

Band 8 _ PRODUKTION UND ENERGIE

Marius Wunder

INTEGRATION NEUER TECHNOLOGIEN
DER BITUMENKALTHANDHABUNG IN
DIE VERSORGUNGSKETTE



Scientific
Publishing

Marius Wunder

**Integration neuer Technologien
der Bitumenkalthandhabung in
die Versorgungskette**

PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

Band 8

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buches.

Integration neuer Technologien der Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette

von
Marius Wunder

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 2014
Referenten: Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann
Prof. Dr.-Ing. Bernd Kochendörfer

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 2194-2404

ISBN 978-3-7315-0319-4

DOI 10.5445/KSP/1000044915

Integration neuer Technologien der Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Wirtschaftswissenschaften

(Dr. rer. pol.)

von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dr.-Ing. Marius Wunder

Tag der mündlichen Prüfung: 26. November 2014

Referent: Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kochendörfer

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg	2
2 Bitumen als Asphaltbindemittel	5
2.1 Der Baustoff Bitumen	5
2.1.1 Die Einordnung von Bitumen in die Asphaltbindemittel	6
2.1.1.1 Bitumenhaltige Bindemittel und Normung	7
2.1.1.2 Alternative Bindemittel.....	8
2.1.2 Bitumenspezifikation	9
2.2 Bitumenherstellung.....	10
2.2.1 Herstellungsprozess von Bitumen aus Rohölen	10
2.2.2 Hersteller und Produktionsmengen.....	12
2.2.2.1 Die Strukturen in der Bitumenproduktion.....	12
2.2.2.2 Historische Entwicklungen auf dem Bitumenmarkt	14
2.2.2.3 Bitumenproduktionsmengen im Kontext der Ein- und Ausfuhrmengen.....	15
2.2.3 Tendenzen und Prognosen für die Bitumenproduktion	16
2.3 Bitumenlogistik und Betrachtungsrahmen	18
2.3.1 Bitumenlogistik zwischen Raffinerie und Asphaltmischanlage	19
2.3.2 Funktion und Aufbau von Bitumentanks.....	19
2.3.3 Tankkraftwagen als Standardtransportmittel	22
2.3.4 Tendenzen und Prognosen für die weltweite Bitumenlogistik..	23
2.4 Asphaltproduktion und -markt	23

2.4.1	Asphaltmischanlagen und Herstellungsprozess	24
2.4.2	Schnittstellen zur Bitumenkalthandhabung	25
2.4.3	AsphaltHersteller und Produktionsmengen	26
2.4.4	Tendenzen und Ausblick auf die zukünftige Asphaltproduktion	27
2.5	Auswirkungen von Veränderungen in Bitumen- und Asphaltproduktion bzw. -distribution	29
3	Sicherungsinstrumente in der Bitumenversorgung.....	33
3.1	Preisabsicherung beim Bitumeneinkauf	33
3.1.1	Grundlagen zur einkaufsseitigen Preisabsicherung.....	34
3.1.2	Absicherung mittels Forwards	35
3.1.3	Absicherung mittels Futures	36
3.1.3.1	Future Cross-Hedges.....	36
3.1.3.2	Future Composite-Hedges	37
3.1.4	Optionen und Swaps zur Bitumenpreisabsicherung	37
3.1.5	Bewertung einkaufsseitiger Versorgungssicherungsinstrumente	38
3.2	Physische Bitumenversorgungssicherung	39
3.2.1	Grundlagen zur physischen Absicherung	40
3.2.2	Konventionelle Bitumenheißlagerung	41
3.2.2.1	Lagerung in der Raffinerie.....	42
3.2.2.2	Lagerung in Tanklagern.....	42
3.2.2.3	Lagerung in Asphaltmischanlagen.....	42
3.2.3	Bitumenkaltlagerung mit anschließender Wiederverflüssigung	43
3.2.4	Sonderformen der physischen Versorgungssicherung	44
3.2.4.1	Lagerschiffe im Kontext der internationalen Versorgung	44
3.2.4.2	Versorgungssicherung mittels alternativer Bindemittel	44
3.2.5	Bewertung der physischen Versorgungssicherungsinstrumente	45

3.3	Diskussion Bitumenversorgungssicherungsinstrumente und Ausblick..	46
4	Technologien der Bitumenkalthandhabung.....	47
4.1	Technologien der Stoffabfüllung und Lagerung.....	48
4.1.1	Bitumenverpackungsarten.....	48
4.1.1.1	Fässer.....	51
4.1.1.2	Polycube®.....	51
4.1.1.3	Strabox.....	53
4.1.2	Abfüllanlagen.....	54
4.1.3	Bitumenkaltlager.....	55
4.2	Technologien der Wiederverflüssigung.....	56
4.2.1	Konventionelle Anlagentypen.....	57
4.2.1.1	Verflüssigung mittels Fassschmelzern.....	57
4.2.1.2	Verflüssigung mittels Schmelztöpfen.....	58
4.2.1.3	Grenzen konventioneller Technologien.....	59
4.2.2	Verflüssigung mittels Hochfrequenztechnologie.....	59
4.3	Auswahl der Kalthandhabungstechnologien unter technischen Gesichtspunkten.....	60
5	Ökonomische Bewertung von Technologien der Bitumenhandhabung.....	65
5.1	Methoden zur Investitions- und Kostenschätzung.....	65
5.1.1	Methoden zur Investitionsschätzung.....	67
5.1.1.1	Summarische Verfahren der Investitionsschätzung.....	67
5.1.1.2	Zuschlagsfaktormethoden.....	69
5.1.1.3	Detaillierte Einzelermittlung.....	70
5.1.2	Methoden zur Vorausbestimmung der Kosten nach Kostenarten.....	71
5.1.2.1	Investitionsabhängige Kostenarten.....	71
5.1.2.2	Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten.....	73
5.1.2.3	Personalkosten.....	73
5.1.2.4	Sonstige Kosten und Folgekosten.....	73
5.1.3	Transport- und Lagerkosten.....	74

5.2	Anwendung der Bewertungsmethoden auf ausgewählte Technologien der Bitumenkalthandhabung.....	74
5.2.1	Investitionsschätzung mittels detaillierter Einzelermittlung und Größendegressionsansatz.....	78
5.2.2	Investitionsabhängige Kostenarten	80
5.2.3	Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten inklusive Verpackungskosten	83
5.2.4	Personalkosten	87
5.2.5	Sonstige Kosten, Folgekosten und Erlöse.....	90
5.2.6	Transportkosten	91
5.2.7	Lagerkosten	91
5.2.7.1	Abschätzung von Heißlagerkosten	92
5.2.7.2	Abschätzung von Kaltlagerkosten	95
5.2.7.3	Diskussion von Heiß- und Kaltlagerkosten	98
5.3	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung.....	98
5.3.1	Kombination von Technologien der Asphaltbindemittellogistik	99
5.3.2	Analyse der Sensitivität der Technologiekombinationen auf relevante Parameter.....	103
5.4	Überführung der Kostendaten in Kostenfunktionen.....	111
5.4.1	Kostenfunktionen von Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden	113
5.4.2	Kostenfunktionen von Technologiekombinationen mit Kartongebinden	115
5.5	Zusammenfassung der ökonomischen Bewertung von Bitumenkaltlogistikketten.....	116
6	Technologieintegration in die Asphaltbindemittellogistik.....	119
6.1	Methoden zur Standort- und Kapazitätsplanung	120
6.1.1	Ansätze der Standortplanung	120
6.1.2	Kriterien der Standortentscheidung	122
6.1.2.1	Quantitative Standortfaktoren.....	122
6.1.2.2	Qualitative Standortfaktoren	123

