mit zunehmender Erhöhung der Transportkostensätze steigt das Einsparpotenzial von Entsorgerpark 1 stärker an als das von Entsorgerpark 3, da durch das Pressen der Abfallfraktionen Papier/ Pappe/ Kartonagen und gemischte Abfälle zur Verwertung weniger Transporte durchgeführt werden müssen und die ökonomischen Vorteile vermiedener Transporte in diesen Szenarios aufgrund der erhöhten spezifischen Transportkosten die des Basis-szenarios übersteigen. Während hinsichtlich der Entsorgerpark-Varianten 2 und 4 bei erhöhten spezifischen Transportkosten eine im Vergleich zum Basisszenario unterschiedliche Anpassung des Entsorgungssystems vorgenommen werden sollte, ergeben sich für die Entsorgerparks 1 und 3 verglichen mit dem Basisszenario keine Änderungen bezüglich der Lagergröße sowie der Entsorgungspfade aller betrachteten Abfallfraktionen. Auch bei erhöhten spezifischen Transportkosten bietet der Zubau eines Entsorgerparks den Zulieferunternehmen ein höheres Potenzial zur Reduktion der Entsorgungskosten als dem Automobilhersteller, wobei die Einsparpotenziale der einzelnen Parteien in allen hier präsentierten Szenarios nahezu konstant sind.

### **5.6.5 Auswirkungen veränderter Abfallmengen**

Im Rahmen dieses Unterkapitels wird auf Ergebnisse bei einer deutlichen Veränderung der ab dem Jahr 2003 zu entsorgenden Abfallmenge eingegangen. Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse bei einer auf 75 % des Referenzfalls verringerten Abfallmenge ab 2003 präsentiert, bevor die Auswirkungen eines Anstiegs der Abfallmenge auf 150 % des Referenzfalls vorgestellt werden. Die Eingangsdaten des Jahres 2001 bleiben unverändert. Die Veränderungen der Abfallmenge stellen jeweils die von dem Automobilhersteller und den Zulieferunternehmen erwartete maximale positive als auch negative Abweichung von der Ist-Situation der Entsorgung dar.

Neben der alleinigen Veränderung der Abfallmengen wurden analog zum Basisszenario Szenarios mit erhöhten spezifischen Transportkosten berechnet. Hierdurch soll eine möglichst vollständige Abdeckung potenzieller zukünftiger Entwicklungen erreicht werden, um eventuell unterschiedliche Anpassungen des Systems an diese Rahmenbedingungen erfassen zu können.

#### **5.6.5.1 Auswirkungen verringerter Abfallmengen**

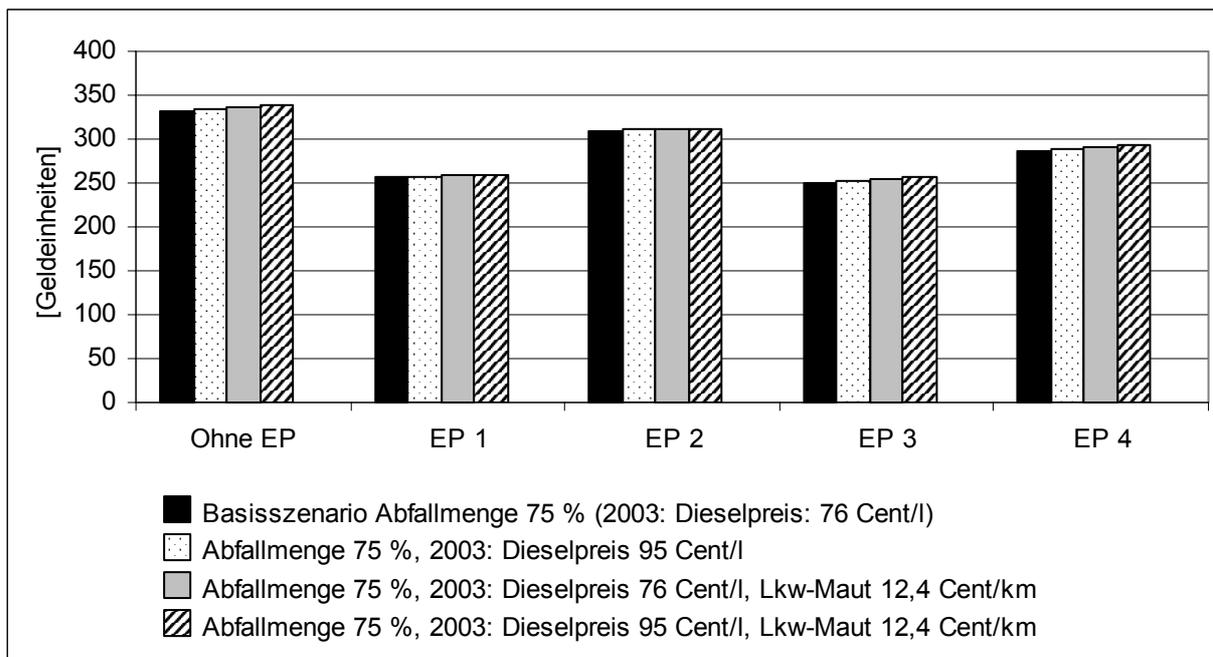
In allen vier Szenarios mit verringerten Abfallmengen führen die Errichtung und der Betrieb eines Entsorgerparks zu niedrigeren Gesamtausgaben als bei einer Beibehaltung der Ist-Situation (siehe Abbildung 32). Entsorgerpark 2 weist das geringste Einsparpotenzial der vier Entsorgerpark-Varianten auf, das in allen hier betrachteten Szenarios ca. 7 % gegenüber keinem Zubau einer Entsorgerpark-Variante beträgt. Das Einsparpotenzial von Entsorgerpark 4 ist demgegenüber leicht erhöht und liegt jeweils bei ca. 13 %. Auch bei einer Verringerung der zu entsorgenden Abfallmengen können durch die Entsorgerpark-Varianten 1 und 3 die größten Einsparpotenziale erzielt werden, weshalb sich nachstehende, detaillierte Ausführungen auf diese beiden Varianten beschränken.

Bei einer Reduktion der Abfallmenge im Jahr 2003 kann durch Entsorgerpark 3 das größte Kosteneinsparpotenzial erzielt werden (zwischen 24% und 25 %), wobei das Einsparpotenzial mit steigenden spezifischen Transportkosten im Jahr 2003 zunimmt. Die durch Entsorgerpark 1 erzielbare Kostenreduktion ist etwas geringer und steigt ebenfalls mit zunehmenden spezifischen Transportkosten von ca. 23 % auf etwa 24 % an. Gegenüber dem Basisszenario ergeben sich bei beiden Entsorgerpark-Varianten keine Veränderungen der Lagergröße und der Entsorgungspfade. Für Entsorgerpark 3 beträgt die kostenoptimale Lagergröße somit 12 Stellplätze für IBC sowie 6 Stellplätze für ARM und die Gesamtausgaben können durch folgende Veränderungen gegenüber der Ist-Situation reduziert werden:

- Schreddern der Kunststoffformabfälle im Entsorgerpark,
- Lagerung aller Abfallfraktionen im Entsorgerpark,
- Umschlagen der Abfallfraktionen Leim- und Klebemittel sowie Metallhydroxid-schlämme von IBC in ARM im Entsorgerpark,

- Direkttransporte der Abfallfraktionen Leim- und Klebmittel, Metallhydroxidschlämme, PPK, Kunststoffformteile und AZV vom Werksgelände des Automobilherstellers zu den Behandlungsanlagen.

Im Entsorgerpark 1 mit 12 Lagerstellplätzen für IBC und 9 Lagerstellplätzen für ARM werden des Weiteren die Abfallfraktionen PPK und AZV auf dem Werksgelände zu Ballen gepresst.

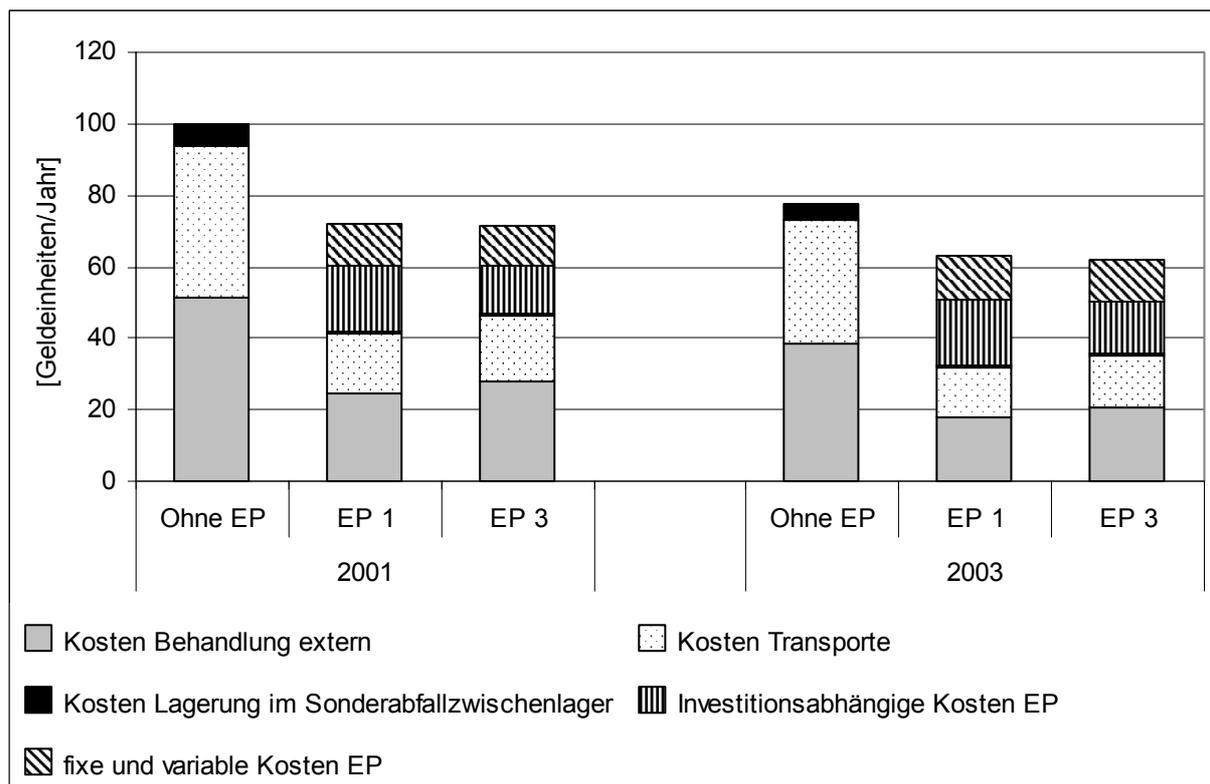


**Abbildung 32:** Gegenüberstellung der Gesamtausgaben des Basisszenarios und der Szenarios mit erhöhten Kraftstoffpreisen und/oder Berücksichtigung der Lkw-Maut bei einer Verringerung der zu entsorgenden Abfallmenge

Hinsichtlich der Entwicklung des Einsparpotenzials beider Entsorgerpark-Varianten zeigt sich, dass die Differenz zwischen Entsorgerpark 1 und 3 mit zunehmenden spezifischen Transportkosten abnimmt. Während bei unveränderten spezifischen Transportkosten die Differenz ca. 1,5 Prozentpunkte beträgt, sinkt diese bei Berücksichtigung der Lkw-Maut und erhöhtem Kraftstoffpreis auf ca. 0,5 Prozentpunkte. Dies resultiert aus der im Vergleich zu Entsorgerpark 3 deutlich höheren Reduktion der Transportkilometer und damit auch der Transportkosten im Fall von Entsorgerpark 1. Während Entsorgerpark 1 in allen vier hier dargestellten Szenarios eine Verringerung der Transportkilometer um etwa 0,8 Mio. km über den gesamten Betrachtungszeitraum ermöglicht, können durch Entsorgerpark 3 ca. 0,5 Mio. Transportkilometer vermieden werden.

Abbildung 33 enthält eine Gegenüberstellung der Kostenzusammensetzung für die Stützjahre 2001 und 2003 bei verringerter Abfallmenge und gegenüber dem Basisszenario unveränderten spezifischen Transportkosten. Ein Vergleich der Gesamtkosten in beiden Jahren zeigt, dass das Einsparpotenzial der Entsorgerpark-Varianten mit sinkender Abfallmenge abnimmt. Können im Jahr 2001 durch die Entsorgerparks jeweils ca. 30 % der Gesamtkosten eingespart werden, sinkt dieses

Einsparpotenzial im Jahr 2003 auf ca. 20 %: Zum einen sind die Kosten für die Entsorgerpark-Varianten in beiden Jahren nahezu konstant. Aufgrund der sinkenden Gesamtkosten durch die verringerte Abfallmenge erhöht sich der Anteil der Kosten für die Entsorgerparks von ca. 20 % (Entsorgerpark 3) bzw. 40 % (Entsorgerpark 1) im Jahr 2001 auf etwa 25 % bzw. 50 % im Jahr 2003. Zum anderen verringert sich das Einsparpotenzial bezüglich der Transporte, respektive der Transportkosten, welches für beide Entsorgerpark-Varianten im Jahr 2003 ca. 1 Prozentpunkt niedriger ist als im Jahr 2001. Dies resultiert bei beiden Entsorgerpark-Varianten aus der verringerten Anzahl an IBC, die auf dem Werksgelände des Automobilherstellers gelagert und anschließend zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers transportiert werden. Auch bei der verringerten Abfallmenge finden insgesamt zwei Transporte mit IBC statt, die zwar insgesamt im Vergleich zum Basisszenario schlechter ausgelastet sind, jedoch dieselben Kosten verursachen. In den Szenarios mit erhöhten spezifischen Transportkosten verstärkt sich dieser Aspekt leicht, sodass bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Lkw-Maut und einem angestiegenen Dieselpreis die Transportkostenreduktion beider Entsorgerpark-Varianten im Jahr 2003 ca. 1,5 Prozentpunkte unter dem Potenzial des Jahres 2001 liegt.



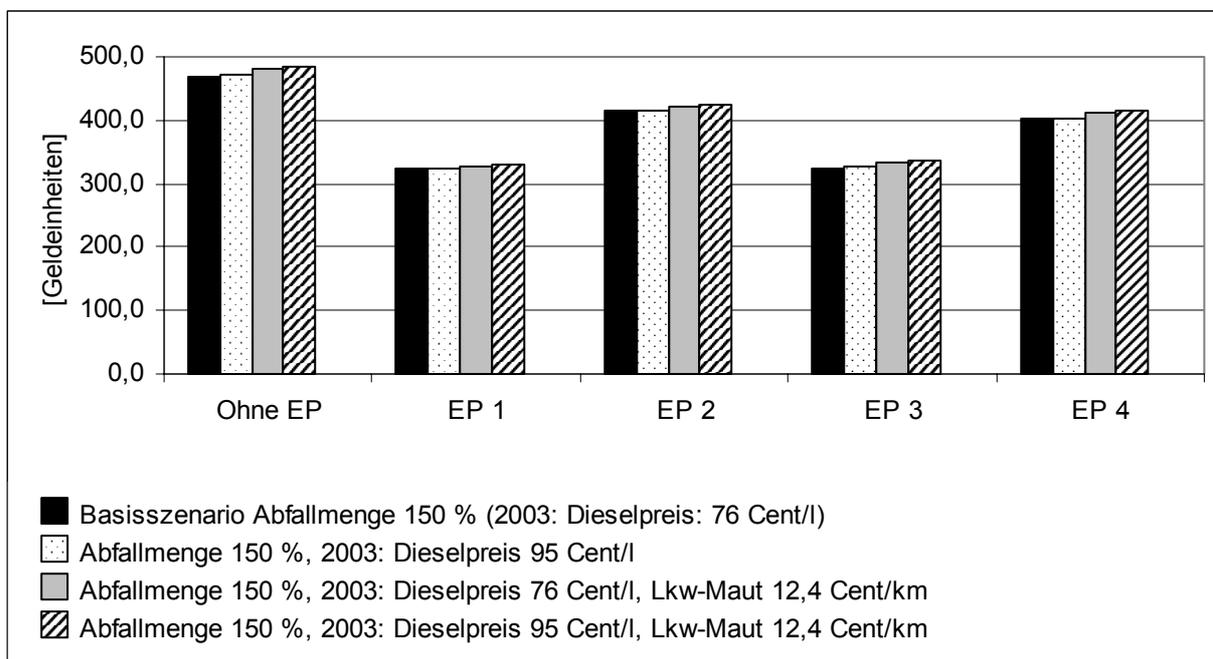
**Abbildung 33:** Kostenzusammensetzung bei einer Verringerung der zu entsorgenden Abfallmenge

Da Abfälle in IBC lediglich beim Automobilhersteller und nicht bei den Zulieferunternehmen anfallen, wird das Einsparpotenzial des Automobilherstellers durch die verringerte Abfallmenge stärker beeinflusst als das der Zulieferunternehmen. Hinsichtlich der direkt zurechenbaren Kosten der Zulieferunternehmen ergibt sich im

Jahr 2003 gegenüber dem Basisszenario keine Veränderung des Einsparpotenzials, während das Einsparpotenzial des Automobilherstellers im Jahr 2003 bei beiden Entsorgerpark-Varianten um ca. einen Prozentpunkt niedriger ist als im Jahr 2001.

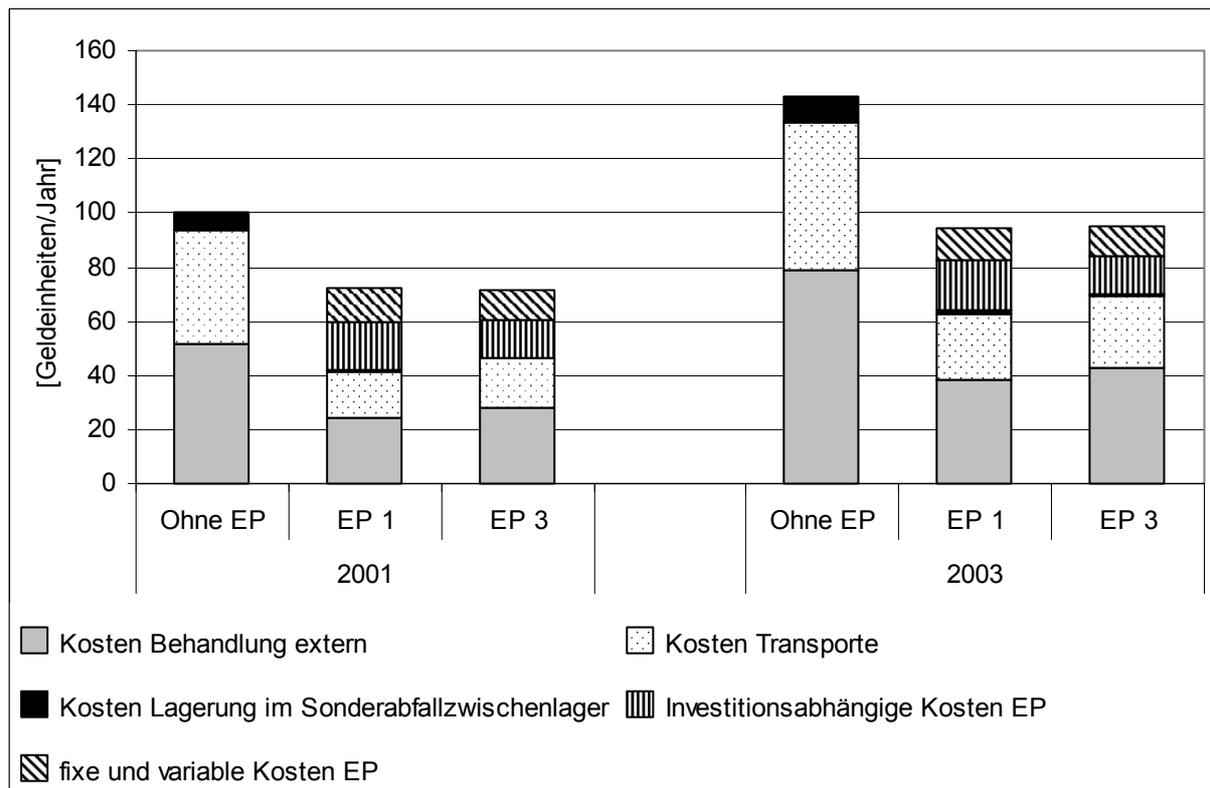
### 5.6.5.2 Auswirkungen erhöhter Abfallmengen

Auch bei einer Erhöhung der zu entsorgenden Abfallmenge im Jahr 2003 auf 150 % des Referenzfalls können durch alle vier Entsorgerpark-Varianten niedrigere Gesamtausgaben erzielt werden als ohne Zubau eines Entsorgerparks (siehe Abbildung 34). Unabhängig von den spezifischen Transportkosten im Jahr 2003 werden durch die Entsorgerpark-Varianten 1 und 3 deutlich niedrigere Gesamtausgaben als durch die Entsorgerparks 2 und 4 erzielt.



**Abbildung 34:** Gegenüberstellung der Gesamtausgaben des Basisszenarios und der Szenarios mit erhöhten Kraftstoffpreisen und/oder Berücksichtigung der Lkw-Maut bei einer Erhöhung der zu entsorgenden Abfallmenge

Entsorgerpark 1 mit 12 Lagerstellplätzen für IBC und 9 Stellplätzen für ARM stellt in allen vier Szenarios mit erhöhter Abfallmenge die kostenoptimale Lösung dar, wobei die Differenz zu Entsorgerpark 3 mit 12 Stellplätzen für IBC und 6 Stellplätzen für ARM von ca. 0,5 GE bei unveränderten spezifischen Transportkosten auf ca. 6 GE bei Einführung der Lkw-Maut und einem erhöhten Dieselpreis ansteigt. Wie auch hinsichtlich der Lagergröße ergeben sich in allen hier vorgestellten Szenarios keine Veränderungen hinsichtlich der Entsorgungspfade, d.h. die Reduktion der Gesamtausgaben wird auch bei erhöhter Abfallmenge durch Schreddern, Lagern, Umschlagen und Direkttransporte der Abfallarten bzw. im Falle von Entsorgerpark 1 zusätzlich durch Pressen auf dem Werksgelände erzielt.



**Abbildung 35:** Kostenzusammensetzung bei einer Erhöhung der zu entsorgenden Abfallmenge

Im Vergleich zum Jahr 2001 führt die erhöhte Abfallmenge im Jahr 2003 zu einer Vergrößerung der durch die Entsorgerpark-Varianten möglichen Kostenreduktion um ca. 5 Prozentpunkte auf etwa 35 %. (siehe Abbildung 35). Auch in diesen Szenarios kann die Erhöhung maßgeblich auf die beiden bereits im Rahmen der verringerten Abfallmengen dargestellten Aspekte zurückgeführt werden. Der Anteil der durch die Entsorgerparks verursachten Kosten an den jährlichen Gesamtkosten sinkt im Jahr 2003 aufgrund der erhöhten Gesamtkosten und die Transportkostenreduktion steigt, da eine vergleichsweise höhere Reduktion der Transportkilometer erzielt werden kann. Zwar sind infolge der unveränderten Lagergröße des IBC-Lagers bei einer auf 150 % des Referenzfalls erhöhten Abfallmenge drei Transporte mit IBC zum Sonderabfallzwischenlager im Jahr 2003 notwendig, jedoch beträgt die Auslastung dieser drei Transporte jeweils nahezu 100 %. Darüber hinaus erhöhen sich die Lagerkosten im Sonderabfallzwischenlager ohne Zubau eines Entsorgerparks im Jahr 2003 aufgrund der erhöhten Anzahl an IBC auf ca. 9 GE (2001 ca. 6 GE), die durch den Zubau eines Entsorgerparks nahezu vollständig entfallen.