6.1.3	Typen von Standortproblemen.....	123
6.1.3.1	Standortbestimmung in der Ebene	124
6.1.3.2	Standortbestimmung in Netzen	125
6.1.3.3	Diskrete Standortwahl	125
6.1.4	Stand der Standort- und Kapazitätsplanung von Technologien der Bitumenkalthandhabung	126
6.2	Graphische Darstellung der Bitumenversorgungsketten	129
6.2.1	Derzeitige Bitumenversorgungskette	129
6.2.2	Die zu implementierende Versorgungskette.....	131
6.3	Beschreibung des Modells.....	133
6.3.1	Anforderungsprofil des Planungsmodells	133
6.3.1.1	Anforderungen an das Modell	133
6.3.1.2	Anforderungen bei der Modellformulierung.....	134
6.3.1.3	Berücksichtigte Datensätze.....	135
6.3.2	Der diskrete Lösungsraum	136
6.3.2.1	Analyse der Standorte	136
6.3.2.2	Weitere Eingrenzung der Problemstellung	138
6.4	Formulierung des Modells.....	139
6.4.1	Modellkonventionen	139
6.4.1.1	Indexmengen	139
6.4.1.2	Entscheidungsvariablen	141
6.4.1.3	Parameter der Zielfunktion und der Nebenbedingungen	144
6.4.2	Zielfunktion	147
6.4.2.1	Material- und Transportkosten	148
6.4.2.2	Lager- und Verpackungskosten.....	150
6.4.2.3	Verflüssigungskosten	152
6.4.3	Nebenbedingungen	153
6.5	Implementierung des Kapazitäts- und Standortmodells in GAMS ..	159
6.5.1	Allgemeine Implementierungsspezifika	159
6.5.2	Modellspezifikation für ein Unternehmen.....	160

6.6	Modellergebnisse	164
6.6.1	Technologie- und Standortwahl in Abhängigkeit der Preisdaten	166
6.6.1.1	Historische Preisdaten (Basiskonfigurationen).....	166
6.6.1.2	Fiktive Preisdaten	169
6.6.2	Technologie- und Standortwahl bei unterschiedlichen Bedarfsdaten	173
6.6.2.1	Bitumen 70/100.....	174
6.6.2.2	Straßenbaubitumen.....	175
6.6.2.3	Alle bituminösen Bindemittel	176
6.6.3	Modellvariation	178
6.6.3.1	Variation der Lieferantenrestriktion	178
6.6.3.2	Variation der Mindestlagermenge	180
6.6.4	Kombination von Parametervariationen.....	182
6.7	Abschließende Betrachtung der Ergebnisse	184
6.7.1	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse	185
6.7.2	Diskussion der Berechnungsergebnisse	190
6.7.2.1	Empfehlungen.....	190
6.7.2.2	Einschränkungen.....	191
6.7.3	Ausblick auf Entwicklungsmöglichkeiten des Modells	192
7	Ökologische Bewertung von Methoden der Bitumenhandhabung	195
7.1	Grundlegendes zur Ökobilanzierung.....	195
7.2	Stand der ökologischen Bewertung in der Asphaltindustrie	197
7.3	Stand der ökologischen Bewertung von Asphaltbindemitteldistributionssträngen	197
7.4	Methoden zur ökologischen Bewertung.....	198
7.4.1	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	199
7.4.2	Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS-Indikator).....	199
7.4.3	Konzept der Wirkungsindikatoren (CML-Methode)	200
7.4.4	Ökologische Knappheit (Umweltbelastungspunkte)	201
7.4.5	Eco-Indicator (EIP)	202

7.4.6	Ökoeffizienzanalyse (BASF).....	202
7.5	Ökobilanzierungssoftware.....	203
7.5.1	Die Datenbank Ecoinvent	204
7.5.2	ELCD	204
7.5.3	Umberto	205
7.6	Ökologische Bewertung der Bitumenkalthandhabungstechnologie	205
7.6.1	Ziel und Untersuchungsrahmen.....	206
7.6.2	Funktionelle Einheit und Betrachtungszeitraum.....	207
7.6.3	Erstellung der Sachbilanz.....	208
7.6.3.1	Die Bitumenversorgungskette mit Heißlagerung ..	211
7.6.3.2	Die Bitumenversorgungskette mit Kaltlagerung....	214
7.6.4	Durchführung der Wirkungsabschätzung.....	217
7.6.4.1	Auswirkungen der Bitumenheißhandhabung.....	218
7.6.4.2	Auswirkungen der Bitumenkalthandhabung.....	219
7.6.4.3	Gegenüberstellung der Handhabungsformen	221
7.7	Zusammenfassung der ökologischen Bewertung.....	222
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	223
9	Anhang	227
9.1	Bitumenspezifikationen.....	227
9.2	Bitumenhaltige Bindemittel neben Straßenbaubitumen	228
9.3	Bitumenspezifikation und genormte Prüfverfahren	232
9.4	Die Zusammensetzung von Bitumen	235
9.5	Parameter für die Standortplanung.....	239
9.6	Sachbilanz.....	244
	Literaturverzeichnis.....	251

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema der fünf Verfahrensschritte (oben) der Raffinerieproduktion von Erdölprodukten (eigene Darstellung gemäß [EV03])	11
Abbildung 2:	Raffinerieproduktionsmengen (2009) in tausend Tonnen und Raffinerie-Marktanteil in Prozent und die prozentuale Beteiligung der Betreiber- bzw. Mineralölfirmen [MWV11]	13
Abbildung 3:	Eigentümerstruktur der bitumenproduzierenden Raffinerien in Prozent in den Jahren 1998 und 2004 [MWV11]	15
Abbildung 4:	Bitumenverbrauchs-, Produktions- (*Bruttoraffinerieerzeugung), Ein- und Ausfuhrmengen von 2003 bis 2010 [MWV11]	16
Abbildung 5:	Prozessschritte der Bitumenhandhabung von der Rohölförderung zur Asphaltproduktion mit dem Betrachtungsrahmen dieser Arbeit.....	18
Abbildung 6:	Prinzipskizze eines Bitumentanks mit beschrifteten Komponenten (eigene Darstellung)	21
Abbildung 7:	Entwicklung der Asphaltproduktion in Deutschland [DAV11] ..	27
Abbildung 8:	Zunahme des RC-Anteil in der Asphaltproduktion in Deutschland seit 1982	28
Abbildung 9:	Gegenseitige Beeinflussung aktueller Trends im weltweiten Bitumensektor	30
Abbildung 10:	Räumlich gemittelte Bitumenpreise (Bitumen 70/100) in Deutschland von Januar 2007 bis März 2010.....	31
Abbildung 11:	Zweimonatige prozentuale Änderungen des Erzeugerpreisindex für Bitumen 70/100 ohne zeitliche Verschiebung und	

zweimonatige prozentuale Änderungen des Gasöl- Futurepreises (ICE; Datenquelle: Bloomberg, Statistisches Bundesamt)	39
Abbildung 12: Regionale Schwankungen der jeweils für die Monate gemittelten Bitumenpreise (Bitumen 70/100) ausgewählter Raffineriestandorte in 2010 aus Daten eines Unternehmens ...	41
Abbildung 13: Bituminöse Bindemittel in (links:) Schrumpffolie und (rechts:) silikonierten Kartons.....	43
Abbildung 14: Auswahlprozess von Technologiekombinationen für eine unternehmensspezifische Versorgungskette	47
Abbildung 15: Skizze der Elemente einer Abfüllanlage [Pö04][Pö05][Pö07][Pö08].....	55
Abbildung 16: Personal in Abhängigkeit der Jahresabfüllleistung.....	90
Abbildung 17: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Fässer und Verflüssigen im Fassschmelzer	105
Abbildung 18: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kunststoff und Verflüssigen im Fassschmelzer ..	106
Abbildung 19: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kunststoffgebinde und Verflüssigen im Schmelztopf.....	107

Abbildung 20: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kartongebinde und Verflüssigen im Fassschmelzer.....	108
Abbildung 21: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kartongebinde und Verflüssigen im Schmelztopf.....	109
Abbildung 22: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kartons und Verflüssigen im Mikrowellenofen .	110
Abbildung 23: Derzeitige Bitumenlogistik für die Asphaltproduktion in einer Periode als Digraph.....	130
Abbildung 24: Potentielle Bitumenlogistik für die Asphaltproduktion als Digraph.....	132
Abbildung 25: Alle Asphaltmischanalgenstandorte des Referenzunternehmens.....	162
Abbildung 26: Technologiestandorte bei der Zugrundelegung von historischen Preisszenarien links aus 2008 und rechts aus 2009.....	169
Abbildung 27: Erläuterung zur schrittweisen Erhöhung der Gesamtjahrespreissteigerung.....	170
Abbildung 28: Jährliche Gesamtkosten und jährliche Gesamtlagermenge an Straßenbaubitumen im Modell in Abhängigkeit von fiktiven Gesamtjahrespreisdifferenzen.....	172

Abbildung 29: Gesamtkostenzusammensetzung mit und ohne Kaltlagermöglichkeit in tausend Euro in der Basiskonfiguration des Modells für (links) 2008 und (rechts) 2009.....	186
Abbildung 30: Standortwahl für Bitumenkaltlagerung und Wiederverflüssigung in drei Expansionsstufen	189
Abbildung 31: Auswirkungen aus links Transport und rechts Lagerung in Eco- Indikator-Punkten.....	219
Abbildung 32: Auswirkungen aus den Verfahren der Bitumenkalthandhabung in Eco-Indikator-Punkten	220
Abbildung 33: Gegenüberstellung der ökologischen Auswirkungen von Bitumenheiß- und -kalthandhabung in tausend ECO-Indikator- 99-Punkten	221
Abbildung 34: Bestimmung der Nadelpenetration nach DIN EN 1426 [Ko08].....	233
Abbildung 35: Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN EN 1427 [Ko08].....	234

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Dichte, Gesamtschwefel und Paraffingehalt verschiedener Rohölprovenienzen [Hu98]	12
Tabelle 4-1:	Übersicht über Verpackungssysteme.....	49
Tabelle 4-2:	Kombinierbarkeiten von Verpackungsart und Verflüssigungstechnologie. Kunststoffgebinde benötigt eine Abfüllanlage	63
Tabelle 5-1:	Parametertabelle mit Relevanz für diese Arbeit und Referenz zum Abschnitt dieses Kapitels.....	66
Tabelle 5-2:	Zuordnung von Kosten zu Kategorien und Verfahrensschritten.....	77
Tabelle 5-3:	Gruppen von Kosten mit Bezugsgröße.....	78
Tabelle 5-4:	Zuschlagssätze der Investitionen für die Bitumenkalthandhabung in Euro	80
Tabelle 5-5:	Durchsatzleistung der hier verwendeten Referenzanlagen in Euro	82
Tabelle 5-6:	Berechnung der investitionsabhängigen Kosten in Euro	83
Tabelle 5-7:	Berechnung der investitionsabhängigen Kosten in Euro	83
Tabelle 5-8:	Kennzahlen der untersuchten Anlagentypen.....	84
Tabelle 5-9:	Parameter zur Berechnung der Energiekosten	84
Tabelle 5-10:	Berechnung des Energiepreises. *Eventuelle Rundungen in der Berechnung haben keine Auswirkung auf die im Folgenden berechneten Werte.	85
Tabelle 5-11:	Parameter zur Berechnung der Verpackungskosten.....	86

Tabelle 5-12:	Parameter zur Berechnung der Entsorgungskosten für Kunststoffverpackungen.....	87
Tabelle 5-13:	Parameter zur Berechnung der Entsorgungskosten für Kartonverpackungen	87
Tabelle 5-14:	Parameter zur Berechnung der Personalkosten	88
Tabelle 5-15:	Personalbedarf aus benötigter Anlagenzahl	89
Tabelle 5-16:	Parameter zur Berechnung der investitionsabhängigen Kosten der Tanklager.....	93
Tabelle 5-17:	Parameter zur Berechnung der Grundstückskosten (Investitionsabhängige Kosten für das Grundstück des Tanklagers)	93
Tabelle 5-18:	Parameter zur Berechnung der Energiekosten	94
Tabelle 5-19:	Kostenstruktur bei 6-monatiger Lagerung an einem Kaltlagerstandort (vgl. Berechnungen im Unterabschnitt 5.2.7.1)	96
Tabelle 5-20:	Parameter zur Berechnung der investitionsabhängigen Kosten der Tanklager.....	97
Tabelle 5-21:	Parameter zur Berechnung der Grundstückskosten (Investitionsabhängige Kosten für das Grundstück des Tanklagers)	98
Tabelle 5-22:	Annahmen für die Abschätzung der Stückkosten (€/t) in der jeweiligen Technologiekombination	100
Tabelle 5-23:	Stückkosten (ohne Transport- und Lagerkosten) in den jeweiligen Technologiekombinationen in Euro pro Tonne Bitumen.....	101
Tabelle 5-24:	Zusammensetzung der spezifischen Kosten anhand der Verfahrensschritte.....	102

Tabelle 5-25:	Investitionsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden	113
Tabelle 5-26:	Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden	114
Tabelle 5-27:	Personalkostenfunktionen in Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden	114
Tabelle 5-28:	Investitionsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kartongebinden.....	115
Tabelle 5-29:	Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kartongebinden.....	115
Tabelle 5-30:	Personalkostenfunktionen in Technologiekombinationen mit Kartongebinden.....	116
Tabelle 6-1:	Charakteristika integrierter Standort- und Kapazitätsplanungsmodelle gemäß [Sch12].....	128
Tabelle 6-2:	Standortfaktoren mit ihren jeweiligen Gewichtungen für die Standortanalyse zur Bestimmung des Lösungsraums hinsichtlich Kaltlagerstandorten und Schmelzanlagenstandorten	137
Tabelle 6-3:	Bewertung der Standorte mittels der Gewichtung der Tabelle 6-2.....	163
Tabelle 6-4:	Ergebnisse in der Basiskonfiguration ohne Lagerhaltung.....	166
Tabelle 6-5:	Ergebnisse in der Basiskonfiguration	167
Tabelle 6-6:	Ergebnisse bei Variation der Gesamtjahrespreissteigerungen	171
Tabelle 6-7:	Berechnung der jährlichen Gesamtkosten ohne Lagerhaltung.....	174
Tabelle 6-8:	Ergebnisse unter Berücksichtigung aller Straßenbaubitumen.	175

Tabelle 6-9:	Ergebnisse unter Berücksichtigung aller bitumenhaltigen Bindemittel.....	177
Tabelle 6-10:	Ergebnisse der Basiskonfiguration unter Weglassung der „Lieferantenrestriktion“	179
Tabelle 6-11:	Ergebnisse der Basiskonfiguration für $y = 0,5$ (mindestens zwei Lieferanten pro Lagerstandort).....	180
Tabelle 6-12:	Ergebnisse bei Variation der Mindestlagermenge in 2010.....	181
Tabelle 6-13:	Ergebnisse bei unterschiedlichen Bedarfsmengen für $y = 0,5$ (mindestens zwei Lieferanten pro Lagerstandort)	182
Tabelle 6-14:	Übersicht über die Berechnungsergebnisse.....	187
Tabelle 7-1:	Normierung des Eco-Indicators	207
Tabelle 7-2:	Daten [SpBaDoSch07] und Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz der Bitumentransporte und Leerfahrten	211
Tabelle 7-3:	Daten [St01][FrJuNiAlDoDoHe07] und Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz der Bitumenheißhandhabung	213
Tabelle 7-4:	Daten [Hi07-1][Hi07-2][Do09] und Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz der Bitumenkalthandhabung	215
Tabelle 7-5:	Bewertung der Bitumenheißhandhabung in Eco-Indikator-99-Punkten in den Wirkungskategorien.....	218
Tabelle 7-6:	Bewertung der Bitumenkalthandhabung in Eco-Indikator-99-Punkten in den Wirkungskategorien.....	220
Tabelle 9-1:	Straßenbaubitumen-Spezifikationen für die Sorten mit Penetrationen von $20 \times 0,1$ mm bis $220 \times 0,1$ mm gemäß DIN EN 12591 (2005).....	227
Tabelle 9-2:	Straßenbaubitumen-Spezifikationen für die Sorten mit Penetrationen von $250 \times 0,1$ mm bis $900 \times 0,1$ mm gemäß DIN EN 12591 (2005).....	227