Das Kosteneinsparpotenzial der Zulieferunternehmen und das des Automobilherstellers ist infolge der oben beschriebenen Zusammenhänge im Jahr 2003 ebenfalls leicht erhöht. Für die Zulieferunternehmen beträgt die Erhöhung ca. 0,5 Prozentpunkte verglichen mit dem Basisszenario, für den Automobilhersteller aufgrund der Abfälle in IBC ca. 1,5 %. Mit zunehmenden spezifischen Transportkosten steigen diese Einsparpotenziale, beispielsweise bei einem Anstieg des

Dieselpreises und Einführung der Lkw-Maut um weitere 0,5 Prozentpunkte für die Zulieferunternehmen und ca. um einen Prozentpunkt für den Automobilhersteller.

### **5.6.5.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse**

Ein Herabsetzen der Abfallmenge führt zur Verringerung der Einsparpotenziale, die durch das Entsorgerpark-Konzept erzielt werden können. Unabhängig von den spezifischen Transportkosten führt Entsorgerpark 3 zu niedrigeren Gesamtausgaben als Entsorgerpark 1, wobei die Vorteilhaftigkeit mit zunehmenden spezifischen Transportkosten abnimmt. Hinsichtlich der Entsorgungspfade sowie der Lagergröße entsprechen die Ergebnisse denen des Basisszenarios, sodass auch bei der hier betrachteten, von den Unternehmen maximal erwarteten Abfallverringerung auf 75 % des Referenzfalls keine (nachträgliche) Veränderung des Konzeptes notwendig ist.

Im Gegensatz zu einer Verringerung der Abfallmenge führt deren Erhöhung im Jahr 2003 auf 150 % des Referenzfalls zu einem Anstieg der durch das Entsorgerpark-Konzept erzielbaren Vorteile. Entsorgerpark 3 führt im Vergleich zu Entsorgerpark 1 zu höheren Gesamtausgaben und Transportkilometern, sodass unter diesen Rahmenbedingungen durch Entsorgerpark 1 hinsichtlich der Kriterien Ausgaben und Transportkilometer größere Vorteile erzielt werden können. Aus einer Betrachtung der Ergebnisse des Basisszenarios und der Szenarios mit veränderten Abfallmengen kann die Tendenz abgeleitet werden, dass mit zunehmender Abfallmenge die Einsparpotenziale von Entsorgerpark 1 stärker ansteigen als die von Entsorgerpark 3. Ein Anstieg der Transportkostensätze bewirkt eine zunehmende Vorteilhaftigkeit von Entsorgerpark 1 gegenüber Entsorgerpark 3, da die ökonomischen Vorteile der durch die Presse zusätzlich erzielbaren Transportreduktion ansteigen. Aus ökologischer Sicht ist Entsorgerpark 1 generell Entsorgerpark 3 vorzuziehen, da der Zubau von Entsorgerpark 1 zu einer größeren Reduktion der Transportkilometer führt als Entsorgerpark 3. Auch bei einer Erhöhung der Abfallmenge findet unabhängig von den spezifischen Transportkosten keine weitere Anpassung der Entsorgungspfade oder der Lagergrößen statt, sodass auch hier keine (nachträgliche) Veränderung des Konzeptes erforderlich ist.

## 6 Implementierungsbarrieren in den Fallstudien

Bereits in der Einleitung dieser Arbeit wurde auf die Vielzahl möglicher Barrieren hingewiesen, die im Rahmen von Innovationsprozessen auftreten können. Aufgrund der überbetrieblichen Komponente der in dieser Arbeit behandelten Systemgrenzenerweiterung sowie der jeweils zur Umsetzung dieser Konzepte notwendigen Investitionen ist auch bei der Implementierung eines Gemeinschaftsheizkraftwerks und eines Entsorgerparks mit der Existenz von Widerständen zu rechnen.

Im Rahmen dieses Kapitels werden deshalb die in Kapitel 2.5 allgemein dargestellten Barrieren aufgegriffen und ihre Bedeutung für Kooperationen zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks und eines Entsorgerparks diskutiert. Darüber hinaus werden Maßnahmen skizziert, die neben der techno-ökonomischen Analyse zur Überwindung der Barrieren beitragen können.

### 6.1 Überwindung personaler Barrieren in den Fallstudien

Hinsichtlich personaler Barrieren leistet die techno-ökonomische Analyse in beiden Fallstudien einen maßgeblichen Beitrag zur Überwindung kognitiver Barrieren, die in Form von Unwissenheit oder Unkenntnis der Entscheidungsträger auftreten. Die Modellergebnisse weisen sowohl die durch ein Gemeinschaftsheizkraftwerk bzw. einen Entsorgerpark erzielbaren Vorteile als auch die hierfür in den einzelnen Unternehmen notwendigen Veränderungen aus. Dies ist insbesondere für das innovative Konzept eines Entsorgerparks von Bedeutung, da hier sowohl das Konzept als auch dessen Potenziale in der Praxis weitgehend unbekannt sind.

Bezüglich kognitiver Barrieren aufgrund mangelnder fachspezifischer oder fachunspezifischer Fähigkeiten der beteiligten Personen können hier nur begrenzt Aussagen getroffen werden, da diese von den konkreten Personen in den einzelnen Unternehmen abhängen. Die Modellergebnisse zeigen jedoch deutlich auf, welche Veränderungen durchgeführt werden müssen, und somit lässt sich daraus auch ableiten, welche Anforderungen an die betroffenen Personen gestellt werden. Im Vorfeld der Kooperationsbildung können so bereits die Anforderungen an das Personal mit dessen Fähigkeiten verglichen werden und eventuell notwendige Veränderungen antizipiert werden.

Motivationale Barrieren betreffen die individuelle Zielsetzung der Entscheidungsträger, sodass auch diese in Abhängigkeit der tatsächlich betroffenen Personen in den einzelnen Unternehmen variieren. Die Überwindung dieser (und auch weiterer) Barrieren erfordert in den beteiligten Unternehmen Personen, die Innovationsprozesse aktiv und nachdrücklich unterstützen, so genannte Promotoren<sup>191</sup>. Im Bereich der motivationalen Barrieren kann der Einsatz hierarchischer Macht (Machtpromotor) notwendig sein, um den Veränderungsprozess zu fördern. Dieser Machtpromotor ist gekennzeichnet durch seine Position innerhalb des Unternehmens, die ihm ausreichende hierarchische Macht verleiht, um Opponenten zu sanktionieren und Innovationswilligen Schutz vor Sanktionen der Opponenten zu

---

<sup>191</sup> Zum Promotorenkonzept und dessen Weiterentwicklungen vgl. [Witte 1973], [Gemünden et al. 1995], [Hauschildt 1997], [Walter 1998] und [Folkerts 2002].

bieten. Demgegenüber zeichnet sich ein Fachpromotor dadurch aus, dass er einen Veränderungsprozess mittels objektspezifischen Fachwissens vorantreibt, indem er fachliche Argumente gegenüber Opponenten einsetzt. Insbesondere für diese Person stellen somit die Modellergebnisse der techno-ökonomischen Analyse eine Grundlage dar, aus der zusätzliche Argumente abgeleitet werden können.

Die Auslastung der betroffenen Personen durch andere Aufgaben als situative Barriere ist ebenfalls fallspezifisch. Inwieweit die Auslastung der Entscheidungsträger hemmend auf ein Projekt wirkt, steht jedoch in direktem Zusammenhang mit den durch die jeweiligen Veränderungen erzielbaren Vorteilen bzw. der Priorität, die einem Projekt zugemessen wird. Die in den Analysen ermittelten ökonomischen Vorteile können demnach auch hier einen Anreiz darstellen, dem Projekt eine höhere Priorität zuzuweisen und es so trotz einer bereits hohen Auslastung zu fördern.

## **6.2 Überwindung intra-organisationaler Barrieren in den Fallstudien**

Hinsichtlich der intra-organisationalen Barrieren wurde bereits in Kapitel 2.5.2 eine Abhängigkeit von der Unternehmensgröße konstatiert. Somit treten kommunikationsbezogene Barrieren in erster Linie beim Flächenversorger und dem Automobilhersteller auf, können jedoch auch in den kleineren beteiligten Unternehmen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Demgegenüber werden ressourcenbezogene Unternehmen verstärkt bei dem Generalentsorger, den Zulieferunternehmen sowie dem Stadtwerk erwartet. Die folgenden Ausführungen treffen jedoch in verallgemeinerter Form auf alle in den Analysen berücksichtigten Unternehmen zu.

Aufgrund des beim Automobilhersteller vorherrschenden stark hierarchisch geprägten Aufbaus der Organisation und der streng getrennten Funktionsbereiche wird insbesondere die fachübergreifende Zusammenarbeit erschwert. Diese ist jedoch zwingend notwendig, da bei der Errichtung und dem Betrieb eines Entsorgerparks u.a. die häufig in unterschiedlichen Abteilungen angesiedelten Aspekte Entsorgung, Zusammenarbeit mit Zulieferern, Genehmigungen und Finanzierung betroffen sind. In der Regel sind die genauen Zuständigkeiten bzw. Verantwortlichkeiten für einen funktionsbereichsübergreifenden Informationsaustausch in größeren Unternehmen festgelegt und auf Abteilungs- oder Bereichsebene angesiedelt. Aufgrund der Auslastung der entsprechenden Personen durch vielfältige weitere Aufgaben kann hieraus eine deutliche Verzögerung der Informationsweitergabe und damit auch der Umsetzung des Veränderungsprozesses resultieren. Ähnliches gilt auch für den Flächenversorger, da in diesen Unternehmen ebenfalls in der Regel die einzelnen Funktionsbereiche streng voneinander getrennt sind. Jedoch sind auch im Rahmen der Errichtung und des Betriebs eines Gemeinschaftsheizkraftwerks mehrere unterschiedliche Abteilungen aufgrund ihrer jeweiligen Aufgaben betroffen (z.B. Fahrplanerstellung, strategische Planung des Kraftwerksparks, Vertrieb, Zertifikatehandel). Somit sollte in allen beteiligten Unternehmen im Vorfeld der Umsetzung die vorherrschende Unternehmensstruktur auf ihre Flexibilität hinsichtlich funktionsbereichsübergreifender Zusammenarbeit überprüft werden. Ist diese nicht gegeben, müssen neue Informationswege geschaffen werden, um eine effiziente Umsetzung der jeweiligen Kooperation zu ermöglichen.

Aus der Trennung der Funktionsbereiche und der klaren Festlegung der Zuständigkeiten kann die erfolgreiche Umsetzung der betriebsübergreifenden Lösung darüber hinaus durch das Auftreten von Kompetenzstreitigkeiten zwischen den betroffenen Abteilungen behindert werden. Zur Umsetzung der Konzepte müssen in einzelnen Abteilungen Entscheidungen getroffen werden, die auch andere Abteilungen betreffen und von diesen in Frage gestellt bzw. gegebenenfalls nicht adäquat umgesetzt werden. Deshalb ist es notwendig, sowohl die verantwortlichen Personen als auch deren Entscheidungsbefugnisse bezüglich des Gesamtprojekts aber auch bezüglich der einzelnen Teilziele festzulegen. Bereits an dieser Stelle sei angemerkt, dass die Ausführungen hinsichtlich geeigneter Kommunikations- und Informationswege sowie der Regelung der Zuständigkeiten nicht auf die innerbetriebliche Ebene beschränkt sind, sondern darüber hinaus in besonderem Maße auf die betriebsübergreifende Ebene zutreffen.

Ressourcenbezogene Barrieren durch eine mangelnde Zuteilung personeller, materieller oder immaterieller Ressourcen entstehen u.a. aufgrund unklarer technischer oder ökonomischer Rahmenbedingungen. Durch die techno-ökonomische Analyse der beiden Fälle kann hierzu jedoch die benötigte Informationsgrundlage bereitgestellt werden, sodass diese Barrieren in allen Unternehmen weitgehend vermieden werden können. Darüber hinaus sind die ressourcenbezogenen Barrieren wie auch die situativen Barrieren direkt abhängig von den erwarteten ökonomischen Vorteilen und der dadurch der Veränderung zugemessenen Priorität. Da jedoch mittels der techno-ökonomischen Analyse des Entsorgerparks unter den gegebenen Rahmenbedingungen deutliche Einsparpotenziale für die Zulieferunternehmen ermittelt werden konnten, kann in diesen Unternehmen von einer angemessenen Ressourcenzuteilung ausgegangen werden. Dies trifft ebenfalls auf das Stadtwerk zu, da die techno-ökonomische Analyse auch für dieses Unternehmen deutliche Einsparpotenziale ergab<sup>192</sup>. Dennoch muss an dieser Stelle für alle Unternehmen angemerkt werden, dass eine Einschätzung dieser Barriere schwierig ist, da die Prioritätszuweisung nicht nur von den ökonomischen Kriterien abhängt. Beispielsweise kann auch die grundsätzliche Einschätzung des Generalentsorgers, inwieweit eine Dezentralisierung von Entsorgungsdienstleistungen zu einer Sicherung der Unternehmenszukunft beiträgt, zu unterschiedlichen Ressourcenzuteilungen führen.

### **6.3 Überwindung inter-organisationaler Barrieren in den Fallstudien**

Bezüglich der Kopplungsbarrieren im Rahmen betriebsübergreifender Konzepte konnte in beiden Fällen gezeigt werden, dass die Qualität, Quantität und Kontinuität der analysierten Stoffströme kein Hindernis für die Implementierung der analysierten Konzepte darstellt. Dies kann als zentrales Ergebnis der modellgestützten Analysen angesehen werden, da es sich hierbei um die wesentliche Voraussetzung für den Erfolg der Kooperationen handelt. Hinsichtlich der Implementierung eines Entsorgerparks ergaben die Analysen darüber hinaus, dass die vorhandenen

---

<sup>192</sup> Wie bereits im Rahmen der Ergebnisdarstellung erläutert wurde, liegt die Ausgabenerhöhung des Stadtwerks im Szenario mit Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels maßgeblich in dem angewendeten Verfahren zur Ausgabenaufteilung begründet.

Abfallströme ausreichen, um die Investitionen im typischen Zeitraum einer Baureihe von ca. fünf Jahren zu amortisieren. Dies führt zu einer Reduktion der Barrieren, da an vielen Standorten der Automobilhersteller weitgehende Planungssicherheit für den Zeitraum einer Baureihe vorherrscht, über diesen Zeitraum hinaus jedoch große Unsicherheiten bestehen. Dies betrifft u.a. die zukünftig an diesem Standort zu produzierende Baureihe sowie den Verbleib der Zulieferunternehmen im Zulieferpark und somit auch deren Abfallströme.

Bezüglich eines Gemeinschaftsheizkraftwerks muss von langen Amortisationsdauern ausgegangen werden, die jedoch mit den Amortisationsdauern stattdessen notwendiger einzelbetrieblicher Lösungen vergleichbar sind. Somit steht hier weniger die Kopplungsbarriere einer langen Amortisationsdauer im Vordergrund als vielmehr die Kooperationsbarriere in Form der langfristigen Abhängigkeit von dem Kooperationspartner. Aufgrund der ermittelten Kraftwerksparkstruktur betrifft dies im Wesentlichen das betrachtete Stadtwerk, während die Abhängigkeit des Flächenversorgers vom Gemeinschaftsheizkraftwerk als gering erachtet werden kann.

Die Angst vor einer Abhängigkeit vom Kooperationspartner sowie die weiteren Kooperationsbarrieren in Form von mangelndem Vertrauen und der notwendigen Offenlegung von sensiblen Unternehmensdaten werden stark von der gewählten Aufteilung des erzielten Mehrwerts sowie der konkreten Ausgestaltung der Kooperation beeinflusst. Aus diesem Grund werden in den folgenden beiden Unterkapiteln zum einen kurz die Grundzüge zur Ermittlung einer von allen Unternehmen akzeptierten Kostenaufteilung skizziert sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Ausgestaltungen der Zusammenarbeit am Beispiel des Entsorgerpark-Konzeptes dargestellt.

### 6.3.1 Kostenaufteilung

Im Rahmen eines Entsorgerparks sowie eines Gemeinschaftsheizkraftwerks wird anhand eines betriebsübergreifenden Investitionsprojektes versucht, eine Kostenreduktion zu erzielen. Im Rahmen solcher betriebsübergreifenden Konzepte muss ermittelt werden,

- wie solche Projekte in optimaler Weise realisiert werden können und
- wie die Kosten oder Erlöse zwischen den Kooperationspartnern aufgeteilt werden sollen (vgl. [Curiel 1997, S. VII]).

Das erste Problem bezieht sich auf die ausgabenminimale Ausgestaltung des betrachteten Gesamtsystems, wobei das entwickelte Modell LINK<sup>opt</sup> in beiden Fällen die Lösung dieses Problems ermöglicht. LINK<sup>opt</sup> stellt jeweils sicher, dass ein betriebsübergreifendes Optimum gefunden werden kann. Dieses Gesamtoptimum kann jedoch zu Lösungen führen, die aus Sicht eines einzelnen Unternehmens eine Verschlechterung darstellen<sup>193</sup>. Aus diesem Grund müssen bei der Ausgestaltung des

---

<sup>193</sup> Beispielsweise stellt die in Tabelle 31 präsentierte Lösung bei Zubau des steinkohlebefeuernten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> bezogen auf das Gesamtsystem die optimale Lösung dar. Aus Sicht des Stadtwerks führt diese Lösung jedoch zu einer Verschlechterung gegenüber den anderen Zubauoptionen bzw. gegenüber einer einzelbetrieblichen Lösung, da sich dessen Gesamtausgaben im globalen Optimum bei der gewählten Kostenaufteilung erhöhen.

Entsorgerparks und des Gemeinschaftsheizkraftwerks zusätzlich folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Jeder Kooperationspartner kann durch den Entsorgerpark bzw. das Gemeinschaftsheizkraftwerk seine Kosten reduzieren und erzielt somit einen Vorteil gegenüber der Ist-Situation.
- Alle beteiligten Unternehmen erachten die Rahmenbedingungen und Ausgestaltung des Entsorgerparks bzw. des Gemeinschaftsheizkraftwerks als sinnvoll, nachvollziehbar und gerecht.
- Kein Kooperationspartner besitzt einen Anreiz, die Kooperation zu verlassen, um ein ähnliches Vorhaben (allein oder mit anderen Partnern) zu realisieren.

Der dritte Aspekt zeigt, dass neben der Sicherstellung des Gewinns<sup>194</sup> auch strategische Gesichtspunkte berücksichtigt werden müssen, um eine langfristige Stabilität der Kooperation gewährleisten zu können. Verfahren, die alle drei Aspekte berücksichtigen, finden sich u.a. im Bereich der Spieltheorie, die ein abstraktes und formales Instrumentarium zur Analyse ökonomischer Zusammenhänge zur Entscheidungsunterstützung in einer komplexen Umwelt mit mehreren Entscheidungsträgern liefert. Die klassischen Lösungsansätze basieren auf Rationalitätskriterien (vgl. [Güth 1999, S. 1]), wobei Entscheidungsträger als rational bezeichnet werden, wenn sie ihre Zielfunktion hinsichtlich ihrer Einschätzung der Umwelt maximieren (vgl. [Wißler 1997, S. 26]). Durch die Anwendung spieltheoretischer Verfahren besteht die Möglichkeit, eine von allen Kooperationspartnern akzeptierte und respektierte Kostenaufteilung zu entwickeln und dadurch eine langfristig stabile Kooperation in den jeweiligen Fallstudien zu gewährleisten.

### 6.3.2 Finanzierung und Betrieb

Die vorangegangenen Ausführungen dieses Kapitels zeigen, dass Umsetzung und Erfolg der Gemeinschaftslösungen nicht nur von der Existenz eines Verbesserungspotenzials sondern von weiteren Faktoren abhängen. Die Art des Betreibermodells besitzt einen großen Einfluss auf den Erfolg, da die Akzeptanz der einzelnen Akteure maßgeblich durch die Kostenaufteilung und den Grad der Integration beeinflusst werden. Am Beispiel des Entsorgerpark-Konzeptes wird deshalb im Folgenden der Einfluss verschiedener Betreibermodelle auf das Konzept diskutiert. Die nachstehenden Ausführungen gelten in verallgemeinerter Form auch für eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks, weshalb auf eine zusätzliche Darstellung des Einflusses verschiedener Betreibermodelle auf dieses Konzept verzichtet wird.

Analog zu einem Zulieferpark besteht auch für einen Entsorgerpark die Möglichkeit diesen durch

- den Automobilhersteller,
- die Zulieferunternehmen,
- einen Dienstleister (bzw. dem Generalentsorger) oder

---

<sup>194</sup> Unter dem „Gewinn“ eines Unternehmens werden die gegenüber einem Referenzfall vermiedenen Kosten für die Entsorgung bzw. für die Strom- und Wärmebereitstellung verstanden.

- eine Betreibergesellschaft

zu finanzieren und betreiben (vgl. [Tietze-Stöckinger et al. 2003a]).

Wird der Entsorgerpark vom Automobilhersteller betrieben, gelten die Aussagen hinsichtlich Flexibilität, Transparenz, Aufwand und Konfliktpotenzial, die bezüglich des Betriebs eines Zulieferparks durch einen Automobilhersteller getroffen wurden. Wesentliche Vorteile liegen in der Unabhängigkeit des Automobilherstellers von seinem Entsorgungsunternehmen und der Möglichkeit, die durch den Entsorgerpark erzielbaren Einsparpotenziale nicht oder nur teilweise an die im Zulieferpark angesiedelten Unternehmen weiterzugeben. Aus Sicht des Generalentsorgers entstehen im Rahmen dieses Betreibermodells keine Neuinvestitionen, da diese durch den Automobilhersteller getätigt werden. Ein wesentlicher Nachteil für den Generalentsorger liegt in dessen Abhängigkeit vom Automobilhersteller. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, dass der Automobilhersteller die erzielbaren Kosteneinsparungen vollständig für sich beansprucht und somit die Nachteile in Form von Transparenz, Kontrollierbarkeit und geringerer Kapazitätsauslastung die Vorteile aus Sicht des Generalentsorgers übersteigen. Der Nachteil dieses Konzeptes liegt somit in erster Linie in einem sehr hohen Konfliktpotenzial, da die Einsparpotenziale maßgeblich von einer Beteiligung der Zulieferunternehmen und des Generalentsorgers abhängen, die Kosten- und Gewinnaufteilung jedoch vom Automobilhersteller vorgenommen wird.

Ein alleiniger Betrieb des Entsorgerparks durch die Zulieferunternehmen weist ebenfalls ein hohes Konfliktpotenzial auf, da hierdurch der Einfluss der Zulieferunternehmen auf den Automobilhersteller wächst. Dieses Konzept kann jedoch aufgrund der Besitzverhältnisse ausgeschlossen werden, da die Zulieferunternehmen auf dem Werksgelände des Automobilherstellers angesiedelt sind.