Tabelle 9-3:	Straßenbaubitumen-Spezifikation – Weichbitumen: Bitumensorten, die nach ihrer kinematischen Viskosität bei 60 °C bezeichnet und spezifiziert werden gemäß DIN EN 12591 (2005)	227
Tabelle 9-4:	Durchschnittliche Verteilung der Hauptelemente im Bitumen [ReWh03]	236
Tabelle 9-5:	Durchschnittliche Verteilung der Moleküle im Bitumen und ihre Elementarverteilung [Va77][Th09]. Ca.-Angaben aufgrund Störeinfluss bei der Messung.....	237
Tabelle 9-6:	Gruppenanalyse von Bitumen [Va77].	238
Tabelle 9-7:	Distanzen zwischen den Asphaltmischanlagen in Kilometern .	239
Tabelle 9-8:	Distanzen von Raffineriestandorten zu Asphaltmischanlagen in Kilometern.....	241
Tabelle 9-9:	Distanzen zwischen den Tanklagerstandorten und den Asphaltmischanlagen in Kilometern	242
Tabelle 9-10:	Input bei Kalthandhabung mit Kartons	244
Tabelle 9-11:	Output bei Kalthandhabung mit Kartons	246
Tabelle 9-12:	Input bei Heißhandhabung	247
Tabelle 9-13:	Output bei Heißhandhabung	249

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Der Markt für Bitumen unterliegt einem ständigen Wandel. Vor allem durch neue Technologien innerhalb der Herstellungsphase und eine global wachsende Nachfrage intensivieren sich einige dieser Wandlungsprozesse in jüngster Zeit. So rückt angesichts großer zeitlicher und regionaler Preisunterschiede die Bitumenlogistik immer mehr in den Fokus.

Die Zunahme von Asphaltstraßenbauprojekten in infrastrukturell schwach entwickelten Ländern hat einerseits zur Folge, dass der Baustoff über größere Distanzen distribuiert werden muss. Andererseits wird das Bitumen witterungsbedingt auf den Binnenmärkten für den Asphaltstraßenbau nur saisonal nachgefragt. Dies verursacht saisonale Preisunterschiede. Zusätzlich unterliegt der Bitumenpreis einer nicht vorhersehbaren Volatilität. All dies hat zur Folge, dass einerseits nach Möglichkeiten gesucht wird, Bitumen zu niedrigen Preisen einzukaufen, um es an seinen Bestimmungsort zu transportieren und zu lagern (physische Versorgungssicherung) oder sich andererseits verschiedener Methoden zur Reduzierung des Preisrisikos beim Einkauf zu bedienen (einkaufsseitige Preissicherung). Hierzu werden beispielsweise Termingeschäfte oder derivative Absicherungsinstrumente genutzt. Sowohl physische als auch einkaufsseitige Absicherungsmethoden gilt es einer neuen Betrachtung und Diskussion zu unterziehen, da sich bei ersteren Entwicklungen ergeben haben, die im Folgenden dargelegt werden.

Für den Transport über gut erschlossene Verkehrswege und die Lagerung in vergleichsweise kurzen Zeiträumen gibt es bereits eine Vielzahl von konventionellen Technologien, um das thermoplastische Bitumen heißflüssig von der Herstellung bis zur Produktion bitumenhaltiger Baustoffe zu transportieren. Dieses Verfahren wird als Heißhandhabung bezeichnet. Das Herunterkühlen des Baustoffs wird dabei vermieden, um den Aufwand an Strom oder Brennstoffen beim Wiedererwärmen zu vermeiden. Diese Form der Lagerung erfordert zusätzlichen Energieeinsatz.

Bei längeren Transport- und Lagerzeiten ist es allerdings sinnvoll, das Bitumen kurz nach der Herstellung abkühlen zu lassen, um es ohne großen Energieaufwand transportieren und lagern zu können. Anschließend wird es wieder erwärmt und somit verflüssigt. Diese Verfahrensweise wird als Bitumenkaltlogis-

tik bezeichnet. Die verwendeten Technologien wie Bitumenabfüll- und Verflüssigungsanlagen sowie Bitumenverpackungen wurden in den letzten Jahren um innovative Systeme ergänzt, die den wachsenden Anforderungen der Bitumenlogistik unter ökonomischen Gesichtspunkten gerecht werden. Folglich existiert derzeit eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahrensweisen, die einerseits miteinander konkurrieren, sich aber andererseits auch teilweise miteinander kombinieren lassen. Sie werden hier als Technologiekombinationen bezeichnet. Die Auswahl der geeignetsten Technologiekombination unter Berücksichtigung der Randbedingungen der jeweiligen Bitumenversorgungskette ist eine Herausforderung.

Für die Versorgung von bitumenverarbeitenden Produktionsstätten stehen also nicht nur die Heiß- und Kaltlagerung von Bitumen, die auch unter technoökonomischen Gesichtspunkten kombiniert werden können, zur Verfügung. Es existiert auch eine Anzahl technisch unterschiedlicher Prozessketten innerhalb der Bitumenkaltlogistik, die möglicherweise kombiniert werden können, um die Versorgungskette einzelner Unternehmen gemäß dem jeweiligen Anwendungsfall weiter zu verbessern. Dies schließt also neben der Auswahl der Technologiekombinationen eine Standortauswahl und eine Dimensionierung der Kapazitäten für Anlagen und Lagerung mit ein. Die Entwicklung einer Methode zur integrierten Auswahl von Technologiekombinationen, Standorten und Kapazitäten für die Bitumenhandhabung ist nicht trivial und wurde bisher noch nicht vorgenommen.

Die Frage, die mit einer solchen Methode beantwortet werden könnte, ist, wie und unter welchen Randbedingungen in der Praxis die Methoden der Bitumenhandhabung im jeweiligen Anwendungsfall kombiniert werden müssen, um die Bitumenversorgung zu niedrigen und planbaren Kosten sicherzustellen. Dabei müssen auch einkaufsseitige Absicherungsinstrumente in die Überlegungen zur Versorgungssicherung einbezogen werden, um mit ihnen gegebenenfalls die physische Versorgungssicherung zu ergänzen. Wenn geeignete Verfahren der Bitumenversorgung ermittelt worden sind, ist es von Interesse, auch die ökologischen Auswirkungen einiger Verfahrensketten der Bitumenlogistik zu vergleichen. Auch dies wurde bisher noch nicht unter Einbeziehung neuer Technologiekombinationen der Bitumenkaltlogistik durchgeführt, kann aber dazu dienen, die optimale Ausgestaltung der Bitumenversorgungskette zu unterstützen.

1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Die Arbeit dient der Beantwortung der folgenden drei Kernfragen:

- Sind Kombinationen der neu- bzw. weiterentwickelten Systeme der Bitumenkalthandhabung wirtschaftlicher als existierende Verpackungen und Verflüssigungsanlagen?
- Unter welchen Randbedingungen (insbesondere saisonalen Preisunterschieden) erweist sich die Kaltlagerung (mit entsprechender Handhabung) unter ökonomischen Gesichtspunkten als sinnvoller als die Heißhandhabung mit oder ohne Heißlagerung?
- Können Methoden der physischen Bedarfsdeckung gegen Preisabsicherungsinstrumente beim Kauf, also einkaufsseitige Absicherungsmethoden wie Termingeschäfte konkurrieren?

Hieraus ergibt sich wiederum eine Anzahl von weiteren Fragen, denen in der Arbeit nachgegangen wird.

- Welche Verpackungs- und Verflüssigungstechnologien lassen sich zu Technologiekombinationen zusammenschließen?
- Welche Einsparpotentiale lassen sich konkret durch die Integration der neuen Technologien realisieren?
- Welche der einkaufsseitigen Absicherungsmethoden ist für die Preisabsicherung für Bitumen geeignet?
- Wie sind die ökologischen Auswirkungen der Heiß- und Kalthandhabung im Vergleich?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird zunächst in Kapitel 2 die Ausgangssituation dargestellt. Es werden der Baustoff Bitumen, seine spezifischen Eigenschaften, seine Anwendungsformen, der Bitumen- und der Asphaltmarkt und die Versorgungskette der Asphaltproduktion als wichtigster Zweig der bitumenverarbeitenden Betriebe und damit die konventionellen Methoden des Transports und der Lagerung vorgestellt.

Im Weiteren werden im Kapitel 3 die Absicherungsmethoden gegen die Preisunsicherheit auf den Bitumenmärkten in ihren Grundzügen dargelegt. Dabei werden sowohl Methoden der einkaufsseitigen Preissicherung als auch Methoden der physischen Versorgungssicherung durch Lagerung vorgestellt und diskutiert.

Die Technologien der Bitumenkalthandhabung werden in Kapitel 4 vorgestellt. Dabei handelt es sich um die Technologien der Bitumenabfüllung und -lagerung

und um die Technologien der Wiederverflüssigung. Hier wird deutlich, wie die in Kapitel 2 beschriebenen speziellen Materialeigenschaften des Bitumens die technische Komplexität der Kalthandhabung verursachen. Mittels der bereits vorhandenen Erkenntnisse wird am Ende des Kapitels 4 dargestellt, welche der genannten Technologien sich gemeinsam verwenden und somit zu Technologiekombinationen zusammenfassen lassen. Diese Technologiekombinationen sind ein Hilfsmittel, um die in Kapitel 5 vorgestellten Kosten der Einzelverfahren zu Kosten der Verfahrensketten der Bitumenlogistik zusammenzufassen. Die Auswirkungen der hierbei getroffenen Annahmen werden mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse eruiert.

Um eine Aussage über die geeignetste Technologiekombination der Bitumenhandhabung, Standorte und Kapazitäten für eine spezifische Versorgungskette treffen zu können, wird in Kapitel 6 ein Modell entwickelt, in das die Ergebnisse des Kapitels 5 einfließen. Daher erfolgt eine Überführung der zuvor berechneten Kosten in die Parameter eines mathematischen Optimierungsmodells, das im nächsten Schritt dazu dient, die jährlichen Gesamtkosten für die Bitumenversorgung eines Unternehmens durch geeignete Technologie-, Standort- und Kapazitätswahl zu minimieren.

Die als ökonomisch vorteilhaft ermittelten Handhabungsmethoden der Bitumenkalthandhabung werden abschließend in Kapitel 7 im Rahmen einer ökobilanziellen Betrachtung unter umweltrelevanten Gesichtspunkten mit den Methoden der Heißbitumenhandhabung verglichen.

Die Analyse der in der Arbeit ermittelten Ergebnisse dient der Herleitung und Untermauerung einer abschließenden Handlungsempfehlung für bitumenverarbeitende Betriebe in Kapitel 8. Ziel dieser Empfehlung ist es, die Senkung der Kosten und die sichere Versorgung mit Bitumen zu erleichtern.

2 Bitumen als Asphaltbindemittel

Bitumen ist das Bindemittel im Asphalt. Der Bitumenanteil des Straßenbauasphalts beträgt nur zirka vier bis acht, im Mittel fünf Masseprozent [HuWö10]. Die Einzelkörner eines aus Gesteinskörnungen bestehenden Gemisches werden dabei durch Bitumen zu einem dauerhaft verbundenen Material verkittet [StKr05]. Bitumen- und Asphaltvorkommen finden sich auch in der Natur und stellen somit die ältesten Baustoffe der Menschheit dar [BP89]. So schreibt beispielsweise Cassius Dio über den Bitumeneinsatz zirka 3200 v. Chr. in Mesopotamien (teilweise heutiger Irak): *„Dort in Babylon sah Trajan den Asphalt, mit dem man die Mauern gebaut hat, denn zusammen mit Ziegeln oder Kies gibt er ein so festes Material, dass man Mauern damit errichten kann, die stärker sind als Felsen und alle Art Eisen.“* [Sch01][HuWö10]. Heute kommt das Kuppelprodukt der Erdölraffinerien Bitumen neben seinem Einsatz als Asphaltbindemittel („Asphaltbinder“) auch in vielen anderen Bereichen der Technik und sogar der Medizin zum Einsatz.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf die Logistik von Bitumen als Asphaltbindemittel gelegt. Die Materialeigenschaften des Bitumens, wie Attention und thermoplastisches Verhalten bzw. seine niedrige Wärmeleitfähigkeit, die es als Baustoff geeignet machen, verursachen zugleich die größten technischen Probleme bei der Bitumenkaltlogistik. Um das Materialverhalten des Bitumens zu verdeutlichen, wird daher in diesem Kapitel zunächst der Baustoff hinsichtlich seiner Spezifikation, Normung und Zusammensetzung in Abschnitt 2.1 vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 die Bitumenherstellung beschrieben. Abschnitt 2.3 befasst sich mit der derzeit üblichen Bitumenheißlogistik zwischen den Raffinerien und den Asphaltmischanlagen. Mit der Asphaltproduktion befasst sich Abschnitt 2.4. Abschließend wird in Abschnitt 2.5 auf mögliche Auswirkungen des Zusammenspiels vorher genannter technischer und ökonomischer Tendenzen im Bereich der Asphalt- und Bitumenproduktion sowie -distribution eingegangen.

2.1 Der Baustoff Bitumen

Bitumen ist ein dunkelfarbiges, schwerflüchtiges, komplexes Gemisch verschiedener organischer Substanzen von unterschiedlichem Siedepunkt [Sch01]. Bitumen wird größtenteils aus Erdölen gewonnen. Zur Entstehung sowie zum Entstehungszeitraum der Erdöle gibt es unterschiedliche Theorien. So ist in „Das Buch vom Erdöl“ (vgl. [BP89]) von einer Entstehung im geologisch tertiä-

ren Zeitraum vor zirka 65 Millionen Jahren und einem wesentlichen Einfluss von Sauerstoff auf die Erdölbildung die Rede:

„Die fossilen Ablagerungen wurden nicht nur auf der Erdoberfläche oder in tieferen Erdschichten, sondern auch an den Meeresoberflächen in Form des zahlreichen Planktons mit meist tonigem Sediment vermischt und unter Sauerstoff- und Bakterieneinfluss oxidiert“ [Th09][BP89].

Wolfrab hingegen führt zu einer Entstehung im Miozän, vor rund 10–15 Millionen Jahren, Folgendes aus:

„Die Sedimentschichten verwehrten dem im Meereswasser gelösten Sauerstoff den Zutritt, so dass die organische Materie nicht verwesen konnte. Unter dem Einfluss von anaeroben Bakterien, hohem Druck und Hitze und wahrscheinlich auch dem katalytischen Einfluss des umgebenden Gesteins, vollzogen sich in der organischen Substanz reduktive Prozesse, durch die sich im Laufe der Jahrmillionen das Erdöl bildete“ [Wo09]

Tatsache ist, dass nur ein bestimmter Prozentsatz der Rohöle „bitumenfähig“ ist [Le02]. Das heißt, es besteht nur bei zirka 10 % der Rohöle auf Grund ihrer Zusammensetzung die Möglichkeit, Bitumen aus dem Rohöl zu gewinnen [Hö10]. In diesem Abschnitt wird allerdings nur auf die Klassifikation (Abschnitt 2.1.1) und die Bitumenprüfung (Abschnitt 2.1.2) eingegangen. Auf die Bestandteile des Bitumens und der benötigten Rohöle wird lediglich im Anhangkapitel 9.3 und Anhangkapitel 9.4 dieser Arbeit eingegangen.

2.1.1 Die Einordnung von Bitumen in die Asphaltbindemittel

Bindemittel im Straßenbau können bitumenhaltig (Asphaltstraßenbau) oder mineralischen Ursprungs sein (Bsp. Zement im Betonstraßenbau). Hier wird lediglich auf bitumenhaltige Bindemittel im Asphaltstraßenbau eingegangen. „Bituminöse Bindemittel“ war ein früherer Sammelbegriff für Bitumen-, Straßenpech (bisher Straßenteer-) und Bitumen-Pech-(Teer-)Gemische [StKr05]. Aufgrund der krebserzeugenden Wirkung heißer Teerdämpfe wird Teer bei der Herstellung von Asphalt seit Anfang der 1980er Jahre nicht mehr angewandt und ist vollständig durch Bitumen ersetzt worden [BrSchRü10]. Daher ist der Begriff „bituminös“ wegen der unklaren Aussage bezüglich des Bindemittels entfallen [StKr05]. Als Asphalt darf auch nur noch solches Material bezeichnet werden, das Bitumen oder bitumenhaltiges Bindemittel enthält [StKr05]. Auch bei dieser Begriffsbestimmung wird in nächster Zeit eine Definitionsänderung zu erwarten sein. So kann damit gerechnet werden, dass alternative Bindemittel

tel (vgl. [ORF10]) eine immer größere Bedeutung gewinnen werden. Nicht zuletzt deshalb wird hier zunächst eine Unterteilung in bitumenhaltige und alternative Bindemittel vorgenommen.