Wird der Entsorgerpark durch den Generalentsorger betrieben, ist der Dienstleister in diesem Fall im Gegensatz zum Zulieferpark-Betreibermodell kein unabhängiger Dritter, woraus ein gegenseitiges Abhängigkeitsverhältnis des Automobilherstellers und des Generalentsorgers entsteht. Der Generalentsorger ist darauf angewiesen, dass der Automobilhersteller ihn weiterhin mit der Entsorgung seiner Abfälle und der der Zulieferunternehmen beauftragt, da sich die getätigten Investitionen nur so amortisieren. Verpflichtet sich der Automobilhersteller über einen längeren Zeitraum dies zu tun, kann er nicht zu einem evtl. günstigeren Entsorgungsunternehmen wechseln. Der Vorteil dieses Modells liegt darin, dass das Know-how des Generalentsorgers genutzt werden kann und kein Personal des Automobilherstellers geschult werden muss. Die Kosten- und Gewinnaufteilung unterliegt bei diesem Betreibermodell dem Generalentsorger, für den sich theoretisch folgende Möglichkeiten ergeben:

- Keine Weitergabe der Einsparungen an den Automobilhersteller und dessen Zulieferunternehmen führt zu einem hohen Konfliktpotenzial und wahrscheinlich keiner Umsetzung der Kooperation.
- Kalkuliert der Generalentsorger niedrigere Entsorgungspreise sinkt zwar das Konfliktpotenzial, doch die Amortisationsdauer verlängert sich, da lediglich die

vom Generalentsorger angesetzte Marge zur Tilgung der Kredite zur Verfügung stehen.

Trotz der gegenseitigen Abhängigkeit ist dieses Betreibermodell dem Betrieb des Entsorgerparks durch den Automobilhersteller oder die Zulieferunternehmen aufgrund geringerer Konfliktpotenziale vorzuziehen.

Durch die Gründung einer Betreibergesellschaft kann das finanzielle Risiko eines Entsorgerparks auf die Kapitalgeber aufgeteilt werden. Als Kapitalgeber können u.a. der Automobilhersteller, der Generalentsorger und die auf dem Werksgelände angesiedelten Zulieferunternehmen fungieren. Der Entsorgerpark könnte auch in diesem Fall durch den Generalentsorger betrieben werden, um dessen fachspezifisches Wissen nutzen zu können. Die Beteiligung aller an das Entsorgerpark-Konzept angeschlossenen Unternehmen kann zu einer Erhöhung des Engagements führen. Dennoch muss auch hier die gegenseitige Abhängigkeit der Partner kritisch hinterfragt werden und Zusagen hinsichtlich Entsorgungskosten und Abfallmengen vertraglich fixiert werden. Dieses Modell besitzt das geringste Konfliktpotenzial, da die Kosten- und Gewinnaufteilung gemeinsam anhand klassischer oder spieltheoretischer Verfahren erarbeitet werden kann. Jedoch entstehen zusätzliche Kosten z.B. durch Vertragsverhandlungen und die Gründung einer Betreibergesellschaft, wodurch die Potenziale zur Kostenreduktion verringert werden.

#### **6.4 Überwindung struktureller Barrieren in den Fallstudien**

Hinsichtlich der strukturellen Barrieren ist eine Einschätzung der Auswirkungen bzw. ihrer Bedeutung in den Fallstudien problematisch, da diese Barrieren maßgeblich von der konkreten Ausgestaltung der Zusammenarbeit zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks bzw. eines Entsorgerparks abhängen. Insbesondere Dauer, Gegenstand und Intensität der sozio-kulturellen Barrieren gelten allgemein als schwer zu antizipieren, da sie aus dem Widerstand der nicht institutionalisierten Umwelt der Unternehmen entstehen. Zwar ist in beiden untersuchten Fällen kein direkter Grund für das Auftreten solcher Barrieren ersichtlich, jedoch kann das Vorhandensein bzw. das Entstehen einer solchen Barriere nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Um solche Barrieren zu überwinden, bedarf es einer intensiven Informationspolitik seitens der Unternehmen. Die Ergebnisse der modellgestützten techno-ökonomischen Analyse der Konzepte stellen hierfür eine wichtige Basis dar, insbesondere wenn die Untersuchung von einem unabhängigen Dritten durchgeführt wird.

Physische Barrieren wie eine mangelnde Infrastruktur oder eine mangelnde Anzahl potenzieller Partner sind im Rahmen des Entsorgerparks nicht zu erwarten. Die modellgestützte Analyse ergab, dass die Abfallströme der auf dem Werksgelände angesiedelten Unternehmen die Amortisation der Investitionen ermöglichen. Darüber hinaus ist aufgrund der Errichtung des Zulieferparks auf dem Werksgelände die notwendige Infrastruktur bereits vorhanden. Demgegenüber muss bei der Errichtung eines Gemeinschaftsheizkraftwerks die notwendige Infrastruktur geschaffen werden. Dies wurde jedoch bei der Festsetzung der spezifischen Investitionen der Kraftwerke berücksichtigt, sodass die Intensität dieser Barriere auch hier als gering angesehen werden kann. Des Weiteren ist eine genügend hohe Anzahl möglicher Partner

gegeben, da das Konzept auch auf eine Kooperation zwischen mehreren Stadtwerken oder Regionalversorgern übertragbar ist.

Zur Überwindung technologischer Barrieren, die sich u.a. in Zweifeln an der Funktionsfähigkeit, der Angepasstheit an die Umgebung und dem Zeitpunkt der Veränderungen äußern, können ebenfalls die Modellergebnisse der Analysen einen wertvollen Beitrag leisten. Sowohl in LINK<sup>opt</sup>-JPP als auch in LINK<sup>opt</sup>-WMP ist der Zeitpunkt der Veränderung Ergebnis der Optimierung. Darüber hinaus können aufgrund der technologie-fokussierten Abbildung der Systeme Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit des Entsorgerparks und des Gemeinschaftsheizkraftwerks gezogen werden. Barrieren in Form von Zweifeln über die Angepasstheit an die Umgebung hängen maßgeblich von der Wahl der Systemgrenzen ab. Im Rahmen der hier präsentierten Analysen wurden die Systemgrenzen jeweils so gezogen, dass Interdependenzen zwischen den Teilaspekten berücksichtigt wurden. So zeigen die Modellergebnisse, wie die Konzepte umzusetzen sind, damit sie sich in die vorherrschenden Gegebenheiten einfügen.

Rechtlich-politische Barrieren ergeben sich durch Genehmigungspflichten sowie Kartellvorschriften. Sowohl zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks als auch zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks bedarf es der Genehmigung seitens der Behörden. Dies besitzt in den beiden Fällen jedoch eine untergeordnete Bedeutung. Ein Gemeinschaftsheizkraftwerk wird anstelle des Zubaus eigener Anlagen installiert, sodass die Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb einer Energieumwandlungsanlage auch ohne die Kooperation notwendig wird. Demgegenüber wird durch einen Entsorgerpark keine Substitution bestehender oder zu errichtender Anlagen erreicht. Jedoch werden derzeit weitere Baumaßnahmen auf dem Werksgelände des Automobilherstellers geplant, sodass die Genehmigung für die Errichtung eines Entsorgerparks in die Genehmigung dieser Baumaßnahmen integriert werden kann.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 7.1 Das entwickelte Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP

Die techno-ökonomische Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks erfordert aufgrund der Interdependenzen zwischen der Systemausbauplanung sowie der Einsatzplanung eines Kraftwerksparks den Einsatz eines geeigneten Instrumentariums. Darüber hinaus ergeben sich für alle Energieversorgungsunternehmen neue Planungsanforderungen durch die Beschränkung des bisher freien Produktionsfaktors Emissionsrecht. Diese zusätzlichen Anforderungen bringen die Notwendigkeit mit sich, auch das bestehende Analyseinstrumentarium so anzupassen bzw. weiterzuentwickeln, dass es den Entscheidungsträgern eine belastbare Informationsbasis zur Strategieentwicklung bietet.

Die Diskussion bestehender Energiemodelle zeigte auf, dass sich vornehmlich Energiesystemmodelle mit einer simultanen Kraftwerksausbau- und Einsatzplanung zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks eignen. Jedoch wurde der CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel in diesen Modellen aufgrund fehlender Konkretisierung von politischer Seite bisher nicht auf Anlagen- bzw. Unternehmensebene integriert.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell LINK<sup>opt</sup>-JPP baut auf den Energiesystemmodellen der PERSEUS-Modellfamilie auf, wurde allerdings u.a. anhand der nun vorliegenden Konkretisierung um den Planungsbereich der Bewirtschaftung des Produktionsfaktors Emissionsrecht erweitert. Der mehrperiodige Optimierungsansatz sowie die technologie-fokussierte Abbildung der einzelnen Anlagen der zu analysierenden Kraftwerksparks gestattet die Ableitung langfristiger Entwicklungsstrategien der einzelnen Unternehmen unter Berücksichtigung alternativer, exogen vorgegebener Rahmenbedingungen. Die modelltechnische Integration des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels auf Basis des deutschen Allokationsplans in das mathematische Gleichungssystem des zugrunde liegenden Energiesystemmodells ermöglicht eine integrierte Optimierung und Analyse der interdependenten Planungsprobleme Kraftwerksausbau- und Einsatzplanung sowie Emissionsrechtehandel. Wechselwirkungen zwischen diesen Bereichen und deren Einfluss auf eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks lassen sich so in den Modellergebnissen auf Anlagenebene nachvollziehen.

Die gewählte Modellstruktur gestattet dem Modellanwender die Entwicklung sowohl der energiewirtschaftlichen Rahmenannahmen als auch des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels flexibel zu variieren. Somit bietet das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Es ist hierbei nicht auf die Analyse der Vorteilhaftigkeit einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks beschränkt, sondern kann allgemein zur Entwicklung einer Strategie für (einzelne) Energieversorgungsunternehmen eingesetzt werden. In erster Linie kann LINK<sup>opt</sup>-JPP auch hier im Rahmen von Szenarioanalysen zur Ableitung robuster Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen unter der Berücksichtigung sich ändernder energiewirtschaftlicher oder politischer Rahmenbedin-

gungen genutzt werden. Aufgrund des Detaillierungsgrads der Abbildung können die Auswirkungen unterschiedlicher Entwicklungen für das Gemeinschaftsheizkraftwerk bzw. für die betrachteten Energieversorgungsunternehmen quantifiziert werden.

Neben diesen Einsatzmöglichkeiten sind jedoch auch die Grenzen eines solchen technologie-fokussierten Energiemodells kritisch zu diskutieren. Aufgrund der gewählten Systemgrenzen bildet das Modell lediglich einen Ausschnitt des deutschen Energiesystems ab. Gegenseitige Wechselwirkungen z.B. bezüglich der Strompreise an der European Energy Exchange oder der sich einstellenden Zertifikatpreise können nicht erfasst werden. Somit sind die Ergebnisse grundsätzlich auf ihre Plausibilität bezüglich des Stromaustauschs mit Einheiten außerhalb des betrachteten Systems sowie der vom Markt bezogenen bzw. dort verkauften Emissionsrechte zu hinterfragen. In diesem Zusammenhang stellen die Ergebnisse höher aggregierter Modelle einen wichtigen Input für das entwickelte Modell dar. Demgegenüber können jedoch auch die Ergebnisse von LINK<sup>opt</sup>-JPP bei der Ermittlung der Eingangsdaten für höher aggregierte Modelle einen wertvollen Beitrag leisten.

## **7.2 Schlussfolgerungen aus der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks**

### **7.2.1 Zur Entwicklung des Systems ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels**

Die Analysen aller berechneten Szenarios ergaben, dass durch eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks die Gesamtausgaben jeweils reduziert werden können. Die größten Kosteneinsparpotenziale lassen sich jeweils durch ein steinkohlebefeuetes Heizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> installierter Leistung erzielen. Das steinkohlebefeuetete Gemeinschaftsheizkraftwerk mit 700 MW<sub>elektr</sub> wird in allen Szenarios in der Periode 2013 bis 2017 zugebaut, und ab diesem Zeitpunkt werden nahezu konstant ca. 5 TWh<sub>elektr</sub>/a im Gemeinschaftsheizkraftwerk produziert.

Bezogen auf die Investitionen dieses Heizkraftwerks ergeben sich im Basisszenario bei einer vereinfachenden Kostenaufteilung anhand des Verhältnisses des eingesetzten Brennstoffs ca. 80 % der Investitionen für den Flächenversorger und ca. 20 % der Investitionen für das betrachtete Stadtwerk. Hierdurch verringern sich die gesamten Investitionen des Stadtwerks im Betrachtungszeitraum auf ca. 60 % im Vergleich zur einzelbetrieblichen Lösung, während die des Flächenversorgers nahezu konstant sind. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Flächenversorger im Betrachtungszeitraum ca. 14 GW<sub>elektr</sub> neue Kapazitäten installiert, was ca. 60 % seiner Kapazitäten zu Beginn des Betrachtungszeitraums entspricht. Dementsprechend kann der Beitrag des Stadtwerks zu einem Kraftwerk keine signifikante Auswirkung auf die gesamten Investitionen bzw. die Gesamtausgaben des Flächenversorgers besitzen.

## 7.2.2 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels

Bezüglich der zukünftigen Ausgestaltung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels, insbesondere der Zuteilung der Emissionsrechte, bestehen große Unsicherheiten, da die Geltungsdauer des bisher vorliegenden Gesetzes auf die Startperiode 2005 bis 2007 beschränkt ist. Somit mussten im Rahmen der Szenariodefinition hinsichtlich der zukünftigen Ausgestaltung der Zuteilung der Emissionsrechte Annahmen getroffen werden, unter denen die Ergebnisse berechnet wurden.

Unter diesen getroffenen Rahmenannahmen führen ebenfalls alle analysierten Gemeinschaftsheizkraftwerke zu niedrigeren Gesamtausgaben als bei getrennter Strategie. Darüber hinaus steigen die durch die Gemeinschaftsheizkraftwerke erzielbaren Einsparpotenziale an, da sich aufgrund der hierdurch veränderten Kraftwerksparkstruktur zusätzliche Erlöse durch den Verkauf von Emissionsrechten ergeben. Analog zu allen anderen analysierten Szenarios wird im Szenario mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel durch einen Zubau des steinkohlebefeuerten Gemeinschaftsheizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> in der Periode 2013 die größte Reduktion der Gesamtausgaben erzielt.

Eine Analyse der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt, dass diese bei Berücksichtigung des Emissionsrechtehandels weniger stark ansteigen als im Basisszenario. Jedoch ergibt die Gegenüberstellung, dass die Emissionsminderung nicht mit der der Zertifikatpreisermittlung zugrunde gelegten Emissionsminderung übereinstimmt. Dies kann u.a. auf die unterschiedlichen Modellansätze zurückgeführt werden. Die von [Enzensberger 2003] ermittelte Emissionsminderung in Deutschland und der damit einhergehende Verkauf von Emissionsrechten ergibt sich primär durch eine deutliche Erhöhung der Stromimporte aus anderen Ländern und einem dadurch bedingten Rückgang der Stromproduktion in Deutschland. Demgegenüber ist in LINK<sup>opt</sup>-JPP der Stromfremdbezug nur in gewissen Grenzen zugelassen. Darüber hinaus ergibt sich hier eine Kollision mit den Zuteilungsregeln des deutschen Allokationsplans, da für eine Emissionsminderung durch deutliche Verringerung der Stromproduktion bzw. eine Stilllegung von Anlagen die Emissionsrechte zurückzugeben sind. Die sich durch den Emissionsrechtehandel ergebenden Veränderungen gegenüber dem Basisszenario sollten somit als Trends und nicht als konkrete Ergebnisse aufgefasst werden. Dies ist jedoch nicht auf eine mangelnde Funktionalität von LINK<sup>opt</sup>-JPP zurückzuführen, sondern vielmehr auf die aufgrund der Aktualität der Fragestellung vorherrschenden Unsicherheiten.

## 7.3 Das entwickelte Modell LINK<sup>opt</sup>-WMP

Ebenso wie bei der Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks wurden auch im Bereich der industriellen Entsorgung Interdependenzen identifiziert, die den Einsatz eines geeigneten Instrumentariums erfordern. Insbesondere die Veränderung der physikalischen Eigenschaften der Abfälle im Entsorgerpark führt zur Notwendigkeit, die Bereiche der Transporte, Lagerung und Behandlung der Abfälle simultan zu betrachten.

Eine Diskussion verschiedener Modellansätze aus relevanten Bereichen zeigt Defizite auf, die die Notwendigkeit einer Modellneu- bzw. -weiterentwicklung deutlich machen. Modelle, die zur Abbildung einzelner entsorgungslogistischer Prozesse herangezogen werden können, weisen zwar den notwendigen Detaillierungsgrad der Abbildung auf, vermögen jedoch nicht die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Planungsbereichen zu berücksichtigen. Demgegenüber sind Modelle zur simultanen Analyse mehrerer entsorgungslogistischer Prozesse durch einen hohen Aggregationsgrad gekennzeichnet und werden somit den gegebenen Modellanforderungen nicht gerecht. Insbesondere konnte kein Modell identifiziert werden, das sämtliche relevanten entsorgungslogistischen Prozesse bei einem ausreichend hohen Detaillierungsgrad abbildet, um die bestehenden Interdependenzen adäquat berücksichtigen zu können. Dies gilt vornehmlich für die Abbildung der Entsorgungstransporte, die in diesen Modellen in der Regel durch kontinuierliche Flüsse zwischen zwei Standorten modelliert werden.

LINK<sup>opt</sup>-WMP stellt einen mehrperiodigen, gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsansatz dar, der sämtliche relevanten Aspekte mit einem ausreichenden Detaillierungsgrad berücksichtigt. Simultan werden in dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modell die Kapazitäten auf dem Werksgelände zuzubauender Behandlungsanlagen und deren Einlastung, die benötigten Lagerstellplätze in Abhängigkeit der Behältergröße und die Entsorgungstransporte optimiert. In den Modellergebnissen können hierdurch die wechselseitigen Einflüsse der entsorgungslogistischen Prozesse nachvollzogen werden. Wie bereits im Rahmen der Schlussfolgerungen hinsichtlich LINK<sup>opt</sup>-JPP dargestellt wurde, gestattet die gewählte Modellstruktur der LINK<sup>opt</sup>-Modelle im Rahmen von Szenarioanalysen eine flexible Variation der exogen vorgegebenen Parameter. Im Einsatzbereich von LINK<sup>opt</sup>-WMP sind dies u.a. die jährlich anfallende Abfallmenge, deren zeitlicher Verlauf sowie die spezifischen Transportkosten. Die Einsatzfähigkeit in der Praxis sowie die Qualität der Ergebnisse wurden im Rahmen der Analyse eines konkreten Anwendungsfalls in Zusammenarbeit mit Entscheidungsträgern aus unterschiedlichen Unternehmen überprüft.

Grenzen von LINK<sup>opt</sup>-WMP ergeben sich in erster Linie aus der Wahl der Systemgrenzen. Abfälle unterschiedlicher Abfallerzeuger werden im Rahmen der Entsorgung an unterschiedlichen Stellen des Systems zusammengefasst und zu neuen Transportchargen zusammengestellt. Ein Versuch dieses System vollständig mit demselben Detaillierungsgrad zu erfassen, würde zu einer deutlich weitergehenden Ausdehnung der Systemgrenzen führen. Hierzu müsste jedoch der Detaillierungsgrad der Abbildung stark verringert werden, was jedoch der Zielsetzung dieser Arbeit entgegensteht. Dennoch können auch in diesem Fall die Ergebnisse des Modells LINK<sup>opt</sup>-WMP als Eingangsdaten für höher aggregierte Modelle dienen.

## **7.4 Schlussfolgerungen aus der techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks**

### **7.4.1 Schlussfolgerungen aus der Analyse eines realen Systems**

Durch die Integration der auf dem Werksgelände angesiedelten Zulieferunternehmen in das Entsorgerpark-Konzept, erhöht sich die Abfallmenge der Abfallfraktionen gemischte Abfälle zur Verwertung und Kunststoffformabfälle signifikant. Dies führt zu einer Reduktion der Entsorgungskosten durch alle Entsorgerpark-Varianten bei einer gleichzeitigen Verringerung der Transportkilometer, sodass die gemeinsame Abfallentsorgung mit den Abfällen des Automobilherstellers Bestandteil der zukünftigen Mietverträge für die Zulieferunternehmen sein sollte.

Die Ergebnisse aller Szenarios zeigen, dass durch eine gemeinsame Entsorgung des betrachteten Automobilherstellers und den auf dem Werksgelände angesiedelten Zulieferunternehmen alle Entsorgerpark-Varianten zu geringeren Gesamtausgaben führen als die Entsorgung der Abfälle ohne Entsorgerpark. Im Basisszenario stellt Entsorgerpark 3 mit einem Schredder für Kunststoffformabfälle und einem Lager mit 12 Stellplätzen für IBC und 6 Stellplätzen für ARM die optimale Lösung dar, wobei durch Entsorgerpark 1 ähnlich hohe Kosteneinsparpotenziale erzielt werden können. Werden im Basisszenario sowohl Kosten als auch Transportkilometer zur Auswahl der Entsorgerpark-Variante herangezogen, stellt Entsorgerpark 1 die beste Lösung dar, da durch Schredder, Presse und Lager mit 12 Stellplätzen für IBC und 9 Stellplätzen für ARM auf dem Werksgelände die Gesamtausgaben um ca. 30 % (Entsorgerpark 3 ebenfalls ca. 30 %) und die Transportkilometer um ca. 60 % (Entsorgerpark 3 ca. 40 %) gesenkt werden können.

Für das im Rahmen dieser Arbeit analysierte reale System konnten durch das Entsorgerpark-Konzept in allen Szenarios ökologische und ökonomische Vorteile nachgewiesen werden. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen bzw. deren erwarteten Veränderungen wird der Zubau von Entsorgerpark 1 mit

- einem Schredder für Kunststoffformabfälle,
- einer Presse für Papier/Pappe/Kartonagen und gemischte Abfälle zur Verwertung und
- einem Lager mit 12 Stellplätzen für IBC und 6 Stellplätzen für ARM empfohlen.

Darüber hinaus sollte folgende Veränderung der Entsorgungspfade vorgenommen werden, da diese in allen Szenarios als beste Lösung für die jeweilige Abfallart ermittelt werden konnten:

- Kunststoffformabfälle: Schreddern und Lagern auf dem Werksgelände und Direkttransport zur Behandlungsanlage,
- Papier/Pappe/Kartonagen und gemischte Abfälle zur Verwertung: Pressen und Lagern auf dem Werksgelände und Direkttransporte zur jeweiligen Behandlungsanlage,
- Leim- und Klebemittel sowie Metallhydroxidschlämme: Umschlagen und Lagern auf dem Werksgelände sowie Direkttransporte zur jeweiligen Behandlungsanlage.

- Kunststoffbehältnisse/Metallbehältnisse mit schädlichen Restinhalten, ölverschmutzte Betriebsmittel, Altlacke/Altfarben und Lösemittelgemische: Lagerung in IBC auf dem Werksgelände und Transport zum Sonderabfallzwischenlager des Generalentsorgers.

Aufgrund der Beteiligung von 12 Unternehmen und bereits bestehender Abhängigkeiten existiert in diesem System ein hohes Konfliktpotenzial. Dies resultiert insbesondere aus der notwendigen Offenlegung der Abfalldaten sowie der möglichen zusätzlichen Einflussnahme des Automobilherstellers auf die im Zulieferpark angesiedelten Unternehmen. Da der Betrieb des Entsorgerparks durch eine Betreiber-gesellschaft das geringste Konfliktpotenzial verglichen mit anderen Betreibermodellen aufweist, stellt sich dies als adäquate Lösung hinsichtlich Finanzierung, Betrieb und Kostenaufteilung dar.

#### **7.4.2 Übertragbarkeit eines Entsorgerparks**

Aus den allgemeinen Überlegungen zur Entwicklung effizienter Entsorgungslösungen und der Ausgestaltung eines Entsorgerparks sowie den konkreten Modell-ergebnissen lassen sich folgende wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Übertragung des Entsorgerpark-Konzeptes ableiten:

- Die Behandlung der im Produktionsprozess anfallenden und zu entsorgenden Abfälle auf dem Werksgelände muss aus ökologischer, transportpolitischer und ökonomischer Sicht vorteilhaft sein. Hierzu bedarf es der Definition von Stoffen, die in einem Entsorgerpark physisch oder zeitlich verändert werden können. Dieser Ansatzpunkt spiegelt sich bei Zulieferparks darin wieder, dass nur solche Lieferanten mit den entsprechenden Zulieferprodukten in einem Zulieferpark angesiedelt werden, aus deren Ansiedlung ein entsprechend großer Nutzen gezogen werden kann.
- Es muss die Bereitschaft vorhanden sein, in neue Entsorgungsanlagen zu investieren. Darüber hinaus müssen die anfallenden Abfälle eine ausreichende Quantität und Qualität besitzen, um die Installation von Entsorgungsanlagen zu rechtfertigen. Dieser Ansatz bezieht sich nicht nur auf die Errichtung von Entsorgerparks, sondern spielt auch bei der Errichtung von Industrieparks und Verwertungsnetzwerken eine wichtige Rolle.
- Die erforderlichen Kenntnisse der vorherrschenden Stoff- und Abfallströme für das Funktionieren von Verwertungsnetzwerken werden auch zum Betrieb eines Entsorgerparks benötigt. Demzufolge müssen bei der Errichtung eines Entsorgerparks die Produktionsunternehmen bereit sein, dem Entsorger Informationen zu den Abfallströmen zur Verfügung zu stellen. Gegebenenfalls muss auch die Bereitschaft vorhanden sein, Eingriffe in den Produktionsablauf hinzunehmen, um die Vorteilhaftigkeit eines Entsorgerparks zu erreichen.
- Bereits bei der Planung der Zusammenarbeit zwischen Abfallerzeuger und Entsorger ist eine klare Abgrenzung untereinander von entscheidender Bedeutung, indem festgelegt wird, wer welche Produktionsfaktoren zur Verfügung stellt. Außerdem sind die Aufgabenbereiche der Beteiligten eindeutig zu definieren und voneinander abzugrenzen, um das Konfliktpotenzial dieser

Kooperation zu reduzieren. In diesem Zusammenhang bedarf es auch der Definition des Eigentumsübergangs der Abfälle.

Trotz der zahlreichen Voraussetzungen ist die Übertragbarkeit des Entsorgerpark-Konzeptes auf andere Unternehmen gegeben. Hinsichtlich der Implementierung des Konzeptes für Einzelunternehmen muss v.a. das Vorhandensein einer ausreichenden Abfallmenge kritisch hinterfragt werden. Da insbesondere Abfallarten, bei denen eine Volumenreduktion auf dem Werksgelände erzielt werden kann, zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen führen, muss diesen besondere Beachtung bei der Analyse zukommen.

Eine Kooperation mehrerer Produktionsunternehmen stellt eine Möglichkeit dar, die zu entsorgende Abfallmenge derart zu erhöhen, dass eine Behandlung auf dem Werksgelände neben ökologischen auch zu ökonomischen Vorteilen führt. Demgegenüber resultiert hieraus eine Erhöhung der Barrieren, die der Umsetzung des Konzeptes entgegenstehen sowie ein Anstieg möglicher Interessenskonflikte. Aus diesem Grund sind bei einer Kooperation weiterführende Überlegungen hinsichtlich der Auswahl des Betreibermodells und der Kostenaufteilung erforderlich.

## **7.5 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Überwindung von Implementierungsbarrieren**

In beiden untersuchten Fällen wird zur Realisierung der Kosteneinsparpotenziale eine Veränderung des wirtschaftlichen Verhaltens in allen beteiligten Unternehmen notwendig. Somit ist das Auftreten von Barrieren zu erwarten, die zu einer erfolgreichen Implementierung der Gemeinschaftsanlagen überwunden werden müssen. Die Intensität dieser Widerstände im Vorfeld des Veränderungsprozesses abzuschätzen gestaltet sich schwierig, da viele dieser Barrieren maßgeblich von den beteiligten Individuen abhängen. Die modellgestützte, techno-ökonomische Analyse der Veränderungen kann zur Überwindung dieser Barrieren beitragen, indem sie den Befürwortern der Veränderungen fundierte Argumente liefert. Insbesondere konnte in beiden Fällen gezeigt werden, dass durch ein Gemeinschaftsheizkraftwerk bzw. einen Entsorgerpark unter unterschiedlichen Entwicklungen der Rahmenbedingungen ökonomische Vorteile erzielt werden können.

Im Bereich der personalen Barrieren leistet die techno-ökonomische Analyse einen maßgeblichen Beitrag zur Überwindung kognitiver Barrieren, die infolge mangelnder Kenntnisse der Entscheidungsträger hinsichtlich der Existenz bzw. der Potenziale der Konzepte entstehen. Die Ergebnisse können des Weiteren den Abbau motivationaler Widerstände unterstützen, da den Opponenten sowohl die notwendigen Veränderungen als auch deren Auswirkungen dargelegt werden können. In diesem Zusammenhang steht auch der Beitrag der modellgestützten Analyse hinsichtlich der Überwindung inter-organisationaler Barrieren, die durch fehlende Kommunikation oder mangelnde Ressourcenzuteilung entstehen. Indem die Kosteneinsparpotenziale eines Entsorgerparks sowie eines Gemeinschaftsheizkraftwerks dargestellt und plausibel belegt werden können, unterstützt dies die Innovationswilligen, andere Entscheidungsträger von den Vorteilen dieser Konzepte zu überzeugen. Hierdurch wird erreicht, dass den Projekten eine angemessene

Priorität zugewiesen und sie bei der Vergabe von Ressourcen entsprechend berücksichtigt werden.

Bezüglich der inter-organisationalen Barrieren kann durch die techno-ökonomische Analyse gezeigt werden, dass zu koppelnden Stoffströme die Voraussetzungen hinsichtlich Qualität, Quantität und Kontinuität erfüllen. Des Weiteren liefert die modellgestützte Analyse auch zur Überwindung dieser Barrieren die notwendige Informationsgrundlage. Diese wird insbesondere bei der Ermittlung einer von allen beteiligten Parteien akzeptierten Kostenaufteilung als auch bei der konkreten Ausgestaltung der Konzepte hinsichtlich Finanzierung und Betrieb benötigt. Die Nachvollziehbarkeit der notwendigen Veränderungen sowie der positiven und negativen Auswirkungen auf Unternehmens- bzw. Anlagenebene sind hierfür jeweils ein wertvoller Input.

Durch die Modellergebnisse kann somit die Informationsgrundlage maßgeblich verbessert werden, wodurch sämtliche Barrieren überwunden werden können. Promotoren eines Entsorgerparks bzw. eines Gemeinschaftsheizkraftwerks in den jeweiligen Unternehmen können aus den Modellergebnissen Argumente ableiten, um Opponenten von der Vorteilhaftigkeit der Veränderung zu überzeugen.

## **7.6 Ausblick auf zukünftige Forschungsvorhaben**

Im Folgenden werden kurz weitere Anwendungsgebiete für die entwickelten Modelle LINK<sup>opt</sup>-JPP und LINK<sup>opt</sup>-WMP aufgezeigt. Darüber hinaus wird weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Systemgrenzenerweiterung dargelegt und in diesem Rahmen eine Erweiterung des Entsorgerpark-Konzeptes skizziert.

### **7.6.1 Weitere Anwendungsgebiete für die entwickelten Modelle**

#### **7.6.1.1 LINK<sup>opt</sup>-JPP**

Durch eine Anpassung der zugrundegelegten Datenbasis kann LINK<sup>opt</sup>-JPP zur strategischen Planung bei einzelnen Energieversorgungsunternehmen eingesetzt werden. Dies stellt weniger eine Modellerweiterung als eine Eingrenzung auf unternehmensinterne Fragestellungen dar. Durch die erstmalige Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels auf Unternehmensebene in Form einer detaillierten Abbildung des Allokationsplans mit den entsprechenden Zuteilungsregeln bietet LINK<sup>opt</sup>-JPP für sämtliche Unternehmen im Bereich der Energiewirtschaft die Möglichkeit, die Auswirkungen durch die Beschränkung des Produktionsfaktors Emissionsrecht auf den eigenen Kraftwerkspark zu analysieren. Insbesondere im Rahmen von Szenarioanalysen mit unterschiedlichen Rahmenannahmen hinsichtlich der Fortschreibung der Zuteilungsregeln können langfristig stabile Strategien für die Systemausbauplanung unter den neuen Rahmenbedingungen ermittelt werden.

Neben dem Einsatz in Planungsabteilungen von Energieversorgungsunternehmen kann LINK<sup>opt</sup>-JPP im Bereich der Politikberatung eingesetzt werden. Zwar stehen hier in der Regel makro-ökonomisch geprägte Fragestellungen im Vordergrund, jedoch können mit Hilfe des entwickelten Modells die Auswirkungen unterschiedlicher politischer Vorgaben nachvollzogen werden. Beispielsweise ermöglicht LINK<sup>opt</sup>-JPP

die Ermittlung des Ausmaßes, in dem unterschiedliche Unternehmen von verschiedenen Maßnahmen im Bereich des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels betroffen sind. In diesem Zusammenhang ist auch eine Modellerweiterung auf das gesamtdeutsche Energieversorgungssystem von Interesse, um mögliche Veränderungen frühzeitig antizipieren zu können und die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Systems am gesamteuropäischen System messen zu können.

### **7.6.1.2 LINK<sup>opt</sup>-WMP**

Analog zu LINK<sup>opt</sup>-JPP kann auch LINK<sup>opt</sup>-WMP auf einzelbetriebliche Fragestellungen angewendet werden. Hierbei stellt LINK<sup>opt</sup>-WMP insbesondere für Entsorgungsunternehmen ein Instrument zur Bewertung gegenwärtiger Strukturen und zur Ermittlung notwendiger Anpassungen infolge sich ändernder Rahmenbedingungen dar. Kritisch hinterfragt werden muss bei der Anwendung auf Entsorgungsunternehmen jedoch, inwieweit bei einer Betrachtung des Gesamtsystems aufgrund der dadurch resultierenden Modellgröße in angemessener Rechenzeit eine optimale Lösung ermitteln kann. Somit ist hier die Anwendung auf Teilaspekte des Systems zu präferieren, z.B. inwieweit zusätzliche Zwischenlager oder Umschlagstationen innerhalb eines Entsorgungsgebietes vorteilhaft sind. Die Ergebnisse dieser Analyse können dann in den entsprechenden Planungsabteilungen im Kontext der angestrebten Unternehmensentwicklung bewertet werden.

Des Weiteren ist zu überprüfen, inwieweit das entwickelte Modell auch im Bereich der betrieblichen Versorgung eingesetzt werden kann. Ebenso wie im Bereich der Entsorgung setzt sich dieses System aus Transport, Produktion (entsprechend der Abfallbehandlung), Lagerung und Umschlag zusammen. Ein bedeutender Unterschied hierbei ist jedoch, dass das Modell nicht mehr über den Input gesteuert wird, sondern über eine exogen vorgegebene, zu befriedigende Nachfrage (wie beispielsweise in LINK<sup>opt</sup>-JPP). Jedoch ist auch hier kritisch zu hinterfragen, bis zu welcher Größe des zu analysierenden Systems LINK<sup>opt</sup>-WMP eingesetzt werden kann, da im Bereich der Produktion in Abhängigkeit der betrachteten Branche eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse zu berücksichtigen sind. Wie auch im Rahmen der Entsorgung könnten jedoch die Ergebnisse hinsichtlich einzelner Teilsysteme in höher aggregierte Modelle zur Optimierung des Gesamtsystems eingehen.

### **7.6.2 Weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Systemgrenzenerweiterung**

Aus der Diskussion bezüglich der Überwindung der Implementierungsbarrieren wird ersichtlich, dass die techno-ökonomische Analyse betriebsübergreifender Konzepte nicht ausreicht, um eine Umsetzung ökonomisch vorteilhafter Konzepte in die Praxis gewährleisten zu können. Insbesondere bedarf es darüber hinausgehender Forschungsarbeiten hinsichtlich der Entwicklung einer von allen Unternehmen akzeptierten Kostenaufteilung sowie eines ebenfalls von allen Beteiligten getragenen Konzeptes zur Finanzierung und zum Betrieb der Gemeinschaftsanlagen.

Weiterer Forschungsbedarf existiert hinsichtlich der durch eine betriebliche Systemgrenzenerweiterung erzielbaren Kosteneinsparpotenziale in anderen Anwendungsbereichen. Einleitend wurde in dieser Arbeit bereits erläutert, dass zur Analyse die

Bereiche Energieversorgung und Abfallentsorgung ausgewählt wurden, da die Energieströme eine hohe Homogenität aufweisen, bzw. da aufgrund der in vielen Unternehmen gleichen Abfallfraktionen (z.B. die Abfallfraktion Papier/Pappe/Kartonagen) die Heterogenität der Abfallströme bei der Kopplung weitgehend vernachlässigt werden kann. Bei der Übertragung der betrieblichen Systemgrenzenerweiterung auf andere Anwendungsgebiete ist deshalb zu prüfen, inwieweit zusätzliche Anlagen und Prozesse notwendig sind, um eine Kopplung der Stoffströme unterschiedlicher Unternehmen zu ermöglichen. Insbesondere sind in diesem Fall die durch die Systemgrenzenerweiterung erzielbaren Kosteneinsparungen den zusätzlichen Kosten für die Errichtung neuer Anlagen oder für die Umstellung von Prozessen gegenüberzustellen.

Aufgrund der Anforderungen hinsichtlich einer ausreichenden Quantität der zu koppelnden Stoffströme sind Systemgrenzenerweiterungen insbesondere in Gebieten mit hoher Dichte von Industrie oder Gewerbe zu analysieren. Sämtliche Typen von Industrie- und Gewerbeparks stellen somit viel versprechende Untersuchungsgebiete für Systemgrenzenerweiterungen dar. Aufgrund des in diesen Parks vorhandenen zentralen Betreibers von Gemeinschaftseinrichtungen ist hier ein zentraler Ansprechpartner bzw. Verantwortlicher für unternehmensübergreifende Aspekte vorhanden. Demgegenüber stellen Industrie- und Gewerbegebiete ebenfalls Standorte mit hoher Unternehmensdichte dar, jedoch ohne zentralen Ansprechpartner. Hierdurch entstehen gegenüber Industrie- und Gewerbeparks zusätzliche Barrieren, die im Vorfeld einer Systemgrenzenerweiterung überwunden werden müssen.

In Industrieparks-/gebieten können die Systemgrenzen beispielsweise durch die Installation eines Entsorgerparks erweitert werden. Darüber hinaus ist in diesen Gebieten die Vorteilhaftigkeit einer Erweiterung des Entsorgerpark-Konzepts zu analysieren. Neben einer Zusammenführung der Abfallströme können weitere Aktivitäten gebündelt werden, die bisher von jedem Unternehmen eigenständig organisiert wurden (z.B. Belieferung, soziale Einrichtungen). Die Bündelung von Stoffströmen eröffnet beispielsweise im Bereich des Wareneinkaufs die Möglichkeit, günstigere Konditionen aufgrund der größeren Menge im Vergleich zu den Einzelbestellungen zu erzielen (vgl. hierzu auch [Schmedding et al. 2004]).

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird analysiert, inwieweit durch eine Erweiterung von betrieblichen Systemgrenzen Kosteneinsparpotenziale realisiert werden können. Von besonderem Interesse sind gemeinschaftliche Investitionsprojekte, da hierdurch Größendegressionseffekte erreicht werden können, welche die von den Unternehmen bei getrennten Strategien erzielbaren Effekte übersteigen. Einer überbetrieblichen Zusammenarbeit steht jedoch in der Regel eine Vielzahl von Barrieren entgegen, die zu einer erfolgreichen Umsetzung überwunden werden müssen. Eine bedeutende Barriere stellt in diesem Zusammenhang eine nicht zusammenpassende Qualität von zu koppelnden Energie- und Stoffströmen dar. Daher stellt diese Arbeit auf die Bereiche Energieversorgung und Abfallentsorgung ab. Dabei ist Elektrizität ein weitgehend homogenes Produkt, weshalb bei einer überbetrieblichen Betrachtung keine wesentliche Veränderung der Produktionsprozesse erforderlich ist. Demgegenüber sind die in Produktionsunternehmen entstehenden Abfälle heterogen. Allerdings fallen bestimmte Abfallfraktionen wie Papier/Pappe/Kartonagen gleichermaßen in unterschiedlichen Unternehmen an, weshalb eine überbetriebliche Zusammenführung von Stoffströmen ohne wesentliche Veränderungen der vorhergehenden Prozesse nahe liegt.

Der Energiesektor unterliegt derzeit starken Veränderungen aufgrund politischer Vorgaben. Die Liberalisierung der Energiemärkte führte zu einer grundlegenden Veränderung des Wettbewerbsumfelds der Unternehmen, darüber hinaus entstehen zusätzliche Planungsunsicherheiten durch den im Jahr 2005 beginnenden Handel mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechten. Energieversorgungsunternehmen versuchen deshalb, derzeit Investitionen zu vermeiden, die jedoch aufgrund der Altersstruktur des deutschen Kraftwerksparks zwingend notwendig sind. Unter diesen Rahmenbedingungen ist eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks eine sinnvolle Alternative zu einzelbetrieblichen Lösungen. In Abhängigkeit der Vertragsgestaltung kann hierdurch das Investitionsrisiko der einzelnen Unternehmen reduziert werden, indem das Kraftwerk durch mehrere Unternehmen finanziert wird. Für Stadtwerke stellen solche Gemeinschaftsanlagen darüber hinaus in der Regel die einzige Möglichkeit dar, von Großtechnologien zu profitieren. Demgegenüber können Flächenversorger üblicherweise nur in Zusammenarbeit mit Stadtwerken Strom in den ökonomisch und ökologisch vorteilhaften Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen erzeugen, da die Wärmenachfrage der Endkunden meist durch Stadtwerke gedeckt wird.

Im Bereich der Entsorgungswirtschaft führte die Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes zwar aufgrund der Vorgabe einer vorrangigen Verwertung der Abfälle zu einer umweltverträglicheren Behandlung der Abfälle, jedoch erhöhten sich hierdurch auch die zur Entsorgung der Abfälle notwendigen Entsorgungstransporte. Durch das Konzept der unmittelbaren Nähe, welches u.a. bereits die Basis für die Errichtung von Zulieferparks bildet, können die zur Versorgung der Produktionsunternehmen erforderlichen Transporte deutlich reduziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb analysiert, inwieweit durch eine Übertragung dieses Konzeptes auf die Entsorgungsseite Kosteneinsparpotenziale realisiert werden können, indem

Entsorgungsunternehmen in einem so genannten Entsorgerpark auf dem Werksgelände angesiedelt werden und dort bereits eine (Vor-) Behandlung der Abfälle stattfindet.

Die Zielsetzung dieser Arbeit liegt zum einen in der techno-ökonomischen Analyse der Kosteneinsparpotenziale von Gemeinschaftsheizkraftwerken und Entsorgerparks anhand von Fallstudien und zum anderen in der Entwicklung einer hierfür geeigneten Methodik. Darüber hinaus wird aufgezeigt, inwieweit die techno-ökonomische Analyse einen Beitrag zur Überwindung von Barrieren gegen die Bildung von Kooperationen leisten kann. Des Weiteren ist ein Ziel dieser Arbeit, anhand der Ergebnisse der Fallstudie die Voraussetzungen für eine Übertragung des Entsorgerpark-Konzeptes auf andere Unternehmen zu analysieren.

Die Diskussion bestehender Energiemodelle zeigt auf, dass primär Energiesystemmodelle mit einer simultanen Kraftwerksausbau- und Einsatzplanung zur techno-ökonomischen Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks geeignet sind. Unter anderem aufgrund einer bisher fehlenden Konkretisierung von politischer Seite wurde der CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel in diesen Modellen nicht auf Anlagen- bzw. Unternehmensebene integriert. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte gemischt-ganzzahlige, lineare Optimiermodell LINK<sup>opt</sup>-JPP baut auf den Energiesystemmodellen der PERSEUS-Modellfamilie auf, wurde allerdings um den Planungsbereich der Bewirtschaftung des Produktionsfaktors Emissionsrecht auf Unternehmensebene erweitert. Der mehrperiodige Optimierungsansatz sowie die technologie-fokussierte Abbildung der einzelnen Anlagen der zu analysierenden Kraftwerksparks gestatten die Ableitung langfristiger Entwicklungsstrategien für die einzelnen Unternehmen unter Berücksichtigung alternativer, exogen vorgegebener Rahmenbedingungen. Die modelltechnische Integration des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels auf der Basis des deutschen Allokationsplans in das mathematische Gleichungssystem des zugrunde liegenden Energiesystemmodells ermöglicht eine integrierte Optimierung und Analyse der interdependenten Planungsprobleme Kraftwerksausbau- und Einsatzplanung sowie Emissionsrechtehandel. Wechselwirkungen zwischen diesen Bereichen und deren Einfluss auf eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks lassen sich so in den Modellergebnissen auf Anlagenebene nachvollziehen.

Im Rahmen von Szenarioanalysen wurde LINK<sup>opt</sup>-JPP zur Analyse der Kosteneinsparpotenziale durch eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks zwischen einem fiktiven Stadtwerk und einem fiktiven Flächenversorger eingesetzt. Nachstehend sind die wichtigsten Ergebnisse der Modellanwendung zusammengefasst:

- In sämtlichen analysierten Szenarios konnten unter den gegebenen Rahmenbedingungen durch eine Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks Kosteneinsparpotenziale ermittelt werden. Die optimale Lösung stellt der Zubau eines steinkohlebefeuernden Heizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> installierter Leistung dar.