2.1.1.1 Bitumenhaltige Bindemittel und Normung

Annähernd alle Bitumenprodukte unterliegen einer internationalen Normung. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl genormter Prüfverfahren zur Klassifizierung von Normbitumen. Auf die genormten Prüfverfahren zur Spezifikation bitumenhaltiger Bindemittel wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen. Hier wird zunächst eine gängige Möglichkeit der Einteilung von bitumenhaltigen Asphaltbindemitteln dargestellt.

Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel werden bei Straube und Krass [StKr05] unterteilt in:

- Straßenbaubitumen (Destillationsbitumen) gemäß DIN EN 12591
- Fluxbitumen
- Bitumenemulsion gemäß DIN EN 13808
- Kaltbitumen gemäß DIN 1995-4
- Polymermodifiziertes Bitumen (PmB) gemäß DIN EN 14023 und TL (Technischer Leitfaden) PmBO und TL PmBE-DSK
- Hartbitumen (Hochvakuumbitumen)
- Oxidationsbitumen

Diese Aufzählung wird hier durch Gummibitumen, Naturasphalte und Mischformen vervollständigt.

Straßenbaubitumen entsteht als Kuppelprodukt in den Raffinerieprozessen und stellt die häufigste Anwendungsform des Destillationsrückstands der Erdöldestillation dar. Es wird deshalb auch als Destillationsbitumen bezeichnet. Straßenbaubitumen werden in Sorten nach der minimal beziehungsweise maximal zulässigen Nadelpenetration bei 25°C eingeteilt und bezeichnet [StKr05]. Tabelle 9-1 bis Tabelle 9-3 des Anhangkapitels 9.1 stellen die Sorten und ihre Eigenschaften nach DIN EN 12591 dar. Beim Penetrationstest wird mit einer Normnadel über einen Zeitraum von fünf Sekunden ein Druck von einem Newton auf das Bitumen bei 25°C Umgebungs- und Bitumentemperatur ausgeübt und die Eindringtiefe der Nadel gemessen. Laut Norm wird ein Bitumen, in das die Nadel beim Penetrationstest sieben bis zehn Millimeter eindringt, als Bitumen 70/100 bezeichnet. Auch in dieser Arbeit werden diese

Normbezeichnungen verwendet. In Deutschland kommen nicht alle im Anhangkapitel 9.1 genannten Bitumensorten zum Einsatz. Man beschränkt sich hier auf die Sorten 20/30, 30/45, 50/70, 70/100, 160/220 [StKr05]. Hiervon stellen 50/70 und 70/100 die mengenmäßig häufigsten Anwendungsformen im Straßenbau dar [Hö10].

Auch bei der Herstellung von Fluxbitumen, Bitumenemulsionen, Kaltbitumen, PmB etc. ist es möglich, sich aller Methoden der Absicherung, also auch der Bitumenkaltlogistik zu bedienen. Da viele dieser bitumenhaltigen Bindemittel im Straßenbau zum Einsatz kommen, handelt es sich teilweise auch hierbei um die Versorgungskette des Asphaltstraßenbaus. Dieser Zweig der Bitumenindustrie wird allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Der Fokus liegt auf den möglichen Distributionswegen und Handhabungsmethoden von Straßenbaubitumen zwischen der Raffinerie und den Asphaltmischanlagen. Daher werden die restlichen Bindemittel lediglich der Vollständigkeit halber im Anhangkapitel 9.2 dargelegt.

2.1.1.2 Alternative Bindemittel

Eine abzusehende Verknappung der fossilen Rohstoffvorkommen in diesem Jahrhundert [SchZi08] führt dazu, dass in jüngster Zeit zunehmend Anstrengungen zur Suche nach alternativem Asphaltbindemittel, beispielsweise aus Biomasse, unternommen werden (vgl. [ORF10][De08.2]). Ergänzend zu bituminösen Bindemitteln werden in den Asphaltmischanlagen auch transparente beziehungsweise farblose Bindemittel verarbeitet. Auch hierbei handelt es sich um Produkte auf Rohölbasis [VeMeEy09] oder um Kunstharze. Durch die Beimengung von Farbpigmenten können so Asphalte in allen Farben hergestellt werden. Der Einsatz farbiger Asphalte kann technische (gut erkennbare rote Fahrradwege) oder architektonische (grüne Grasersatzflächen) Gründe haben.

Der Kalttransport alternativer Bindemittel kann sich, insofern sie dieselben mechanischen und thermophysikalischen Eigenschaften wie bituminöse Bindemittel aufweisen, unter technischen Gesichtspunkten genauso anspruchsvoll gestalten wie bei Straßenbaubitumen. Technische Lösungskonzepte im Bereich der Verpackung und Wiederverflüssigung von Bitumen sind also auch für die Handhabung alternativer Asphaltbindemittel anwendbar. Damit haben die Ergebnisse dieser Arbeit auch Relevanz für die Distribution alternativer Bindemittel.

2.1.2 Bitumenspezifikation

Es sind im Wesentlichen drei Materialeigenschaften, die das Bitumen einerseits zu einem Baustoff mit einzigartiger Eignung für den Asphaltstraßenbau machen, die es aber zugleich erschweren, das Material zu handhaben.

Als erstes ist das Bitumen ein Thermoplast. Das heißt, seine Viskosität ist temperaturabhängig. Dadurch kann man in der Asphaltproduktion das heiße Bitumen leicht mit der Gesteinskörnung und anderen Stoffen zu Asphalt vermischen. Anschließend lässt sich der heiße Asphalt leicht einbauen und verdichten. Nachdem der frische Straßenbelag ausgekühlt ist, kann er genutzt werden. Dies dauert zumeist nur wenige Stunden. Das thermoplastische Verhalten des Baustoffs erschwert allerdings das Verpacken des Bitumens, insofern es nicht in vergleichsweise stabile Behälter wie Fässer oder Tanks gefüllt wird. Durch die unvorhersehbaren Temperaturen beim Transport sind auch die Verformungen der Verpackungen zumeist nicht vorhersehbar.

Als zweites ist Bitumen adhäsiv. Für den Asphalt ist diese Eigenschaft unerlässlich, da das Bitumen so die mineralischen Asphaltbestandteile miteinander verkittet und verhindert, dass Wasser in größeren Mengen in die Matrix des Verbundwerkstoffs eindringen kann. Auch diese Eigenschaft des Bindemittels erschwert die Verpackung, da es so schwierig wird, das Bitumen aus dem Verpackungsmaterial herauszulösen, ohne Wärmeenergie zu nutzen oder die Verpackung zu zerstören.

Als drittes hat Bitumen eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit [Wu11]. Dies verhindert, dass die absorbierte Sonnenwärme an der schwarzen Asphaltoberfläche schnell in tiefere Schichten des Werkstoffs vordringt und so zu Verformungen wie Spurrillen führt. Bei der Wiederverflüssigung von Bitumen stellt dies allerdings ein großes Problem dar, da es nicht möglich ist, Bitumenblöcke von beispielsweise einem Kubikmeter Volumen in kurzer Zeit durch Wärmezufuhr von außen zu verflüssigen.

Ein tieferes Verständnis des Materialverhaltens und der Materialeigenschaften des Bitumens ist möglich, wenn man die Prüfverfahren und die Bestandteile des Bitumens im Detail betrachtet. Für diese Arbeit sind aber tiefergehende Erläuterungen dieser Verfahren und Eigenschaften nicht relevant. Die Prüfverfahren und die Zusammensetzung des Bitumens werden daher lediglich in Anhangkapitel 9.3 und Anhangkapitel 9.4 weiter ausgeführt.