- Bei einer vereinfachenden Aufteilung der Investitionen für das Gemeinschaftsheizkraftwerk anhand des Verhältnisses des zur Stromproduktion des Flächenversorgers sowie des zu Strom- und Wärmeproduktion des Stadtwerks benötigten Brennstoffes entfallen im Basisszenario ca. 80 % der Investitionen auf den Flächenversorger und ca. 20 % der Investitionen auf das Stadtwerk. Ab dem Zeitpunkt des Zubaus werden unabhängig von den vorgenommenen Parametervariationen in den einzelnen Szenarios im Gemeinschaftsheizkraftwerk jährlich ca. 5 TWh Strom produziert.
- Der Zubau des steinkohlebefeueten Heizkraftwerks mit 700 MW<sub>elektr</sub> installierter Leistung besitzt einen deutlichen Einfluss auf die Entwicklung des Kraftwerksparks des Stadtwerks und dessen Einlastung. Ohne das Gemeinschaftsheizkraftwerk produziert das Stadtwerk im Basisszenario in den einzelnen Perioden zwischen 60 und 90 % des Stroms und 100 % der nachgefragten Wärme in eigenen Anlagen. Bei Zubau des Gemeinschaftsheizkraftwerks sinkt der Eigenanteil der Stromerzeugung auf ca. 25 %, die eigene Wärmeproduktion sinkt auf ca. 65 %.
- Durch die Einführung des CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandels werden gegenüber dem Basisszenario ca. 10 Mio. t weniger CO<sub>2</sub> emittiert. Dieser Rückgang wird in erster Linie durch eine Verringerung der Stromproduktion aus Braunkohle sowie einem Anstieg der Stromproduktion aus Erdgas erreicht.
- Während der Zubau sowie die Einlastung des Gemeinschaftsheizkraftwerks durch den CO<sub>2</sub>-Emissionsrechtehandel nicht beeinflusst werden, ändert sich das Verhältnis des Strombezugs des Stadtwerks und des Flächenversorgers aus dem Gemeinschaftsheizkraftwerk. Aufgrund der veränderten Kraftwerksparkstruktur des Flächenversorgers (insbesondere infolge des Wegfalls der Braunkohlekraftwerke) steigt der Eigenanteil der Stromerzeugung des Stadtwerks deutlich an.

Am Beispiel eines realen Systems bestehend aus einem Automobilhersteller, seinen auf dem Werksgelände angesiedelten Zulieferunternehmen und dem Generalentsorger wurden unterschiedliche Varianten eines Entsorgerparks generiert und die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen analysiert.

Analog zur Diskussion der Energiemodelle zur Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks wurden auch im Bereich der Stoffstrommodelle Defizite identifiziert, die eine Modellneu- bzw. -weiterentwicklung erfordern. Diese Defizite betreffen insbesondere eine fehlende Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Planungsbereichen bzw. einen zu hohen Aggregationsgrad für die techno-ökonomische Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Entsorgerparks. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modellvariante LINK<sup>opt</sup>-WMP stellt einen mehrperiodigen, gemischt-ganzzahligen linearen Optimieransatz dar, der sämtliche relevanten Aspekte berücksichtigt. Simultan werden die Kapazitäten auf dem Werksgelände zuzubauender Behandlungsanlagen und deren Einlastung, die benötigten Lagerstellplätze in Abhängigkeit der Behältergröße und die Entsorgungstransporte betrachtet und optimiert. In den Modellergebnissen können hierdurch die

wechselseitigen Einflüsse der entsorgungslogistischen Prozesse nachvollzogen werden.

Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse der Analysen zusammengefasst:

- Die Errichtung und der Betrieb eines Entsorgerparks auf dem Werksgelände des Automobilherstellers ermöglicht in allen analysierten Szenarios eine Reduktion der Gesamtausgaben.
- Zwei der vier analysierten Entsorgerpark-Varianten weisen hierbei ein vergleichbares Reduktionspotenzial auf, wobei das Potenzial zur Verringerung der Transportkilometer deutlich voneinander abweicht. Werden im Basisszenario sowohl Kosten als auch Transportkilometer zur Auswahl der Entsorgerpark-Variante herangezogen, stellt ein Entsorgerpark mit Schredder, Presse und Lager (Entsorgerpark 1) auf dem Werksgelände die beste Lösung dar, da hierdurch die Gesamtausgaben um ca. 30 % (Entsorgerpark 3 bestehend aus Schredder und Lager ebenfalls ca. 30 %) und die Transportkilometer um ca. 60 % (Entsorgerpark 3 ca. 40 %) gesenkt werden können.
- Eine Erhöhung der spezifischen Transportkosten führt zu einer Erhöhung des Kosteneinsparpotenzials von Entsorgerpark 1 gegenüber Entsorgerpark 3, wobei im Vergleich zum Basisszenario die Transportkosten nicht weiter reduziert werden.
- Bei einer Verringerung der Abfallmenge gegenüber dem Basisszenario stellt Entsorgerpark 3 die kostenminimale Lösung dar, während bei einer Erhöhung der Abfallmenge die Kosteneinsparpotenziale von Entsorgerpark 1 die Einsparpotenziale von Entsorgerpark 3 übersteigen. Darüber hinaus deuten die Ergebnisse dieser Szenarios auf eine Abhängigkeit des Transportreduktionspotenzials von der zu entsorgenden Abfallmenge hin, da dieses bei steigender Abfallmenge zu- und bei sinkender Abfallmenge abnimmt.

Aufgrund der dargestellten Zusammenhänge und der erwarteten Veränderung der Rahmenbedingungen scheint der Zubau von Entsorgerpark 1 und eine Anpassung der Entsorgungspfade der analysierten Abfallfraktionen entsprechend den Modellergebnissen für das System vorteilhaft.

Sowohl im Rahmen einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks als auch eines Entsorgerparks werden zur Realisierung der Kosteneinsparpotenziale Veränderungen in allen beteiligten Unternehmen notwendig. Somit ist das Auftreten von Barrieren zu erwarten, die zu einer erfolgreichen Implementierung der Gemeinschaftslösung überwunden werden müssen. Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Instrumentarium trägt zur Überwindung der Implementierungsbarrieren bei, indem die Informationsgrundlage der Entscheidungsträger verbessert wird.

## Literaturverzeichnis

- [Abel 1992] Abel, J.: Kooperationen als Wettbewerbsstrategien für Software-Unternehmen. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1992.
- [Abels 1980] Abels, H.-W.: Organisation von Kooperation kleiner und mittlerer Unternehmen mittels Ausgliederung. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1980.
- [Aberle 1992] Aberle, G.: Wettbewerbstheorie und Wettbewerbspolitik. Stuttgart: Kohlhammer, 1992.
- [ABMG 2002] Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen mit schweren Nutzfahrzeugen (ABMG), 2002.
- [Abou Najm et al. 2002] Abou Najm, M.; El-Fadel, M.; Ayoub, G.; El-Taha, M.; Al-Awar, F.: An optimisation model for regional integrated solid waste management I. Model formulation, in: Waste Management & Research, 20 (2002), H. 1, S. 37-45.
- [ADAC 2004] ADAC: Entwicklung der jährlichen Durchschnittspreise für Kraftstoffe in Deutschland [http://www.adac.de/Auto\\_Motorrad/Kraftstoffe\\_Umwelt/Kraftstoffmarkt/Die\\_Entwicklung\\_der\\_jaehrlichen\\_Durchschnittspreise\\_fuer\\_Kraftstoffe/default.asp?ComponentID=4252&SourcePageID=10100#0](http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Kraftstoffe_Umwelt/Kraftstoffmarkt/Die_Entwicklung_der_jaehrlichen_Durchschnittspreise_fuer_Kraftstoffe/default.asp?ComponentID=4252&SourcePageID=10100#0) (10.08.2004).
- [Anderson et al. 2002] Anderson, E.; Xu, H.: Supply Function Equilibrium in Electricity Spot Markets with Contracts and Price Caps, Paper, Australian Graduate School of Management, 2002.
- [Angelelli et al. 2002] Angelelli, E.; Speranza, M. G.: The application of a vehicle routing model to a waste-collection problem: two case studies, in: Journal of the Operational Research Society, 53 (2002), H. 9, S. 944-952.
- [Ardone 1999] Ardone, A.: Entwicklung einzelstaatlicher und multinationaler Treibhausgasminderungsstrategien für die Bundesrepublik Deutschland mit Hilfe von optimierenden Energie- und Stoffflußmodellen. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1999.
- [Arntzen et al. 1995] Arntzen, B. C.; Brown, G. G.; Harrison, T. P.; Trafton, L. L.: Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation, in: Interfaces, 25 (1995), H. 1, S. 69-93.
- [Aslaksen et al. 1992] Aslaksen, E.; Belcher, R.: Systems Engineering. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.
- [ATW 2002] N.N.: Kernenergie: Europa-Report, in: Internationale Zeitschrift für Kernenergie, 47 (2002), H. 10, S. 632-649.
- [Aulinger 1996] Aulinger, A.: (Ko-)Operation Ökologie. Marburg: Metropolis, 1996.
- [AVV 2001] Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis - AVV - Abfallverzeichnis-Verordnung, 2001.
- [Balling 1998] Balling, R.: Kooperationen - Strategische Allianzen, Netzwerke, Joint Ventures und andere Organisationsformen zwischenbetrieblicher Zusammenarbeiten in Theorie und Praxis. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1998.
- [Barth 2002] Barth, H.: Lieferantenparks im Umfeld der Automobilindustrie, in: Logistik für Unternehmen, 2002 (2002), H. 7-8, S. 52-55.
- [Bartsch et al. 2002] Bartsch, M.; Röhling, A.; Salje, P.; Scholz, U.: Stromwirtschaft - Ein Praxishandbuch. Köln: Heymanns, 2002.

- [Bauer et al. 1995] Bauer, H. H.; Bayón, T.: Zur Relevanz prinzipal-agenten-theoretischer Aussagen für das Konsumgütermarketing, in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 47 (1995), H. 35, S. 159-178.
- [Beaver 1993] Beaver, R.: Structural comparison of the models in EMF 12, in: Energy Policy, 21 (1993), H. 3, S. 238-248.
- [Belz et al. 2003] Belz, C.; Reinhold, M.: Kooperationen im Vertrieb, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 751-772.
- [Bemmann et al. 2003] Bemmann, U.; Müller, A.: Contracting Handbuch 2003. Köln: Deutscher Wirtschaftsdienst, 2003.
- [Benisch 1973] Benisch, W.: Kooperationsfibel. Bergisch Gladbach: Heider, 1973.
- [Benisch 1981] Benisch, W.: Kooperationserleichterung und Wettbewerb, in: Cox, H.; Jens, U.; Markert, K.: Handbuch des Wettbewerbs. München: Vahlen, 1981, S. 399-419.
- [Berger et al. 1996] Berger, R. T.; Coullard, C. R.; Daskin, M. S.: Berger, R. T.; Coullard, C. R.; Daskin, M. S.: Modeling and solving location routing-problems with route lengths constraints - Working Paper. Lehigh University: Department of Industrial and Systems Engineering, 1996.
- [Bergthaler et al. 2001] Bergthaler, W.; Wolfslehner, E.: Das Recht der Abfallwirtschaft. Wien: Manzsche Verlags- und Universitätsbuchhandlung, 2001.
- [Bertazzi et al. 1999] Bertazzi, L.; Speranza, M. G.: Models and Algorithms for the Minimization of Inventory and Transportation Costs: A Survey, in: Speranza, M. G.; Stähly, P.: New Trends in Distribution Logistics. Berlin: Springer, 1999, S. 137-157.
- [Bilitewski et al. 1994] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.: Abfallwirtschaft. Berlin: Springer, 1994.
- [BlmschG 1990] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BimSchG), 1990.
- [Bitzer et al. 1995] Bitzer, A.; Greif, H.; Rammelsberg, R.; Schulte, H.; Siebuhr, W.: Virtuelle Industrieparks. Konzept einer Wertschöpfungspartnerschaft in der Automobil-Zulieferindustrie, in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 44 (1995), H. 3, S. 122-125.
- [Blaß 1989] Blaß, E.: Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Methoden - Zielsuche - Lösungsauswahl. Frankfurt a. M.: Sauerländer, 1989.
- [BMU 2000] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000. Berlin: BMU Referat für Öffentlichkeitsarbeit, 2000.
- [Bolle 1992] Bolle, F.: Supply function equilibria and the danger of tacit collusion, in: Energy Economics, 14 (1992), H. 2, S. 94-102.
- [Bossello et al. 1998] Bossello, F.; Carraro, C.; Kemfert, C.: Advances of Climate Modelling for Policy Analysis. Working paper Nota di Lavoro 82.98, Fondazione Eni Enrico Mattei: 1998.
- [Bower et al. 2000] Bower, J.; Bunn, D.: A Model-based Comparison of Pool and Bilateral Market Mechanisms for Electricity Trading, in: Energy Journal, 21 (2000), H. 3, S. 1-29.
- [Bower et al. 2001] Bower, J.; Bunn, D.; Wattendrup, C.: A model-based analysis of strategic consolidation in the German electricity industry, in: Energy Policy, 29 (2001), H. 12, S. 987-1005.

- [Bradach et al. 1989] Bradach, J. L.; Eccles, R. G.: Price, authority, and trust: from ideal types to plural forms, in: *Annual Review of Sociology*, 15 (1989), H. 9, S. 96-118.
- [Bratschitsch 1968] Bratschitsch, R.: Möglichkeiten der Unternehmenskooperation - Allgemeiner Teil, in: *Bundeskammer der gewerblichen Wirtschaft: Grundlagen der Unternehmenskooperation, Teil 1: betriebliche Fragen*. Wien: Bundeskammer der gewerblichen Wirtschaft, 1968, S. 11-39.
- [Brauer 1989] Brauer, U.: Die vertikale Kooperation als Absatzwegstrategie für Herstellerunternehmen. München: Herbert Utz, 1989.
- [Brenck 1996] Brenck, A.: Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - Bewertung und Marktwirtschaftliche Alternativen, in: Ewers, H. J.: *Entsorgungslogistik - Auswirkungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes auf logistische Entscheidungen*. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht, 1996, S. 7-70.
- [Brooke et al. 1998] Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A.; Raman, R.: *GAMS A User's Guide*. Washington: GAMS Development Corporation, 1998.
- [Bruns 1997] Bruns, K.: Analyse und Beurteilung von Entsorgungslogistiksystemen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1997.
- [Bühler et al. 2002] Bühler, S.; Jaeger, F.: *Einführung in die Industrieökonomik*. Berlin: Springer, 2002.
- [Bühler et al. 2003] Bühler, S.; Jaeger, F.: Kooperation: Erklärungsperspektive der Industrieökonomik, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: *Kooperationen, Allianzen und Netzwerke*. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 93-120.
- [Bunn 2000] Bunn, D.: Forecasting Loads and Prices in Competitive Power Markets, in: *Proceedings of the IEEE*, 88 (2000), H. 2, S. 163-169.
- [Bunn et al. 1997a] Bunn, D.; Larsen, E.: Systems Modelling for Energy Policy, in: *Systems Modelling for Energy Policy*. New York: John Wiley & Sons, 1997, S. 1-8.
- [Bunn et al. 1997b] Bunn, D.; Larsen, E.; Vlahos, K.: Complementary Modelling Approaches for Analysing Several Effects of Privatization on Electricity Investment, in: Bunn, E.; Larsen, E.: *Systems Modelling for Energy Policy*. New York: John Wiley & Sons, 1997, S. 303-325.
- [Buse 1997] Buse, H. P.: Kooperationen, in: Pfohl, H. C.: *Betriebswirtschaftslehre der Klein- und Mittelbetriebe - Größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung*. Berlin: Erich Schmidt, 1997, S. 441-447.
- [Canel et al. 1997] Canel, C.; Khumawala, B. M.: Multi-period international facilities location: an algorithm and application, in: *International Journal of Production Research*, 35 (1997), H. 7, S. 1891-1910.
- [Capros et al. 2000] Capros, P.; Mantzos, L.: The Economic Effects of EU-Wide Industry-Level Emission trading to reduce Greenhouse Gases: Results from PRIMES Energy Systems Model, E3M Paper. Athen: Lab ([http://europa.eu.int/comm/environment/envec/climate\\_change.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/envec/climate_change.htm)), 2000.
- [Caputo et al. 2001] Caputo, A. C.; Pelagagge, M.; Scacchia, F.: Software Tool for Environmental Plant Modeling, in: *Environmental Progress*, 20 (2001), H. 4, S. 229-239.
- [Carney 1998] Carney, M.: The competitiveness of networked production: the role of trust and asset specificity, in: *Journal of Management Studies*, 35 (1998), H. 4, S. 457-479.

- [Caves et al. 1977] Caves, R. E.; Porter, M. E.: From Entry Barriers to Mobility Barriers, in: Quarterly Journal of Economics, 91 (1977), H. 2, S. 241-261.
- [Cavin et al. 2001] Cavin, L.; Dimmer, P.; Fischer, U.; Hungerbühler, K.: A Model for Waste Treatment Selection and Costing under Uncertainty, in: Industrial and Engineering Chemical Research, 40 (2001), S. 2252-2259.
- [Chakraborty et al. 2002] Chakraborty, A.; Linninger, A. A.: Plant-Wide Waste Management. 1. Synthesis and Multiobjective Design, in: Industrial and Engineering Chemical Research, 41 (2002), H. 18, S. 4591-4604.
- [Chakraborty et al. 2003] Chakraborty, A.; Linninger, A. A.: Plant-Wide Waste Management. 2. Decision Making under Uncertainty, in: Industrial and Engineering Chemical Research, 42 (2003), H. 2, S. 357-369.
- [Chang et al. 1996] Chang, N.; Wang, S. F.: The development of an environmental Decision Support System for municipal solid waste management, in: Computers Environment and Urban Systems, 20 (1996), H. 3, S. 201-212.
- [Child et al. 1998] Child, J.; Faulkner, D.: Strategies of Cooperation - Managing Alliances, Networks and Joint Ventures. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [Christensen 1998] Christensen, J.: Die industrielle Symbiose in Kalundborg: Ein frühes Beispiel eines Recycling-Netzwerkes, in: Strebel, H.; Schwarz, E.: Kreislaforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetzwerke. Wien: Oldenbourg, 1998, S. 323-337.
- [Cohen et al. 1991] Cohen, M. A.; Moon, S.: An integrated plant loading model with economies of scale and scope, in: European Journal of Operational Research, 50 (1991), S. 266-279.
- [Cormier et al. 1999] Cormier, G.; Gunn, E. A.: Modelling and analysis for capacity expansion planning in warehousing, in: Journal of the Operational Research Society, 50 (1999), H. 1, S. 52-59.
- [Corsten et al. 1994] Corsten, H.: Betriebswirtschaftslehre. München: Oldenbourg, 1994.
- [Cosmi et al. 2000] Cosmi, C.; Cuomo, V.; Macchiato, M.; Mangiamele, L.; Masi, S.; Salvia, M.: Waste management modeling by MARKAL model: A case study for Basilicata Region, in: Environment Modelling Assessment, 5 (2000), H. 1, S. 19-27.
- [Cosson et al. 2003] Cosson, R.; Krämer, B.; Schulz-Ellermann, H. J.: Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht. Bonn: Friedhelm Merz, 2003.
- [Costi et al. 2004] Costi, P.; Miniciardi, R.; Robba, M.; Rovatii, M.; Sacile, R.: An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management, in: Waste Management, 24 (2004), H. 3, S. 277-295.
- [Côté et al. 1998] Côté, R. P.; Cohen-Rosenthal, E.: Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences, in: Journal of Cleaner Production, 1998 (1998), H. 6, S. 181-188.
- [Cox et al. 1981] Cox, H.; Hübner, H.: Wettbewerb, in: Cox, H.; Jens, U.; Markert, K.: Handbuch des Wettbewerbs. München: Vahlen, 1981, S. 1-48.
- [Crainic et al. 1997] Crainic, T. G.; Laporte, G.: Planning models for freight transportation, in: European Journal of Operational Research, 97 (1997), H. 3, S. 409-438.
- [Curiel 1997] Curiel, I.: Cooperative Game Theory and applications. Boston, London: Kluwer, 1997.

- [Current et al. 1992] Current, J. R.; Schilling, D. A.: The median tour and maximal covering problems, in: *European Journal of Operational Research*, 73 (1992), S. 114-126.
- [Cyert et al. 1963] Cyert, R.; March, J.: *A Behavioural Theory of the Firm*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1963.
- [Das et al. 2002] Das, T. K.; Teng, B.-S.: The dynamics of alliance conditions in the alliance development process, in: *Journal of Management Studies*, 39 (2002), H. 5, S. 725-746.
- [de Vries et al. 1999] de Vries, B.; Janssen, M.; Beusen, A.: Perspectives on global energy futures: simulations with the TIME model, in: *Energy Policy*, 27 (1999), H. 8, S. 477-494.
- [del Castillo et al. 2000] del Castillo, J. I.; Barquín, J.: Oligopolistic Electrical Market Competition, Stranded Costs and Uncertainty: A Supply Function Approach. 6th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Funchal, Madeira-Portugal, September 25-28, 2000.
- [Desrochers 2000] Desrochers, P.: Eco-Industrial Parks - The Case for Private Planning, in: *PERC Research Study*, 2000, S. 1-34.
- [Dibbern 2002] Dibbern, F.: *Mittelstand im Wandel des Wettbewerbs - Möglichkeiten und Grenzen kooperativer Unternehmensnetzwerke als strategische Option*. Freiburg: Universität Freiburg, 2002.
- [Domschke 1979] Domschke, W.: Entsorgung, in: Kern, W.: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1979.
- [Doz 1992] Doz, Y.: The role of partnerships and alliances in the European industrial restructuring, in: Cool, K.; Neven, D.; Walter, I.: *European Industrial Restructuring in the 1990s*. London: Macmillan, 1992, S. 294-327.
- [Dreher 2001] Dreher, M.: *Analyse umweltpolitischer Instrumente zur Förderung der Stromerzeugung aus regenerativen Energieträgern im liberalisierten Strommarkt*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 2001.
- [Dreher et al. 2000] Dreher, M.; Wietschel, M.; Rentz, O.: Evaluation of Effects of Environmental Policy Instruments on Energy Systems, in: Catania, P.; Golchert, B.; Zhou, C. Q.: *Energy 2000 - The Beginning of a New Millennium*. L' Aquila: Balaban International, 2000, S. 730-735.
- [Dyckhoff 1993] Dyckhoff, H.: *Betriebliche Produktion: Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft*. Heidelberg: Springer, 1993.
- [Dyner et al. 1997] Dyner, I.; Bunn, D.: A Systems Simulation Platform to Support Energy Policy in Colombia, in: Bunn, E.; Larsen, E.: *Systems Modelling for Energy Policy*. New York: John Wiley & Sons, 1997, S. 259-272.
- [EC 1975a] European Commission: Richtlinie 75/439/EWG des Rates vom 16. Juni 1975 über die Altölbeseitigung. Brussels: Commission of the European Communities, 1975.
- [EC 1975b] European Commission: Richtlinie des Rates 75/442/EWG vom 15. Juli 1975 über Abfälle. Brussels: Commission of the European Communities, 1975.
- [EC 1991] European Commission: Richtlinie 91/689/EWG des Rates vom 12. Dezember 1991 über gefährliche Abfälle. Brussels: Commission of the European Communities, 1991.

- [EC 1993] European Commission: Verordnung (EWG) Nr. 259/93 des Rates vom 1. Februar 1993 zur Überwachung und Kontrolle der Verbringung von Abfällen in der, in die und aus der Europäischen Gemeinschaft. Brussels: Commission of the European Communities, 1993.
- [EC 1996a] European Commission: Directive 96/92/EC of the European Parliament and of the Council of 19 December 1996 concerning common rules for the internal market in electricity. Brussels: Commission of the European Communities, 1996.
- [EC 1996b] European Commission: Richtlinie 96/82/EG des Rates vom 9. Dezember 1996 zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen (Seveso II-Richtlinie). Brussels: Commission of the European Communities, 1996.
- [EC 1997] European Commission: Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. Brussels: Commission of the European Communities, 1997.
- [EC 2000a] European Commission: Entscheidung der Kommission 2000/532/EG vom 3. Mai 2000 zur Ersetzung der Entscheidung 94/3/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle und der Entscheidung 94/904/EG des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle im Sinne von Artikel 1 Absatz 4 der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle. Brussels: Commission of the European Communities, 2000.
- [EC 2000b] European Commission: Green Paper "Towards a European strategy for the security of energy supply". Brussels: Commission of the European Communities, 2000.
- [EC 2000c] European Commission: Green Paper on greenhouse gas emissions trading within the European Union. Brussels: Commission of the European Communities, 2000.
- [EC 2002a] European Commission: Final report on the Green Paper "Towards a European strategy for the security of energy supply". Brussels: Commission of the European Communities, 2002.
- [EC 2002b] European Commission: Second Benchmarking Report on the Implementation of the Internal Electricity and Gas Market, SEK(2002)1038. Brussels: Commission of the European Communities, 2002.
- [EC 2003a] European Commission: Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community. Brussels: Commission of the European Communities, 2003.
- [EC 2003b] European Commission: Draft Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. Brussels: Commission of the European Communities, 2003.
- [EC 2003c] European Commission: Richtlinie 2003/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Juni 2003 über gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Aufhebung der Richtlinie 96/92/EG. Brussels: Commission of the European Communities, 2003.

- [Edelmann et al. 2003] Edelmann, H.; Nickel, M.: Erfolgreiche Geschäftsstrategien für Stadtwerke und regionale Versorger, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 53 (2003), H. 7, S. 460-464.
- [EEA 2002] European Environment Agency: Greenhouse gas emission trends and projections in Europe: Environment issue report No 33. Kopenhagen: EEA, 2002.
- [EEX 2003] European Energy Exchange: Produktbroschüre für den EEX Spot- und Terminmarkt. Leipzig: EEX, 2003.
- [Ehrenfeld et al. 1997] Ehrenfeld, J.; Gertler, N.: Industrial Ecology in Practice - The Evolution of Interdependence at Kalundborg, in: Journal of Industrial Ecology, 1 (1997), H. 1, S. 67-79.
- [EIA 2002] Energy Information Administration: International Energy Outlook 2002. Washington: U.S. Department of Energy, 2002.
- [Eicke et al. 1990] Eicke, H. v.; Femmerling, C.: Modular Sourcing (Teil 1 und 2): Mit Zulieferketten rationalisieren, in: Logistik heute (1990), H. 10, S. 55-56.
- [Endress 1991] Endress, R.: Strategie und Taktik der Kooperation: Grundlagen der zwischen- und innerbetrieblichen Zusammenarbeit. Berlin: Erich Schmidt, 1991.
- [Energie Spektrum 2001] N.N.: Anforderungen an die Stromnetze gestiegen, in: Energie Spektrum, 6 (2001), S. 32-33.
- [Engel 2002] Engel, C.: Abfallrecht und Abfallpolitik. Baden-Baden: Nomos, 2002.
- [Enzensberger 2003] Enzensberger, N.: Entwicklung und Anwendung eines Strom- und Zertifikatmarktmodells für den europäischen Energiesektor. Düsseldorf: VDI, 2003.
- [Erlei et al. 1999] Erlei, M.; Leschke, M.; Sauerland, D.: Neue Institutionenökonomik. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1999.
- [Everett et al. 1996] Everett, J. W.; Modak, A. R.: Optimal Regional Scheduling of Solid Waste Systems. I: Model Development, in: Journal of Environmental Engineering, 122 (1996), H. 9, S. 785-792.
- [Everett et al. 1997] Everett, J. W.; Shahi, S.: Vehicle and labour requirements for yard waste collection, in: Waste Management & Research, 15 (1997), H. 6, S. 627-640.
- [EY/VDEW 2003] Ernst & Young; VDEW: Erfolgreiche Geschäftsstrategien für Stadtwerke und regionale Energieversorgungsunternehmen. Hamburg: Ernst & Young, 2003.
- [Fahl et al. 2002] Fahl, U.; Blesl, M.: E<sup>3</sup>Net-D2, in: Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland: Energiemodelle zum Kernenergieausstieg in Deutschland: Effekte und Wirkungen eines Verzichts auf Strom aus Kernkraftwerken. Heidelberg: Physica, 2002, S. 265-315.
- [Faupel et al. 2001] Faupel, T.; Nieters, C.; Derlien, H.: Chemieparks als innovative Standortstrategie?, in: Geographische Rundschau, 53 (2001), H. 3, S. 31-37.
- [FEES 2002] Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland: Effekte und Wirkungen eines Verzichts auf Strom aus Kernkraftwerken. Heidelberg: Physica, 2002.
- [Feindor 1980] Feindor, B.: Lösungsverfahren der ganzzahligen linearen Optimierung, Universität Regensburg, 1980.

- [Ferrell et al. 1997] Ferrell, W. G.; Hizlan, H.: South Carolina Counties Use a Mixed-Integer Programming-Based Decision Support Tool for Planning Municipal Solid Waste Management, in: *Interfaces*, 27 (1997), H. 4, S. 23-34.
- [Fichtner 1999] Fichtner, W.: *Strategische Optionen der Energieversorger zur CO<sub>2</sub>-Minderung*. Berlin: Erich Schmidt, 1999.
- [Fichtner 2004] Fichtner, W.: *Produktionswirtschaftliche Planungsaufgaben bei CO<sub>2</sub>-Emissionsrechten als neuem Produktionsfaktor*. Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [Fichtner et al. 2000] Fichtner, W.; Frank, M.; Rentz, O.: Information und Kommunikation innerhalb von technisch determinierten Verwertungsnetzwerken, in: Liesegang, D. G.; Sterr, Th.; Ott, Th.: *Aufbau und Gestaltung regionaler Stoffstrommanagementnetzwerke*. Heidelberg: IUWA, 2000, S. 107-124.
- [Fichtner et al. 2004] Fichtner, W.; Tietze-Stöckinger, I.; Frank, M.; Rentz, O.: On industrial symbiosis networks and their classification, in: *Progress in Industrial Ecology*, 1 (2004), H. 1-3, S. 130-142.
- [Fichtner et al. 2005] Fichtner, W.; Tietze-Stöckinger, I.; Rentz, O.: Barriers of inter-organisational environmental management: Two case studies on industrial symbiosis, in: *Progress in Industrial Ecology*, 2 (2005), H. 1, S. 73-88.
- [Fishbone et al. 1981] Fishbone, L. G.; Abilock, H.: MARKAL, a linear programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version, in: *International Journal of Energy Research*, 1981 (1981), H. 5, S. 353-375.
- [Fleischmann 1999] Fleischmann, B.: Transport and Inventory Planning with Discrete Shipment Times, in: Speranza, M. G.; Stähly, P.: *New Trends in Distribution Logistics*. Berlin: Springer, 1999, S. 159-178.
- [Fleischmann 2002] Fleischmann, B.: Distribution and Transport Planning, in: Stadler, H.; Kilger, C.: *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin: Springer, 2002, S. 195-210.
- [Fleischmann et al. 2002] Fleischmann, B.; Meyr, H.; Wagner, M.: Advanced Planning, in: Stadler, H.; Kilger, C.: *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin: Springer, 2002, S. 71-96.
- [Folkerts 2002] Folkerts, L.: *Promotoren in Innovationsprozessen*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2002.
- [Fontanari 1996] Fontanari, M.: *Kooperationsgestaltungsprozesse in Theorie und Praxis*. Berlin: Duncker & Humblot, 1996.
- [Ford 1997] Ford, A.: The Changing Role of Simulation Models: The Case of the Pacific Northwest Electric System, in: Bunn, E.; Larsen, E.: *Systems Modelling for Energy Policy*. New York: John Wiley & Sons, 1997, S. 241-258.
- [Forthmann 2002] Forthmann, J.: Energieversorger auf Partnersuche, in: *Energie-Spektrum* (2002), H. 9, S. 38-39.
- [Frank 2003] Frank, M.: *Entwicklung und Anwendung einer integrierten Methode zur Analyse von betriebsübergreifenden Energieversorgungskonzepten*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [Franz 1996] Franz, P.: Technologie- und Gründerzentren als Hoffnungsträger kommunaler Wirtschaftsförderung in Ostdeutschland, in: *Raumforschung und Raumordnung*, 54 (1996), H. 1, S. 26-35.

- [Friese 1998] Friese, M.: Kooperation als Wettbewerbsstrategie für Dienstleistungsunternehmen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1998.
- [Fritz 1990] Fritz, W.: Ansätze der Wettbewerbstheorie aus Sicht der Marketingwissenschaft, in: Die Betriebswirtschaft, 50 (1990), H. 4, S. 491-512.
- [Fuchs 1976] Fuchs, H.: Systemtheorie, in: Handbuch der Betriebswirtschaft. Stuttgart: Poeschel, 1976, Sp. 3820-3832.
- [GAMS 2004] GAMS: The Solver Manuals. Washington, Köln: GAMS Development Corporation, GAMS Software GmbH, 2004.
- [García de Cortázar et al. 2002] García de Cortázar, A.; Lantarón, J.; Fernández, O.; Monzón, I.; Lamia, M.: Modelling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part II: Biodegradation), in: Waste Management & Research, 20 (2002), H. 6, S. 514-528.
- [Gareis 2002] Gareis, K.: Das Konzept Industriepark aus dynamischer Sicht. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2002.
- [Gattinger et al. 1999] Gattinger, M.; Voigtländer, P.: Der globale Strommarkt, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 49 (1999), H. 7, S. 426-431.
- [Gebhardt 1998] Gebhardt, J.: Güterverkehrszentrum - Logistik der kurzen Wege, in: IFG-Gesellschaft für Wirtschafts- und Beschäftigungsförderung Ingolstadt mbH: Güterverkehrszentrum Ingolstadt - Ausbaustufe 2. Ingolstadt: 1998.
- [Geiler 1998] Geiler, N.: Die Organisation des betrieblichen Gewässerschutzes in einem Chemiapark am Beispiel des "Chemioparks Höchst", in: Wasser, Luft und Boden, 42 (1998), H. 10, S. 20-22.
- [GEMIS 2002] Öko-Institut: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme GEMIS, Version 4.13. Freiburg: Öko-Institut (verfügbar unter <http://www.oeko.de/service/gemis/de>), 2002.
- [Gemünden et al. 1995] Gemünden, H. G.; Walter, A.: Der Beziehungspromotor, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 65 (1995), H. 9, S. 971-986.
- [Gemünden et al. 1996] Gemünden, H. G.; Walter, A.: Förderung des Technologietransfers durch Beziehungspromotoren, in: Zeitschrift Führung und Organisation, 65 (1996), H. 4, S. 237-245.
- [Gendreau et al. 1997] Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F.: The covering tour problem, in: Operations Research, 45 (1997), H. 4, S. 568-576.
- [Gerdey et al. 2002] Gerdey, H.-J.; Pfaffenberger, W.: EMS, in: Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland: Energiemodelle zum Kernenergieausstieg in Deutschland: Effekte und Wirkungen eines Verzichts auf Strom aus Kernkraftwerken. Heidelberg: Physica, 2002, S. 153-179.
- [GfU 2004] Gesellschaft für Umweltrecht: Aktuelle Entwicklungen des europäischen und deutschen Abfallrechts. Berlin: Erich Schmidt, 2004.
- [Gill et al. 2002] Gill, C.; Liestmann, V.: Cooperation Networks for Industrial Services, in: Zheng, L.; Possel-Dölken, F.: Strategic Production Networks. Berlin: Springer, 2002, S. 447-467.
- [Glimpel 2003] Glimpel, T.: Partnerschaftliche Kooperation: die richtige Wettbewerbsstrategie für Stadtwerke, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 53 (2003), H. 4, S. 236-237.

- [Göbelt 2001] Göbelt, M.: Entwicklung eines Modells für die Investitions- und Produktionsprogrammplanung von Energieversorgungsunternehmen im liberalisierten Markt. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 2001.
- [Göbelt et al. 2000] Göbelt, M.; Fichtner, W.; Wietschel, M.; Rentz, O.: Development and application of an optimising energy and material flow model for strategic planning of energy utilities, in: APORS: Conference Proceedings of the 5th Conference of Asian-Pacific Operational Research Societies within IFORS. Singapore: 2000.
- [Goetschalckx 2000] Goetschalckx, M.: Strategic network planning, in: Stadler, H.; Kilger, C.: Supply Chain Management and Advanced Planning. Berlin: Springer, 2000, S. 79-95.
- [González-Torre et al. 2002] González-Torre, P. L.; Adenso-Díaz, B.: A model for the reallocation of recycling containers: application to the case of glass, in: Waste Management & Research, 20 (2002), H. 5, S. 398-406.
- [Gottinger 1991] Gottinger, H. W.: Economic Models and Applications of Solid Waste Management. New York: Gordon and Breach, 1991.
- [Götzelmann 1992] Götzelmann, F.: Umweltschutzinduzierte Kooperationen der Unternehmung: Anlässe, Typen und Gestaltungspotentiale. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1992.
- [Graehl et al. 2001] Graehl, S.; Fichtner, W.; Rentz, O.: Regionalisierung als Beitrag zur Nachhaltigkeit im Bereich der industriellen Produktion, in: Raumforschung und Raumordnung, 59 (2001), H. 1, S. 29-38.
- [Greb 1998] Greb, T.: Interaktive Tourenplanung mit Tabu Search. Bremen: Universität Bremen, 1998.
- [Green 1999] Green, R.: Draining the Pool: the reform of the electricity trading in England and Wales, in: Energy Policy, 27 (1999), H. 9, S. 515-525.
- [Green et al. 1992] Green, R.; Newberry, D.: Competition in the British Electricity Spot Market, in: Journal of Political Economy, 100 (1992), H. 5, S. 929-953.
- [Grobbe 1999] Grobbe, C.: Competition in Electricity Generation in Germany and Neighbouring Countries from a System Dynamics Perspective. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1999.
- [Grochla 1975] Grochla, E.: Betriebsverbindungen, in: Grochla, E.: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1975.
- [Groothuis 1999] Groothuis, U.: Insel der Seligen, in: Wirtschaftswoche, 53 (1999), H. 14, S. 76-78.
- [Gruhn 1976] Gruhn, G.: Systemverfahrenstechnik I, Modellierung und Simulation verfahrenstechnischer Systeme. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976.
- [Gümbel et al. 1995] Gümbel, R.; Woratschek, H.: Institutionenökonomik, in: Tietz, B.; Köhler, R.; Zentes, J.: Handwörterbuch des Marketing. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1995, S. 1008-1019.
- [Gunn 2000] Gunn, S.: Erfolgsfaktoren und Problemfelder von Umweltmanagement-Netzwerken und ihre Implikation für die Ausgestaltung der Arbeitsgemeinschaft Umweltmanagement (AGUM) e.V., in: Liesegang, D. G.; Sterr, Th.; Ott, Th.: Aufbau und Gestaltung regionaler Stoffstrommanagementnetzwerke. Heidelberg: IUWA, 2000, S. 100-106.
- [Gutenberg 1966] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1, Die Produktion. Berlin: Springer, 1966.

- [Güth 1974] Güth, W.: Kooperation in Marktwirtschaften - Eine spieltheoretische Analyse der Koordinationsproblematik. Tübingen: Mohr, 1974.
- [Güth 1999] Güth, W.: Spieltheorie und ökonomische (Bei)Spiele. Berlin: Springer, 1999.
- [GWB 1998] Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (zuletzt geändert am 25.11.2003), 1998.
- [Hadjilambrinos 1999] Hadjilambrinos, C.: Understanding technology choice in electricity industries: a comparative study of France and Denmark, in: Energy Policy, 28 (1999), H. 15, S. 1111-1126.
- [Hammerschmid 1990] Hammerschmid, R.: Entwicklung technisch-wirtschaftlich optimierter regionaler Entsorgungsalternativen. Heidelberg: Physica, 1990.
- [Harp et al. 2000] Harp, S.; Brignone, S.; Wollenberg, B.; Samad, T.: SEPIA: A Simulator for Electric Power Industry Agents, in: IEEE Control Systems Magazine, 20 (2000), H. 4, S. 53-69.
- [Hart et al. 1990] Hart, O. D.; Moore, J.: Property Rights and the Theory of the Firm, in: Journal of Political Economy, 98 (1990), H. 6, S. 755-785.
- [Hartmann et al. 1985] Hartmann, K.; Kaplick, K.: Analyse und Entwurf chemisch-technologischer Verfahren. Berlin: Akademie Verlag, 1985.
- [Hasler et al. 1998] Hasler, A.; Hildebrandt, T.; Nüske, C.: Das Projekt Ressourcenschonung im Oldenburger Münsterland, in: Strebel, H.; Schwarz, E.: Kreislauforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetzwerke. Wien: Oldenbourg, 1998, S. 305-322.
- [Hauschildt 1997] Hauschildt, J.: Innovationsmanagement. München: Vahlen, 1997.
- [Havighorst 2001] Havighorst, D.: Globale Integration des Zuliefernetzwerkes bei DaimlerChrysler, in: Walter, J.; Bund, M.: Supply Chain Management. Frankfurt: F.A.Z., 2001.
- [Heck 1999] Heck, A.: Strategische Allianzen. Berlin: Springer, 1999.
- [Henkel 1996] Henkel, G.: Entsorgung. Frankfurt: VWEW, 1996.
- [Hennicke et al. 1986] Hennicke, M.; Tengler, H.: Industrie- und Gewerbeparks als Instrument der Kommunalen Wirtschaftsförderung - eine empirische Analyse in der Bundesrepublik Deutschland. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1986.
- [Henning 1999] Henning, D.: Optimisation of Local and National Energy Systems. Linköping: Institute of Technology (Linköpings Universität), 1999.
- [Hesse 1993] Hesse, G.: Zur Erklärung der Änderung von Handlungsrechten mit Hilfe ökonomischer Theorie, in: Schüller, A.: Property Rights und ökonomische Theorie. München: Vahlen, 1993, S. 79-109.
- [Hippe 1997] Hippe, A.: Interdependenzen von Strategie und Controlling in Unternehmensnetzwerken. Wiesbaden: Gabler, 1997.
- [Hippe 2003] Hippe, H.: Fusion oder Kooperation? - eine transaktionskostentheoretische Analyse. Aachen: Shaker, 2003.
- [Hokkanen et al. 1997] Hokkanen, J.; Salminen, P.: Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis, in: European Journal of Operational Research, 98 (1997), H. 1, S. 19-36.
- [Hollander 2001] Hollander, J. B.: Implementing Sustainability: Industrial Ecology and the Eco-Industrial Park, in: Economic Development Review, 17 (2001), H. 4, S. 78-86.
- [Holler et al. 2000] Holler, M. J.; Illing, G.: Einführung in die Spieltheorie. Berlin: Springer, 2000.

- [Hollmann 1992] Hollmann, H. H.: Strategische Allianzen - Unternehmens- und wettbewerbspolitische Aspekte, in: *Wirtschaft und Wettbewerb*, 42 (1992), H. 4, S. 293-305.
- [Homburg et al. 1992] Homburg, C.; Sütterlin, S.: Strategische Gruppen - ein Survey, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 62 (1992), H. 6, S. 635-662.
- [Hoster 1996] Hoster, F.: Auswirkungen des europäischen Binnenmarktes für Energie auf die deutsche Elektrizitätswirtschaft: ein Ansatz zur Analyse ordnungs- und umweltpolitischer Instrumente in der Elektrizitätswirtschaft. München: Oldenbourg, 1996.
- [Hüttermann 1985] Hüttermann, A.: Industrieparks - Attraktive industrielle Standortgemeinschaften. Wiesbaden: Steiner, 1985.
- [Ibaraki 1987] Ibaraki, T.: Enumerative Approaches to Combinatorial Optimization, Part 1, in: Hammer, P.: *Annals of Operations Research*. Basel: Baltzer, 1987.
- [IEA 1998a] International Energy Agency: Mapping the Energy Future: Energy Modelling and Climate Change Policy. Paris: OECD/IEA, 1998.
- [IEA 1998b] International Energy Agency: Projected Costs of Generating Electricity - Update 1998. Paris: OECD/IEA, 1998.
- [IEA 2001] International Energy Agency: Nuclear power in the OECD. Paris: OECD/IEA, 2001.
- [IPTS 2000] Institute for Prospective Technological Studies: Preliminary Analysis of the Implementation of an EU-wide Permit Trading Scheme on CO<sub>2</sub> Emissions Abatement Costs: Results from the POLES model, Sevilla, IPTS [http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/climate\\_change.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/climate_change.htm), 2000.
- [Jansen et al. 1998] Jansen, R.; Berken, M.; Kötter, U.: *Handbuch Entsorgungslogistik*. Frankfurt: Deutscher Fachverlag, 1998.
- [Jarillo 1988] Jarillo, J. C.: On strategic networks, in: *Strategic Management Journal*, 9 (1988), H. 1, S. 31-41.
- [Jayaraman 1998] Jayaraman, V.: Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design: An investigation, in: *International Journal of Operations and Production Management*, 18 (1998), H. 5-6, S. 5-6.
- [Jeschke 1998] Jeschke, K.: Contracting - Dienstleistungskonzept für Energiemärkte, in: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 27 (1998), H. 7, S. 368-370.
- [Jochum 2001] Jochum, G.: Kooperative Energiewirtschaft in liberalisierten Energiemärkten, in: *Elektrizitätswirtschaft*, 100 (2001), H. 20-21, S. 210-211.
- [Jost 2001] Jost, P. J.: Die Prinzipal-Agenten-Theorie in der Betriebswirtschaftslehre. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2001.
- [Kafandaris 2002] Kafandaris, S.: ELECTRE and Decision Support: Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment, in: *Journal of the Operational Research Society*, 53 (2002), H. 12, S. 1396-1397.
- [Kallrath et al. 1997] Kallrath, J.; Wilson, J. M.: *Business Optimisation Using Mathematical Programming*. Houndmills: Macmillan, 1997.
- [Kaluza 2001] Kaluza, B.: Controlling- und PPS-Systeme zur Lösung betriebswirtschaftlicher Probleme in Verwertungsnetzwerken. Klagenfurt: Diskussionsbeiträge des Instituts für Wirtschaftswissenschaften der Universität Klagenfurt Nr. 2001/05, 2001.