2.2 Bitumenherstellung

Bitumen kann aus Naturvorkommen, aus Teeren und aus Rohölen gewonnen werden [ReWh03]. Da die Mengen aus Naturvorkommen einen verhältnismäßig geringen Anteil an der Gesamtproduktion haben und seit den 90er Jahren im bituminösen Straßenbau (aus humantoxikologischen Gründen) kein Teer verwendet wird [HuMaSchFr98], wird die Betrachtung der Bitumenherstellung in diesem Abschnitt auf die Produktion von Bitumen in den Raffinerien beschränkt. Hierzu wird zunächst auf den Herstellungsprozess in der Raffinerie eingegangen (Abschnitt 2.2.1), daraufhin wird der Bitumenmarkt in Deutschland als regionaler Betrachtungsrahmen dieser Arbeit dargestellt (Abschnitt 2.2.2), abschließend werden Tendenzen und aktuelle Entwicklungen auf diesem Bitumenmarkt aufgezeigt (Abschnitt 2.2.3).

2.2.1 Herstellungsprozess von Bitumen aus Rohölen

Die Bitumen fallen weltweit in der fraktionierten Destillation von Rohölen in Erdölraffinerien an [Wo09] [StKr05]. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird das Rohöl zunächst unter atmosphärischem Druck bei zirka 350°C destilliert [StKr05]. Der atmosphärische Rückstand wird anschließend der Vakuumdestillation (wiederum bei zirka 350°C [StKr05]) zugeführt [EV03]. In diesem zweiten Produktionsschritt bleibt ein sogenannter Vakuumrückstand zurück, der abhängig von Erdölsorte und Destillationsunterdruck bereits als Bindemittel genutzt werden kann. Da nur zirka 10 % der Erdölsorten (Provenienzen) bitumenfähig sind [Hö10], werden die verschiedenen Vakuumrückstände dann in der Bitumenanlage dosiert („verschnitten“) und gemischt, um das Kuppelprodukt Bitumen zu erhalten.

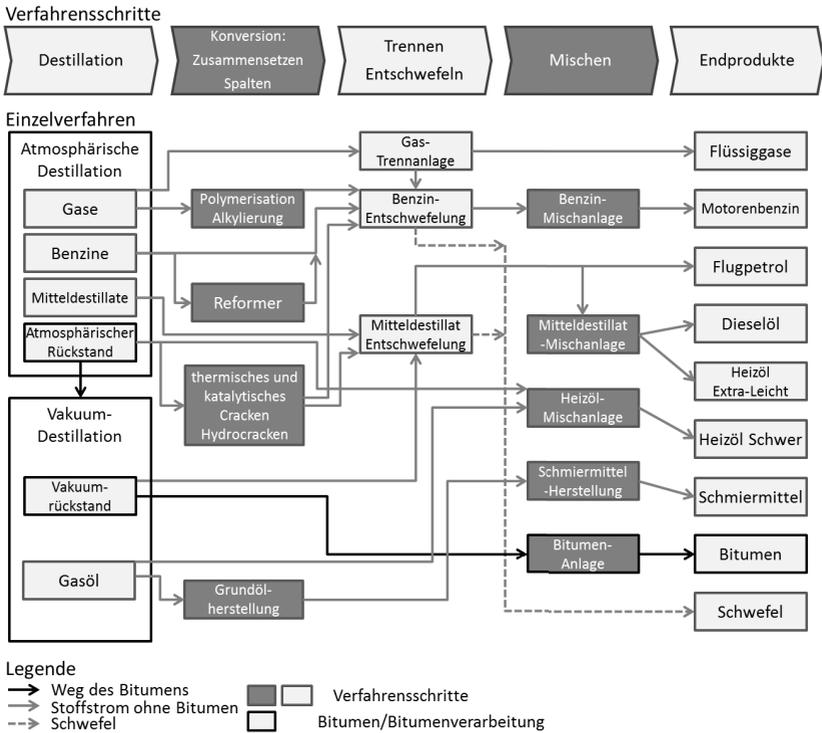


Abbildung 1: Schema der fünf Verfahrensschritte (oben) der Raffinerieproduktion von Erdölprodukten (eigene Darstellung gemäß [EV03])

Für die Bitumenproduktion sind besonders schwere, naphthenische Rohöle mit hohem Schwefel- und vor allem Asphaltengehalt und niedrigem Paraffingehalt geeignet, die eine hohe Ausbeute an Vakuumrückständen aufweisen [Th09]. Tabelle 2-1 nach Hutschenreuther und Wörner [Hu98] verdeutlicht damit, wie leicht bereits über die Dichte der Rohölsorte eine Aussage über den Bitumenanteil getroffen werden kann.

Tabelle 2-1: Dichte, Gesamtschwefel und Paraffingehalt verschiedener Rohölprovenienzen [Hu98]

Provenienz	Dichte (g/cm ³ bei 15°C)	Gesamtschwefel (% w/w)	Normalparaffine	Anteil an atmosphärischem Rückstand (Ausgangsstoff für Vakuumdestillation in %)
Norwegen	0,843	0,2	viel	ca. 45
Iran	0,86-0,87	1,4-1,7	mittel	ca. 50
Russland	0,863	1,3	mittel	ca. 45
Venezuela	0,954	2,4	wenig	ca. 70

So haben schwere venezolanische Rohölprovenienzen einen hohen Schwefel- und einen niedrigen Paraffingehalt. Genau umgekehrt verhält es sich mit norwegischen Provenienzen. Unter anderem sind venezolanische Rohöle daher für die Bitumenproduktion geeignet. Man bezeichnet sie als „bitumenfähig“.

Bei der Darstellung der Bitumenproduktionskapazitäten in Deutschland seien der Vollständigkeit halber kleinere Naturbitumenvorkommen erwähnt, deren Produktionsaufkommen allerdings keinen nennenswerten Anteil an der Gesamtproduktion hat.

2.2.2 Hersteller und Produktionsmengen

Für eine Optimierung der Lieferstrukturen in Kapitel 6 ist es von entscheidender Wichtigkeit, einen Überblick über die Bitumenproduzenten in Deutschland zu erhalten. Hierzu werden zunächst die aktuellen Produktionsstrukturen beschrieben (Abschnitt 2.2.2.1), daraufhin wird auf einige historische Entwicklungen eingegangen, die zu diesen Marktstrukturen geführt haben (Abschnitt 2.2.2.2), und abschließend werden kurz die Bitumenimport- und Exportzahlen in Deutschland dargestellt (Abschnitt 2.2.2.3), die für Aspekte der Versorgungssicherung eine nicht unwesentliche Rolle spielen.

2.2.2.1 Die Strukturen in der Bitumenproduktion

In einer Raffinerie fällt nicht zwangsläufig Bitumen an. Insgesamt gibt es in Deutschland derzeit nur elf Raffinerien, in denen die jährliche Gesamtprodukti-

onsmenge von zirka 4,5 Millionen Tonnen des Asphaltbindemittels hergestellt wird [MWV11]. Wie in Abbildung 2 dargestellt, werden fast drei Viertel des Bitumenmarktes von drei verhältnismäßig großen Mineralölfirmen bestimmt. Die Abbildung zeigt auch, dass die Raffinerie in Karlsruhe mit zirka 817 Tausend Tonnen in 2009 der größte Produktionsstandort für Destillationsbitumen ist. Die Raffinerien sind über ein komplexes Geflecht an Eigentumsstrukturen und Betreiberfirmen den Mineralölfirmen zugeordnet, das hier leicht vereinfacht wird, indem die Betreiberfirma Ruhr Oel GmbH, an der neben der Deutschen BP AG die Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) beteiligt ist und die Anteile an der Bayernoil Raffineriegesellschaft mbH (25 %), der MiRO Mineralölraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG (24 %) und der PCK Raffinerie GmbH hält (Die Ruhr Oel GmbH betreibt ebenso die Raffinerie in Gelsenkirchen), mit der Deutschen BP AG als ein Mineralölkonsortium zusammengelegt wurde.