- [Kaluza et al. 1996] Kaluza, B.; Blecker, Th.: Interindustrielle Unternehmensnetzwerke in der betrieblichen Entsorgungslogistik, Diskussionsbeiträge des Fachbereiches Wirtschaftswissenschaft der Gerhard-Mercator-Universität Gesamthochschule Duisburg. Duisburg: 1996.
- [Kaluza et al. 1998] Kaluza, B.; Blecker, T.: Stabilität und Funktionsmechanismen von Umweltmanagement-Netzwerken, in: Liesegang, D. G.; Sterr, Th.; Würzner, E.: Kostenvorteile durch Umweltmanagement-Netzwerke. Heidelberg: IUWA, 1998, S. 27-50.
- [Karagiannidis et al. 1998] Karagiannidis, A.; Moussiopoulos, N.: A model generating framework for regional waste management taking local peculiarities explicitly into account, in: Location Science, 6 (1998), H. 1-4, S. 281-306.
- [Kaufer 1980] Kaufer, E.: Industrieökonomik. München: Vahlen, 1980.
- [Keldenich et al. 2000] Keldenich, K. J.; Neugebauer, C. W.: Zum Management von Ersatzbrennstoffen in einer modernen Abfallwirtschaft, in: VDI: Wege des Abfalls. Düsseldorf: VDI, 2000.
- [Kersten et al. 2001] Kersten, T.; Zander, P.; Oettli, S.; Fischer, A.: Marktstudie Lieferantenpark und Zukunft der Logistik in der Automobilindustrie. Heilbronn: agiplan F+L, 2001.
- [Kiefer et al. 1999] Kiefer, U.; Nels, M.: Ein innovatives Förderkonzept auf EHB-Basis verbindet Zulieferer im neuen Industriepark mit der Montage im Ford Werk Saarlouis, in: Logistik im Unternehmen, 1999 (1999), H. 6, S. 56-59.
- [Klanke 1995] Klanke, B.: Kooperationen als Instrument der strategischen Unternehmensführung: Analyse und Gestaltung - dargestellt am Beispiel von Kooperationen zwischen Wettbewerbern. Münster: Universität Münster, 1995.
- [Klemperer et al. 1989] Klemperer, P.; Meyer, M.: Supply Function Equilibria in Oligopoly Under Uncertainty, in: Econometrica, 57 (1989), H. 6, S. 1243-1277.
- [Kloepfer 1998] Kloepfer, M.: Umweltrecht. München: C.H. Beck, 1998.
- [Klopfer et al. 1993] Klopfer, T.; Schulz, W.: Märkte für Strom - Internationale Erfahrungen und Übertragbarkeit auf Deutschland. München: Oldenbourg, 1993.
- [Klöter 1997] Klöter, R.: Opponenten im organisationalen Beschaffungsprozess. Wiesbaden: Gabler, 1997.
- [Klug 2000] Klug, F.: Erfolgspotential Zulieferpark: Logistik der kurzen Wege, in: technologie & management, 2000 (2000), H. 7-8, S. 32-35.
- [Klug 2001] Klug, F.: Logistik-Revolution im Park, in: Logistik für Unternehmen, 2001 (2001), H. 11, S. 54-57.
- [Knoblich 1969] Knoblich, H.: Zwischenbetriebliche Kooperation, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 39 (1969), S. 497-514.
- [Koch et al. 2000] Koch, M.; Harnisch, J.; Patel, M.; Blok, K.: Systematische Analyse der Eigenschaft von Energiemodellen im Hinblick auf ihre Eignung für möglichst praktische Politik-Beratung zur Fortentwicklung der Klimaschutzstrategie (Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes). Köln: ECOFYS, 2000.
- [Korhonen 2000] Korhonen, J.: Industrial Ecosystem. Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2000.
- [Kraege 1997] Kraege, R.: Controlling strategischer Unternehmenskooperationen. München: Hampp, 1997.
- [Krämer 2003] Krämer, M.: Modellanalyse zur Optimierung der Stromerzeugung bei hoher Einspeisung von Windenergie. Düsseldorf: VDI, 2003.

- [Krallman 1996] Krallman, H.: Systemanalyse im Unternehmen. München: Oldenbourg, 1996.
- [Krause 1999] Krause, F.: The economics of cutting carbon emissions in the power sector: A review and methodological comparison of two European studies. Paper presented at the IEA International Workshop on technologies to reduce Greenhouse Gas Emissions, 5.-7. May 1999. Washington: 1999.
- [Krcal 2000] Krcal, H. C.: Regionale Netzwerke für das Stoffstrommanagement - Eine Kooperationsform für den Entsorgungsprozess-, in: Liesegang, D. G.; Sterr, Th.; Ott, Th.: Aufbau und Gestaltung regionaler Stoffstrommanagementnetzwerke. Heidelberg: IUWA, 2000, S. 26-35.
- [Kreikebaum 1998] Kreikebaum, H.: Industrial Ecology - Organisatorische Voraussetzungen der Kontinuität eines Netzwerkes, in: Strebel, H.; Schwarz, E.: Kreislauforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetzwerke. München: Oldenbourg, 1998, S. 59-80.
- [Kreuzberg 1998] Kreuzberg, M.: Spotpreise und Handelsflüsse auf dem europäischen Strommarkt - Analyse und Simulation, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, 1998 (1998), H. 4, S. 43-63.
- [Krishna et al. 1998a] Krishna, V.; Ramesh, V. C.: Intelligent Agents for Negotiations in Market Games, Part 1: Model, in: IEEE Transactions on Power Systems, 13 (1998), H. 3, S. 1103-1108.
- [Krishna et al. 1998b] Krishna, V.; Ramesh, V. C.: Intelligent Agents for Negotiations in Market Games, Part 2: Application, in: IEEE Transactions on Power Systems, 13 (1998), H. 3, S. 1109-1114.
- [Kröber-Riel et al. 1999] Kröber-Riel, W.; Weinberg, P.: Konsumentenverhalten. München: Vahlen, 1999.
- [KrW-/AbfG 1994] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) vom 27.9.1994, zuletzt geändert am 3.5.2000, 1994.
- [Kühnle et al. 1999] Kühnle, H.; Schnauffer, H. G.; Brehmer, N.: Kooperation nach fraktalen Prinzipien, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 94 (1999), H. 3, S. 132-135.
- [Küting 1983] Küting, K.: Der Entscheidungsrahmen einer unternehmerischen Zusammenarbeit, in: Küting, K.; Zink, K. J.: Unternehmerische Zusammenarbeit. Berlin: Erich Schmidt, 1983, S. 1-36.
- [Kutschker 1994] Kutschker, M.: Strategische Kooperationen als Mittel der Internationalisierung, in: Schuster, L.: Die Unternehmung im internationalen Wettbewerb. Berlin: Erich Schmidt, 1994, S. 121-157.
- [KWK-Gesetz 2002] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, 2002.
- [Laker et al. 2003] Laker, M.; Nigge, K. M.; Wübker, G.: Bündelung: Der Schlüssel zu einer erfolgreichen Multi-Utility-Strategie, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 52 (2003), H. 4, S. 220-225.
- [Lambert et al. 2002] Lambert, A. J. D.; Boons, F. A.: Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks, in: Technovation, 22 (2002), H. 8, S. 471-484.
- [Lane 1997] Lane, D.: Diary of an Oil Market model: How a System Dynamics Modelling Process was used with Managers to Resolve Conflict and to Generate Insight, in: Bunn, E.; Larsen, E.: Systems Modelling for Energy Policy. New York: John Wiley & Sons, 1997, S. 205-240.

- [Laporte 1997] Laporte, G.: Vehicle Routing, in: Dell'Amico, M.; Maffioli, M.; Martello, S.: Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization. New York: Jon Wiley & Sons, 1997, S. 223-240.
- [Laporte et al. 1987] Laporte, G.; Mercure, H.; Norbert, Y.: Generalized travelling salesman problem through n sets of nodes: the asymmetrical case, in: Discrete Applied Mathematics, 18 (1987), S. 185-197.
- [Laporte et al. 1988] Laporte, G.; Norbert, Y.; Taillefer, S.: Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems, in: Transportation Science, 22 (1988), S. 161-172.
- [Larson 1992] Larson, A.: Network Dyads in Entrepreneurial Settings: A Study of the Governance of Exchange Relationships, in: Administrative Science Quarterly, 37 (1992), H. 1, S. 76-104.
- [Lenz et al. 1999] Lenz, H.; Schmidt, M.: Das strategische Netzwerk als Organisationsform internationaler Prüfungs- und Beratungsunternehmen - Entwicklung zur "Global Professional Services Firm", in: Engelhard, J.; Sinz, E.: Kooperationen im Wettbewerb. Wiesbaden: Gabler, 1999, S. 113-150.
- [Leonard-Barton 1995] Leonard-Barton, D.: Wellsprings of Knowledge - Building and Sustaining the Sources of Innovation. Boston: Harvard Business School Press, 1995.
- [LfU 2001] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Entwicklung der Kraftstoffpreise in Deutschland ab 1970, 3. Aktualisierung. Karlsruhe: LfU, 2001.
- [Lin et al. 2001] Lin, Y. K.; Yuan, J.: On a multicommodity flow network reliability model and its application to a container-loading transportation problem, in: Journal of the Operations Research Society of Japan, 44 (2001), H. 4, S. 366-377.
- [Lingenfelder 1996] Lingenfelder, M.: Die Internationalisierung im europäischen Einzelhandel. Berlin: Duncker & Humblot, 1996.
- [Linninger et al. 2000] Linninger, A. A.; Chakraborty, A.; Colberg, R. D.: Planning of waste reduction strategies under uncertainty, in: Computer & Chemical Engineering, 24 (2000), H. 2-7, S. 1043-1048.
- [List et al. 1991] List, G.; Mirchandani, P.: An integrated Network/Planar Multiobjective Model for Routing and Siting for Hazardous Materials and Waste, in: Transportation Science, 25 (1991), H. 2, S. 146-156.
- [Ljunggren 2000] Ljunggren, M.: Modelling national solid waste management, in: Waste Management & Research, 18 (2000), H. 6, S. 525-537.
- [Lorange et al. 1992] Lorange, P.; Roos, J.; Simcic Bronn, P.: Building Successful Strategic Alliances, in: Long Range Planning, 1992 (1992), H. 6, S. 10-17.
- [Lorenz 1988] Lorenz, E. H.: Neither friends nor strangers: informal networks of subcontracting in French industry, in: Gambetta, D.: Trust. Making and breaking cooperative relations. New York: 1988, S. 194 ff.
- [Lubritz 1998] Lubritz, S.: Internationale Strategische Allianzen. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1998.
- [Ludwig 1962] Ludwig, H.: Die Größendegression der technischen Produktionsmittel. Köln: Westdeutscher Verlag, 1962.
- [Lüth 1997] Lüth, O.: Strategien zur Energieversorgung unter Berücksichtigung von Emissionsrestriktionen. Düsseldorf: VDI, 1997.
- [Lutz 1993] Lutz, V.: Horizontale strategische Allianzen: Ansatzpunkte zu ihrer Institutionalisierung. Hamburg: Steuer- und Wirtschaftsverlag, 1993.

- [Lyneis 1997] Lyneis, J.: Preparing for a Competitive Environment: Developing Strategies for America's Electric Utilities, in: Bunn, E.; Larsen, E.: Systems Modelling for Energy Policy. New York: John Wiley & Sons, 1997, S. 273-302.
- [Macauley et al. 2003] Macauley, M.; Palmer, K.; Shih, J.-S.: Dealing with electronic waste: modeling the costs and environmental benefits of computer monitor disposal, in: Journal of Environmental Management, 68 (2003), H. 1, S. 13-22.
- [Magin et al. 2003] Magin, V.; Schunk, H.; Heil, O.; Fürst, R.: Kooperation und Coopetition: Erklärungsperspektive der Spieltheorie, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 121-140.
- [Maqsood et al. 2003] Maqsood, I.; Huang, G. H.: A Two-Stage Interval-Stochastic Programming Model for Waste Management under Uncertainty, in: Journal of the Air and Waste Management Association, 53 (2003), H. 5, S. 540-552.
- [Marquardt 1995] Marquardt, W.: Modellbildung als Grundlage der Prozesssimulation, in: Schuler, H.: Prozesssimulation. Weinheim: VCH, 1995.
- [Martinsen et al. 1997] Martinsen, D.; Markewitz, P.; Müller, D.; Walbeck, M.: Das IKARUS-Optimierungsmodell, in: Molt, S.; Fahl, U.: Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland - Stand der Entwicklung. Jülich: Forschungszentrum, 1997, S. 11-38.
- [MautHV 2003] Verordnung zur Festsetzung der Höhe der Autobahnmaut für schwere Nutzfahrzeuge (MautHV - Mauthöheverordnung), 2003.
- [Meckl 1995] Meckl, R.: Zur Planung internationaler Unternehmungsk Kooperationen, in: Zeitschrift für Planung, 1995 (1995), H. 1, S. 25-39.
- [Melkote et al. 2001] Melkote, S.; Daskin, M. S.: An integrated model of facility location and transportation network design, in: Transportation Research Part A, 35 (2001), H. 6, S. 515-538.
- [Meller 1998] Meller, E.: Wettbewerb und Kooperation im Strommarkt, in: Elektrizitätswirtschaft, 97 (1998), H. 13, S. 6.
- [Messner 1984] Messner, S.: User's Guide for the Matrix Generator of Message II: Model description and implementation guide, IIASA WP 84-71a. Laxenburg: IIASA, 1984.
- [Messner et al. 1999] Messner, S.; Strubegger, M.: Model-based decision support in energy planning, in: International Journal of Global Energy Issues, 12 (1999), H. 1-6, S. 196-207.
- [Meyer 1995] Meyer, M.: Ökonomische Organisation in der Industrie. Wiesbaden: Gabler, 1995.
- [Meyer 1999] Meyer, P.: Der Kühlschrank als Kilometerfresser!, in: Entsorga-Magazin, 99 (1999), H. 1-2, S. 34-36.
- [Min et al. 1998] Min, H.; Jayaraman, V.; Srivastava, R.: Combined location-routing problems: a synthesis and future research directions, in: European Journal of Operational Research, 108 (1998), S. 1-15.
- [Mohr et al. 1994] Mohr, J.; Spekman, R.: Characteristics of Partnership Success: Partnership Attributes, Communication Behaviour, and Conflict Resolution Techniques, in: Strategic Management Journal, 15 (1994), H. 2, S. 135-152.
- [Morecroft et al. 1997] Morecroft, J.; Marsh, B.: Exploring Oil Market Dynamics: A System Dynamics Model and Microworld of the Oil Producers, in: Bunn, E.; Larsen, E.: Systems Modelling for Energy Policy. New York: John Wiley & Sons, 1997, S. 167-204.

- [Morissey et al. 2004] Morissey, A. J.; Browne, J.: Waste management models and their application to sustainable waste management, in: Waste Management, 24 (2004), H. 3, S. 297-308.
- [Morschett 2003] Morschett, D.: Formen von Kooperationen, Allianzen und Netzwerken, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 387-413.
- [Möschel et al. 1994] Möschel, W.; Streit, M.; Witt, U.: Marktwirtschaft und Rechtsordnung. Baden-Baden: Nomos, 1994.
- [Müggenborg 2003a] Müggenborg, H. J.: Chemieparks unter der Lupe - Teil 1: Der Trend zum Industrie- bzw. Chemiapark, in: Chemie-Technik, 32 (2003), H. 1-2, S. 10-13.
- [Müggenborg 2003b] Müggenborg, H. J.: Chemieparks unter der Lupe - Teil 2: Vor- und Nachteile von Industrieparks, in: Chemie-Technik, 32 (2003), H. 3, S. 14-17.
- [Nelles et al. 2003] Nelles, M.; Oebel, G.: Kooperationen in der Unternehmensfinanzierung, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 773-796.
- [Nie et al. 2004] Nie, Y.; Li, T.; Yan, G.; Wang, Y.; Ma, X.: An Optimal Model and its Application for the Management of Municipal Solid Waste from Regional Small Cities in China, in: Journal of the Air and Waste Management Association, 54 (2004), H. 2, S. 191-199.
- [Niesing 1970] Niesing, H.: Die Gewerbeparks als Mittel der staatlichen regionalen Industrialisierungspolitik, dargestellt am Beispiel Großbritanniens, Schriften zu Regional- und Verkehrsproblemen in Industrie- und Entwicklungsländern, Band 7. Berlin: Duncker & Humblot, 1970.
- [Oder 1994] Oder, C.: Entwicklung und Anwendung eines auf der Theorie der unscharfen Mengen basierenden Energie-Emissions-Modells. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 1994.
- [Oesterle 1993] Oesterle, M. J.: Joint-Venture in Russland. Wiesbaden: Gabler, 1993.
- [Ortjohann 1989] Ortjohann, E.: Mathematisches Modell und Verfahren zur langfristigen Einsatzplanung thermischer Kraftwerkssysteme unter Berücksichtigung des Energiefremdbezuges aus dem Verbundnetz. Düsseldorf: VDI, 1989.
- [Ott 1985] Ott, A. E.: Industrieökonomik, in: Bombach, G.; Gahlen, B.; Ott, A. E.: Industrieökonomik: Theorie und Empirie. Tübingen: Mohr, 1985, S. 319-331.
- [Ottersbach et al. 1990] Ottersbach, K.; Kolbe, Ch.: Integrationsrisiken bei Unternehmensakquisitionen, in: Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis, 2 (1990), H. 90, S. 140-150.
- [Pampel 1993] Pampel, J.: Kooperation mit Zulieferern: Theorie und Management. Wiesbaden: Gabler, 1993.
- [Pappenheim-Trockhorn 1995] Pappenheim-Trockhorn, H.: Der Aufbau von Kooperationsbeziehungen als strategisches Instrument: Eine Längsschnittuntersuchung zur Kooperationspolitik deutscher Unternehmen. Heidelberg: Physica, 1995.
- [Pausenberger 1989] Pausenberger, E.: Zur Systematik von Unternehmenszusammenschlüssen, in: Das Wirtschaftsstudium, 18 (1989), H. 11, S. 621-626.
- [Penkuhn 1997] Penkuhn, T.: Umweltintegriertes Stoffstrommanagement in der Prozeßindustrie. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1997.

- [Pett 1994] Pett, A.: Technologie- und Gründerzentren. Empirische Analyse eines Instruments zur Schaffung hochwertiger Arbeitsplätze. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1994.
- [Pfaffenberger et al. 2004] Pfaffenberger, W.; Hille, M.: Investitionen im liberalisierten Energiemarkt: Optionen, Marktmechanismen, Rahmenbedingungen, Bremer Energie Institut, 2004.
- [Pfohl 1991] Pfohl, H. C.: Gestaltungsmöglichkeiten der Entsorgungslogistik, in: Wildemann, H.: Just-in-Time in F&E, Produktion und Logistik. München: gfmt, 1991.
- [Pfohl et al. 2000a] Pfohl, H. C.; Gareis, K.: Industriepark-Lösungen in der Automobilindustrie, in: ZfAW Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft 3 (2000), H. 3, S. 52-58.
- [Pfohl et al. 2000b] Pfohl, H. C.; Gareis, K.; Sievers, M.: Entwicklungsperspektiven für Industrieparks, in: Pfohl, H. C.; Gareis, K.: Logistische Schnittstellen in Produktionsnetzen. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2000.
- [Picot 1991] Picot, A.: Ökonomische Theorien der Organisation, in: Ordelheide, D.; Rudolph, B.; Büsselmann, E.: Betriebswirtschaftslehre und ökonomische Theorie. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1991, S. 143-170.
- [Picot 2000] Picot, A.: Markt- und Unternehmensstrukturen in der vernetzten Wirtschaft, in: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln: Neue Formen der Unternehmensorganisation in der Energiewirtschaft. München: Oldenbourg, 2000, S. 127-138.
- [Picot et al. 1993] Picot, A.; Frank, E.: Vertikale Integration, in: Hauschildt, J.; Grün, O.: Ergebnisse empirischer betriebswirtschaftlicher Forschung. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993, S. 179-219.
- [Picot et al. 2001] Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R.: Die grenzenlose Unternehmung. Wiesbaden: Gabler, 2001.
- [Plümer et al. 1995] Plümer, T.; Multhaupt, R.: Integrierte Abfallwirtschaft. Düsseldorf: VDI, 1995.
- [Popp 1983] Popp, W.: Strategische Planung für eine multinationale Unternehmung mit gemischt-ganzzahliger Programmierung. Eine Fallstudie, in: OR Spektrum, 1 (1983), H. 5, S. 45-57.
- [Porter 1999] Porter, M. E.: Wettbewerbsstrategie. Frankfurt: Campus, 1999.
- [Porter et al. 1989] Porter, M. E.; Fuller, M.: Koalitionen und globale Strategien, in: Porter, M. E.: Globaler Wettbewerb. Wiesbaden: Gabler, 1989, S. 363-399.
- [Pratten 1971] Pratten, C.: Economies of scale in manufacturing industry. Cambridge: University Press, 1971.
- [Prognos 2000] Prognos AG: Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, Stuttgart, 2000.
- [Rahman et al. 1995] Rahman, M.; Kuby, M.: A Multiobjective Model for Locating Solid Waste Transfer Facilities Using an Empirical Opposition Function, in: INFOR, 33 (1995), H. 1, S. 34-49.
- [Rajagopalan et al. 2001] Rajagopalan, S.; Swaminathan, J. M.: A Coordinated Production Planning model with Capacity Expansion and Inventory Management, in: INFORMS, 47 (2001), H. 11, S. 1562-1580.

- [Rentz et al. 1995] Rentz, O.; Wietschel, M.; Ardone, A.; Fichtner, W.; Jattke, A.; Tsai, W.: Ökonomische Beurteilung von Maßnahmen zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, Endbericht eines Forschungsvorhabens für das Umweltbundesamt. Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), 1995.
- [Rentz et al. 1998a] Rentz, O.; Wietschel, M.; Balduf, J.; Schöttle, H.; Fichtner, W.: Contracting als Instrument zur umweltorientierten Unternehmensführung im liberalisierten Energiemarkt, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg. Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), 1998.
- [Rentz et al. 1998b] Rentz, O.; Wietschel, M.; Schöttle, H.; Fichtner, W.: Ökonomische Bewertung von Technologien und Strategien zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen - durchgeführt für ausgewählte norddeutsche Versorgungsgebiete. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1998.
- [Rentz et al. 2001] Rentz, O.; Wietschel, M.; Dreher, M.; Böhringer, C.; Bräuer, W.; Kühn, I.; Bergmann, H.: Neue umweltpolitische Instrumente im liberalisierten Energiemarkt - Endbericht eines Projektes im Auftrag des Landes Baden-Württemberg (gefördert im Rahmen von BWPLUS). Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH); Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim, 2001.
- [Rentz et al. 2002] Rentz, O.; Fichtner, W.; Frank, M.; Wolf, M.; Rejman, M.; Eyerer, P.; Reimert, R.; Schulz, A.; v.Buren, V.; Schäfers, B.; Bernart, B.: Endbericht zum Forschungsvorhaben Entwicklung eines regionalen Energiemanagement-Konzeptes und Anwendung auf die TechnologieRegion Karlsruhe. Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [Rentz et al. 2003a] Rentz, O.; Fleury, A.; Fichtner, W.: Sustainable electricity supply in France. Karlsruhe: Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), 2003.
- [Rentz et al. 2003b] Rentz, O.; Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.: Endbericht zum Forschungsvorhaben ReduParks - Entsorgerparks als Option zur Reduktion zwischenbetrieblicher Transportströme. Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [Rentz et al. 2004] Rentz, O.; Möst, D.; Fichtner, W.: Analyse der Wettbewerbsfähigkeit der schweizerischen Wasserkraftwerke im Rahmen des europäischen Elektrizitätsversorgungssystems, Bericht zur 1. Projektetappe, PSEL - Projekt- und Studienfonds, 2004.
- [Reuter 1998] Reuter, B.: Controlling virtueller Unternehmen, in: Sorg, S.: Bestehen im Wandel und Wettbewerb durch Fortschritt der Büroautomation. Velbert: 1998, S. C 543.01-C 543.15.
- [ReVelle et al. 1996] ReVelle, C. S.; Laporte, G.: The plant location problem: new models and research prospects, in: Operations Research, 44 (1996), H. 6, S. 864-874.
- [Richardson 1972] Richardson, G.: The organization of industry, in: Economic Journal, 82 (1972), H. 327, S. 883-896.
- [Richter 1994] Richter, R.: Institutionen ökonomisch analysiert. Tübingen: Mohr, 1994.
- [Richter et al. 1999] Richter, R.; Furubotn, E. G.: Neue Institutionenökonomik. Tübingen: Mohr, 1999.

- [Rinschede et al. 1992] Rinschede, A.; Wehking, K. H.: Entsorgungslogistik I - Grundlagen, Stand und Technik. Berlin: Erich Schmidt, 1992.
- [Rinza 1999] Rinza, T.: Die Zukunft der Industrieparks, in: Logistik heute, 99 (1999), H. 11.
- [Romero Morales et al. 1999] Romero Morales, D.; van Nunen, J. A. E. E.; Romeijn H.E.: Logistics Network Design Evaluation in a Dynamic Environment, in: Speranza, M. G.; Stähly, P.: New Trends in Distribution Logistics. Berlin: Springer, 1999, S. 113-135.
- [Rotering 1993] Rotering, J.: Zwischenbetriebliche Kooperation als alternative Organisationsform - ein transaktionskostentheoretischer Erklärungsansatz. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993.
- [Röthig 1997] Röthig, A.: Optimaler Primärenergie- und Kraftwerkseinsatz in elektrischen Energieversorgungssystemen - Strukturelle Analyse und mathematische Verfahren. Düsseldorf: VDI, 1997.
- [Rothwell et al. 1991] Rothwell, R.; Dodgson, M.: External Linkages and Innovation in Small and Medium-Sized Enterprises, in: R & D Management, 21 (1991), H. 2, S. 125-136.
- [RTI 1994] Research Triangle Institute: Eco-industrial parks: a case study and analysis of economic, environmental, technical and regulatory issues, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park (NC), 1994.
- [Rudkevich et al. 1998] Rudkevich, A.; Duckworth, M.; Rosen, R.: Modeling Electricity Pricing in a Deregulated Generation Industry: Potential for Oligopoly Pricing in a Poolco, in: Energy Journal, 19 (1998), H. 3, S. 19-48.
- [Ruhland 2000] Ruhland, F.: Lieferantenpartnerschaften aus Sicht eines Energie-Einzelhändlers, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 50 (2000), H. 12, S. 930-935.
- [Salvia et al. 2002] Salvia, M.; Cosmi, C.; Macchiato, M.; Mangiamele, L.: Waste management system optimisation for Southern Italy with MARKAL model, in: Resources, Conservation and Recycling, 2002 (2002), H. 34, S. 91-106.
- [Scheel 1999] Scheel, J.: Entwicklung und Anwendung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Planung und Optimierung von Sammelstellen für feste Siedlungsabfälle, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, 1999.
- [Schleef 1999] Schleef, H. J.: Zur techno-ökonomischen Bewertung des gestuften Ausbaus von Kombikraftwerken. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [Schmedding et al. 2004] Schmedding, D.; Tietze-Stöckinger, I.; Liedtke, G.; Ott, A.: BundlePoints - An option for reducing economic and ecological loads in trade areas, in: Proceedings of 10th world conference on transport research, 2004, S. 1-14 (separate Zählung).
- [Schmidtchen 2003] Schmidtchen, D.: Wettbewerb und Kooperation (Co-opetition): Neues Paradigma für Wettbewerbstheorie und Wettbewerbspolitik, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 65-92.
- [Schorer 1994] Schorer, K.: Moderne Gewerbeparks in Deutschland attraktive Standorte für Unternehmen. Hamburg: LIT-Verlag Münster, 1994.
- [Schöttle 1998] Schöttle, H.: Analyse des Least-Cost Planning Ansatzes zur rationellen Nutzung elektrischer Energie. Münster: LIT-Verlag, 1998.
- [Schubert et al. 1981] Schubert, W.; Küting, K.: Unternehmenszusammenschlüsse. München: Vahlen, 1981.

- [Schulte 1999] Schulte, H.: Umweltrecht. Heidelberg: C.F. Müller, 1999.
- [Schulte 2003] Schulte, G.: Die Kooperation im europäischen Wettbewerbsrecht, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 333-358.
- [Schultmann et al. 2000] Schultmann, F.; Engels, B.; Rentz, O.: Planung von Logistiksystemen für die Verwertung von Batterien, in: Logistik 2000plus: Herausforderungen, Trends, Konzepte (2000), S. 152-166.
- [Schulze et al. 1982] Schulze, J.; Hassan, A.: Methoden der Material- und Energiebilanzierung bei der Projektierung von Chemieanlagen. Weinheim: Verlag Chemie, 1982.
- [Schumpeter 1912] Schumpeter, J.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Leipzig: Duncker & Humblot, 1912.
- [Schwamborn 1994] Schwamborn, S.: Strategische Allianzen im internationalen Marketing. Wiesbaden: Gabler, 1994.
- [Schwarz 1979] Schwarz, P.: Morphologie von Kooperationen und Verbänden. Tübingen: Mohr, 1979.
- [Schwarz 1994] Schwarz, E.: Unternehmensnetzwerke im Recycling-Bereich. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1994.
- [Schwarz 1998] Schwarz, E.: Ökonomische Aspekte regionaler Verwertungsnetzwerke, in: Strebel, H.; Schwarz, E.: Kreislaufforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetzwerke. München: Oldenbourg, 1998, S. 11-26.
- [Schwarz et al. 1997] Schwarz, E.; Steininger, K.: Implementing nature's lesson: the industrial recycling network enhancing regional development, in: Journal of Cleaner Production, 5 (1997), H. 1-2, S. 47-56.
- [Seebregts et al. 2002] Seebregts, A. J.; Goldstein, G. A.; Smekens, K.: Energy/Environmental modeling with the MARKAL family of models, in: Chamoni, P.; Leisten, R.; Martin, A.; Minnemann, J.; Stadler, H.: Proceedings of the International Conference on Operations Research (OR 2001), Duisburg, September 3 - 5, 2001. Heidelberg: Springer, 2002, S. 75-82.
- [Seele 2001] Seele, R.: Flexible Partnerschaften - Erfolgsstrategien für Stadtwerke, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 51 (2001), H. 9, S. 566-567.
- [Sell 2002] Sell, A.: Internationale Unternehmenskooperationen. München: Oldenbourg, 2002.
- [Solf 2001] Solf, M.: Kooperationen als Finanzierungsinstrument, in: Der Betrieb, 54 (2001), H. 51-52, S. 2666-2670.
- [Sommerer 1998] Sommerer, G.: Unternehmenslogistik. München: Carl Hanser, 1998.
- [Sonesson 2000] Sonesson, U.: Modelling of waste Collection - a general approach to calculate fuel consumption and time, in: Waste Management & Research, 18 (2000), H. 2, S. 115-123.
- [Souren 1996] Souren, R.: Theorie betrieblicher Reduktion. Heidelberg: Physica, 1996.
- [Sparwasser 2003] Sparwasser, R.: Umweltrecht. 2003: Heidelberg: Müller, 2003.
- [Spekman et al. 1998] Spekman, R.; Forbes, T.; Isabella, L.; MacAvoy, T.: Alliance Management: A View from the Past and a Look to the Future, in: Journal of Management Studies, 35 (1998), H. 6, S. 747-772.
- [Starrmann 2000] Starrmann, F.: Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland - Analyse und Simulation, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, 24 (2000), H. 2, S. 69-102.

- [Staub 1975] Staub, K.: Unternehmungskooperation für Produktinnovation. Bern, Stuttgart: Dissertation, 1975.
- [Steck 1967] Steck, R.: Formen und Auswirkungen betrieblicher Kooperation. Berlin: Technische Universität, 1967.
- [Steckert 2000] Steckert, U.: Wohin treiben die Stadtwerke im Wettbewerb?, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 50 (2000), H. 9, S. 648-653.
- [Stehle 2003] Stehle, P.: The European Automotive Supply Industry at the Crossroads, in: Sachsenmeier, P.; Schottenloher, M.: Challenges between Competition and Collaboration. Heidelberg: Springer, 2003, S. 79-86.
- [Steinmann et al. 1991] Steinmann, H.; Schreyögg, G.: Management - Grundlagen der Unternehmensführung - Konzepte, Funktionen und Praxisfälle. Wiesbaden: Gabler, 1991.
- [Sterr 2000] Sterr, T.: Gestaltungsaspekte eines informations- und kommunikations-technischen Instrumentariums zur Förderung des "regionalen Stoffstrommanagements Rhein-Neckar", in: Liesegang, D. G.; Sterr, Th.; Ott, Th.: Aufbau und Gestaltung regionaler Stoffstrommanagementnetzwerke. Heidelberg: IUWA, 2000, S. 49-77.
- [Sterr 2003] Sterr, T.: Industrielle Stoffkreislaufwirtschaft im regionalen Kontext. Berlin: Springer, 2003.
- [Steven 1991] Steven, M.: Umwelt als Produktionsfaktor?, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 61 (1991), H. 4, S. 509-523.
- [Steven et al. 1999] Steven, M.; Krüger, R.: Management von Logistiknetzen, Arbeitsbericht Nr. 81. Bochum: Institut für Unternehmensführung und Unternehmensforschung, Bochum: Ruhr-Universität, 1999.
- [Stölzle 1993] Stölzle, W.: Umweltschutz und Entsorgungslogistik. Darmstadt: Erich Schmidt, 1993.
- [Straube 1972] Straube, M.: Zwischenbetriebliche Kooperation. Wiesbaden: Gabler, 1972.
- [Strebel 1995] Strebel, H.: Verwertungsnetze in und zwischen Unternehmen: Ein Problem betrieblichen Lernens, in: ZfB-Ergänzungsheft, 64 (1995), H. 4, S. 113-126.
- [Strebel 1998] Strebel, H.: Das Konzept des regionalen Verwertungsnetzes, in: Strebel, H.; Schwarz, E.: Kreislaforientierte Unternehmenskooperationen. München: Oldenburg, 1998.
- [Strebel et al. 1994] Strebel, H.; Schwarz, E.; Ortner, Ch.: Rückstandsströme in einem Verwertungsnetz der steirischen Grundstoff- und Investitionsgüterindustrie, in: Müll und Abfall, 12 (1994), H. 6, S. 313-330.
- [Strebel et al. 1998] Strebel, H.; Schwarz, E.: Kreislaforientierte Unternehmenskooperation: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetzwerke. München: Oldenburg, 1998.
- [Strunk 2001] Strunk, P.: ... und der Zukunft zugewandt, in: Spektrum der Wissenschaft, 2001 (2001), H. 2, S. 86-91.
- [Sutter 1976] Sutter, H.: Computergestützte Produktionsplanung in der chemischen Industrie. Berlin: Erich Schmidt, 1976.
- [Swoboda 2003] Swoboda, B.: Kooperation: Erklärungsperspektiven grundlegender Theorien, Ansätze und Konzepte im Überblick, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 35-64.
- [Sydow 1992] Sydow, J.: Strategische Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 1992.

- [Tamásy 1997] Tamásy, C.: Technologie- und Gründerzentren in der Bundesrepublik - eine Bilanz, in: Spektrum der Wissenschaft, 1997 (1997), H. 10, S. 112-114.
- [Taylor 2002] Taylor, D. M.: Nuclear's role in Europe's energy future. London: Paper presented for the SMI conference on "Nuclear Power" in London, January 2002.
- [Tchobanoglous et al. 1993] Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S.: Integrated Waste Management: Engineering principles and management issues. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [Thelen 1993] Thelen, E.: Die zwischenbetriebliche Kooperation: ein Weg zur Internationalisierung von Klein- und Mittelbetrieben?. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1993.
- [Thomzik et al. 2003] Thomzik, M.; Looock, J.: Kooperation zwischen Handwerk und Stadtwerken als Option zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 53 (2003), H. 12, S. 830-832.
- [Tietz et al. 1979] Tietz, B.; Methieu, G.: Das Kontraktmarketing als Kooperationsmodell. Köln: Heymann, 1979.
- [Tietze-Stöckinger et al. 2003a] Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.; Rentz, O.: Entsorgerparks als Instrument zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Entsorgungsunternehmen, in: Müll und Abfall, 35 (2003), H. 12, S. 626-634.
- [Tietze-Stöckinger et al. 2003b] Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.; Rentz, O.: Entwicklung und Einsatz eines optimierenden Stoffflussmodells für die strategische Planung der betriebsübergreifenden Entsorgung, in: Inderfurth, K.; Schenk, M.; Wäscher, G.; Ziems, D.: Logistikplanung und Management, Tagungsband zur 9. Magdeburger Logistiktagung, 2003, S. 30-45.
- [Tietze-Stöckinger et al. 2004a] Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.; Rentz, O.: A Model to Minimise Joint Total Costs for Industrial Waste Producers and Waste Management Companies, in: Waste Management & Research, 22 (2004), H. 6, S. 466-476.
- [Tietze-Stöckinger et al. 2004b] Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.; Rentz, O.: Integrated transport, storage capacity and investment planning in the context of co-operation between waste producers and disposal enterprises, in: International Journal of Integrated Supply Management, 1 (2004), H. 2, S. 199-218.
- [Tietze-Stöckinger et al. 2004c] Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.; Rentz, O.: Techno-ökonomische Analyse einer Kooperation zur Errichtung und zum Betrieb eines Gemeinschaftsheizkraftwerks, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, 28 (2004), H. 3, S. 201-208.
- [Tietze-Stöckinger et al. 2004d] Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.; Rentz, O.: The Potential of Disposal Parks for Industrial Waste Management, in: Proceedings of GRONEN Research Workshop 2004 - Research on Advanced Environmental Management: Capabilities and Opportunities, 2004, S. 1-25 (separate Zählung).
- [Tietze-Stöckinger et al. 2004e] Tietze-Stöckinger, I.; Fichtner, W.; Rentz, O.: *Kurzbeschreibung PERSEUS-MUM und ausgewählte Ergebnisse*. Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), 2004.
- [Toth et al. 1999] Toth, P.; Vigo, D.: A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problems with backhauls, in: European Journal of Operational Research, 113 (1999), S. 528-543.
- [Tröndle 1987] Tröndle, D.: Kooperationsmanagement. Bergisch Gladbach: Josef Eul, 1987.

- [van der Voort et al. 1984] van der Voort, E.; Donni, E.; Thonet, C.; Bois D'Enghien, E.; Dechamps, C.; Guilmot, J. F.: Energy Supply Modelling Package, EFOM-12C Mark I, Mathematical Description. Louvain-La-Neuve: 1984.
- [VDEW 2004a] Verband der Elektrizitätswirtschaft: Extreme Witterung 2003. Frankfurt a.M.: VDEW, 2004.
- [VDEW 2004b] Verband der Elektrizitätswirtschaft: Leistungsbilanz 2002/2003. Frankfurt a.M.: VDEW, 2004.
- [VDN 2003] Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW: TransmissionCode 2003. Berlin: VDN, 2003.
- [Vidal et al. 1997] Vidal, C. J.; Goetschalckx, M.: Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models, in: European Journal of Operational Research, 98 (1997), H. 1, S. 1-18.
- [Vidal et al. 2000] Vidal, C. J.; Goetschalckx, M.: Modeling the Effect of Uncertainties on Global Logistics Systems, in: Journal of Business Logistics, 21 (2000), H. 1, S. 95-120.
- [Vidal et al. 2001] Vidal, C. J.; Goetschalckx, M.: A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation, in: International Journal of Production Economics, 129 (2001), S. 134-158.
- [Vögele 2000] Vögele, S.: DIOGENES - Ein gesamtwirtschaftliches Modell zur Analyse von Energie- und Umweltpolitiken, Berichte des FZJ 3819, Forschungszentrum Jülich, 2000.
- [Vorbach 1998] Vorbach, S.: Analyse zwischenbetrieblicher Verwertungsmöglichkeiten, aufgezeigt anhand ausgesuchter Beispiele, in: Strebel, H.; Schwarz, E.: Kreislaufforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetzwerke. München: Oldenbourg, 1998, S. 223-250.
- [Vornhusen 1994] Vornhusen, K.: Die Organisation von Unternehmenskooperationen. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 1994.
- [Wagner 1999] Wagner, E.: Pumpspeicher-Kraftwerke: Einsatz und Betriebsergebnisse, in: Bulletin SEV/VSE, 2/99 (1999), S. 19-23.
- [Walter 1998] Walter, A.: Der Beziehungspromotor: ein personaler Gestaltungsansatz für ein erfolgreiches Relationship Marketing. Wiesbaden: Gabler, 1998.
- [Weinhardt et al. 2000] Weinhardt, C.; Zuber, P.; Göbelt, M.; Fichtner, W.; Wietschel, M.; Rentz, O.: A Competition-Model for the Electricity Sector: From an OR Approach to a Multi-Agent System. Workshop 2000 - Agent-based Simulation, May 2-3, 2000.
- [Wetjen 2003] Wetjen, R.: Kooperation als Wettbewerbsfaktor, in: Newsletter Stadtwerke 2003, 7. Euroforum-Jahrestagung. Hamburg: Ernst & Young, 2003, S. 8.
- [Wietschel 1995] Wietschel, M.: Die Wirtschaftlichkeit klimaverträglicher Energieversorgung. Berlin: Erich Schmidt, 1995.
- [Wietschel 2000] Wietschel, M.: Produktion und Energie: Planung und Steuerung industrieller Energie- und Stoffströme. Frankfurt a.M.: Peter Lang, 2000.
- [Wietschel et al. 1997a] Wietschel, M.; Ardone, A.; Mollenkopf, C.; Rentz, O.: Konzeption und Anwendung eines Stoffflußmodells zur Entwicklung ökonomisch effizienter Minderungsstrategien für Ozon-Vorläufersubstanzen, in: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 57 (1997), S. 373-378.

- [Wietschel et al. 1997b] Wietschel, M.; Rentz, O.; Ardone, A.; Fichtner, W.; Lüth, O.; Schöttle, H.: PERSEUS: Modellentwicklungsstand, Anwendungsfälle und Perspektiven, in: Hake, J.-F.; Markewitz, P.: Modellinstrumente für CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien, Konferenzband 42003 (IKARUS-Schriften). Jülich: Forschungszentrum, 1997, S. 223-240.
- [Wietschel et al. 1999] Wietschel, M.; Balduf, J.; Schöttle, H.; Rentz, O.: Least-Cost Planning und Contracting im liberalisierten Markt: Chancen und Risiken, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 49 (1999), H. 5, S. 318-323.
- [Wietschel et al. 2000a] Wietschel, M.; Fichtner, W.; Rentz, O.: Zur Theorie und Praxis von regionalen Verwertungsnetzwerken, in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 29 (2000), H. 10, S. 568-574.
- [Wietschel et al. 2000b] Wietschel, M.; Rentz, O.: Verwertungsnetzwerke im Vergleich zu anderen Unternehmensnetzwerken, in: Liesegang, D. G.; Sterr, Th.; Ott, Th.: Aufbau und Gestaltung regionaler Stoffstrommanagementnetzwerke, Heidelberg: IUWA, 2000, S. 36-48.
- [Wildemann 1996a] Wildemann, H.: Entsorgungsnetzwerke, in: Bellmann, K.; Hippe, A.: Management von Unternehmensnetzwerken: interorganisationale Konzepte und praktische Umsetzung. Wiesbaden: Gabler, 1996, S. 305-348.
- [Wildemann 1996b] Wildemann, H.: Entwicklungsstrategien für Zulieferunternehmen. München: TCW Transfer-Centrum, 1996.
- [Wildemann 1996c] Wildemann, H.: Management von Produktions- und Zuliefernetzwerken, in: Wildemann, H.: Produktions- und Zuliefernetzwerke. München: TCW Transfer-Centrum, 1996, S. 13-45.
- [Wildemann 1997] Wildemann, H.: Koordination von Unternehmensnetzwerken, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 67 (1997), H. 4, S. 417-439.
- [Williamson 1990] Williamson, O. E.: Die ökonomischen Institutionen des Kapitalismus. Tübingen: Mohr, 1990.
- [Wilson et al. 2001] Wilson, B. G.; Baetz, B. W.: Modeling Municipal Solid Waste Collection Systems Using Derived Probability Distributions, in: Journal of Environmental Engineering, 127 (2001), H. 11, S. 1031-1038.
- [Windeler 2001] Windeler, A.: Unternehmensnetzwerke: Konstitution und Strukturierung. Wiesbaden: Westdeutscher Verlag, 2001.
- [Winkler 1991] Winkler, R.: Konzeption und Bewertung technischer Entsorgungswege. Heidelberg: Physica, 1991.
- [Wißler 1997] Wißler, W.: Unternehmenssteuerung durch Gemeinkostenzuteilung - Eine spieltheoretische Untersuchung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1997.
- [Witte 1973] Witte, E.: Organisation für Innovationsentscheidungen. Göttingen: Schwartz, 1973.
- [Wurche 1994a] Wurche, S.: Strategische Kooperation: theoretische Grundlagen und praktische Erfahrungen am Beispiel mittelständischer Pharmaunternehmen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1994.
- [Wurche 1994b] Wurche, S.: Vertrauen und ökonomische Rationalität in kooperativen Interorganisationsbeziehungen, in: Sydow, J.: Management interorganisationaler Beziehungen: Vertrauen, Kontrolle und Informationstechnik. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1994, S. 142-159.
- [Zaltman et al. 1973] Zaltman, G.; Duncan, R.; Holbeck, J.: Innovations and Organizations. New York: John Wiley & Sons, 1973.

- [Zentes et al. 2001] Zentes, J.; Swoboda, B.: Grundbegriffe des Marketing - Marktorientiertes globales Management-Wissen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2001.
- [Zentes et al. 2003a] Zentes, J.; Morschett, D.: Vertikale und horizontale Online-Kooperationen im Vertrieb, in: Büttgen, M.; Lücke, F.: Online-Kooperationen. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 223-248.
- [Zentes et al. 2003b] Zentes, J.; Schramm-Klein, H.: Exogene und endogene Einflussfaktoren der Kooperation, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 257-276.
- [Zentes et al. 2003c] Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke - Grundlagen, "Metaanalyse" und Kurzaufsatz, in: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Wiesbaden: Gabler, 2003, S. 3-32.
- [Zhang et al. 1998] Zhang, Z.; Folmer, H.: Economic modelling approaches to cost estimates for the control of carbon dioxide emissions, in: Energy Economics, 20 (1998), H. 1, S. 101-120.
- [ZuG 2007] Gesetz über den nationalen Zuteilungsplan für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 bis 2007 (Zuteilungsgesetz 2007 -ZuG 2007), 2004.
- [ZuV 2004] Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen (Zuteilungsverordnung), 2004.