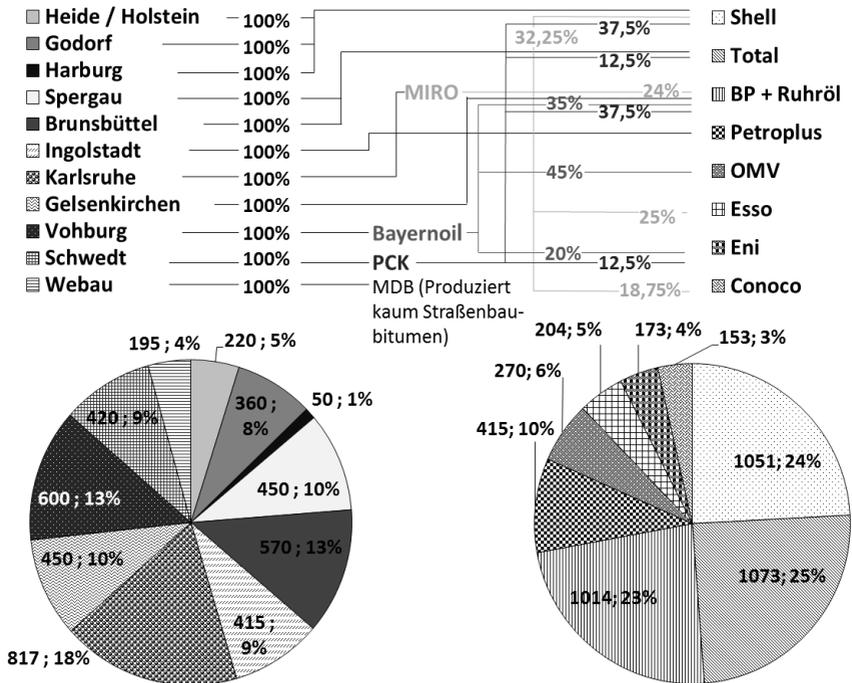


Abbildung 2: Raffinerieproduktionsmengen (2009) in tausend Tonnen und Raffinerie-Marktanteil in Prozent und die prozentuale Beteiligung der Betreiber- bzw. Mineralölfirmen [MWV11]

Asphaltproduzenten werden nicht nur aus den Raffinerien, sondern auch aus einer Vielzahl von Produktionsstandorten beliefert, in denen polymermodifizierte Bitumen (PmB) oder andere Spezialformen bituminöser Bindemittel hergestellt werden. Diese Lieferstrukturen werden hier im Kontext der Bitumenkalthandhabung und der damit einhergehenden Beschränkung des Betrachtungsrahmens auf große konventionelle Lieferstränge vernachlässigt. Aus demselben Grund wird auf eine Einordnung der Mitteldeutschen Bitumenmischwerk mbH und damit der Raffinerie in Webau in die Mineralölfirmer der Abbildung verzichtet.

2.2.2.2 Historische Entwicklungen auf dem Bitumenmarkt

Bei Betrachtung der historischen Marktentwicklungen lässt sich feststellen, dass in dem Zeitraum zwischen 1999 und 2003 die größten Veränderungen hinsichtlich der Eigentümerstrukturen und der Marktanteile der Mineralölfirmer auf dem Bitumenmarkt eingetreten sind. Diese seien hier gemäß [WZW11] stichpunktartig dargestellt:

- 1999: Total konzentriert durch die Fusion mit Fina zu „Totalfina“ seine Geschäftstätigkeiten auf den Mineralölmarkt.
- 2000: Totalfina übernimmt Elf und benennt sich um in „TOTAL“.
- 2000: Veba kauft Wintershall.
- 2001: Shell kauft DEA.
- 2001: BP kauft Veba.
- 2002: Die Raffinerien in Lingen und Hamburg werden stillgelegt.
- 2003: OMV kauft einen Anteil der BP an Bayernoil.

Die verhältnismäßig großen Veränderungen finden sich, wie in Abbildung 3 dargestellt, in der Anzahl der Mineralölfirmer und deren Marktanteilen an der Bitumenproduktion zwischen den Jahren 1998 und 2004 wieder.

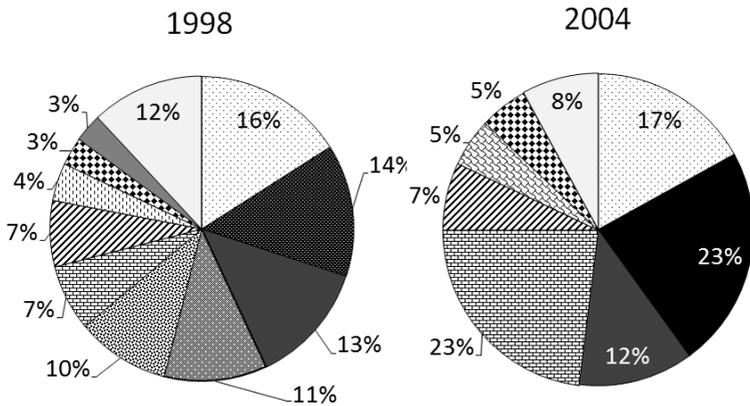


Abbildung 3: Eigentümerstruktur der bitumenproduzierenden Raffinerien in Prozent in den Jahren 1998 und 2004 [MWV11]

Die dargestellte Eigentümerstruktur des Jahres 2004 ist der derzeitigen Eigentümerstruktur (Abbildung 2) hingegen verhältnismäßig ähnlich. Lediglich der Kauf der Raffinerie in Ingolstadt durch die Petroplus Holdings AG von Esso im Jahr 2007 muss in diesem Kontext noch erwähnt werden.

2.2.2.3 Bitumenproduktionsmengen im Kontext der Ein- und Ausfuhrmengen

Die deutsche Mineralölindustrie importiert Rohöl.¹ Hieraus werden in den Raffinerien Mineralölprodukte wie Bitumen hergestellt. Ein gewisser Anteil der Gesamtproduktion wird anschließend wieder exportiert. Abbildung 4 zeigt unter anderem die Bitumeneinfuhr- und die Ausfuhrmengen von 2003 bis 2010.

¹ Die deutsche Rohölproduktion wird hier vernachlässigt.

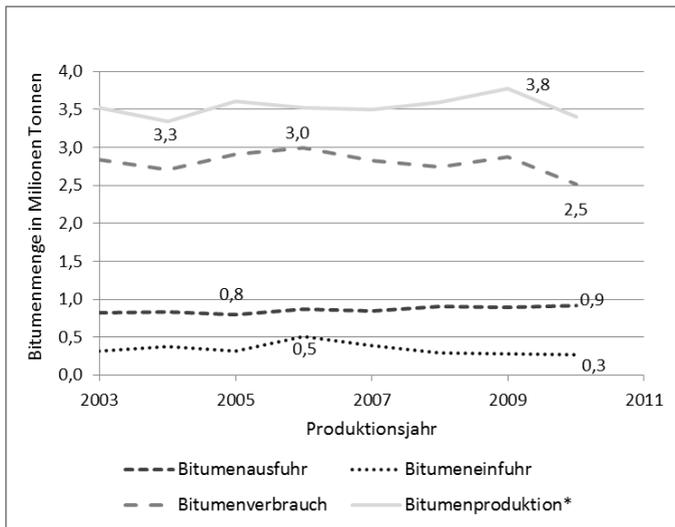


Abbildung 4: Bitumenverbrauchs-, Produktions- (*Bruttorefinerierzeugung), Ein- und Ausfuhrmengen von 2003 bis 2010 [MWV11]

Die größten Abnehmer von Bitumen sind die europäischen Nachbarländer [MWV11]. In 2009 gingen 87,7 % der Bitumenexporte in EU-Länder [MWV11]. Trotzdem werden auch verhältnismäßig große Mengen des Asphaltbindemittels importiert. Direktlieferungen aus den Raffinerien in Antwerpen oder Litvinov in deutsche Asphaltmischanlagen sind daher keine Seltenheit. Einige Auslandsraffinerien müssen daher in die Betrachtung und Analyse der Bitumen-distribution in Deutschland einbezogen werden.

2.2.3 Tendenzen und Prognosen für die Bitumenproduktion

Wie die meisten Industriesegmente unterliegt auch die Bitumenproduktion einem ständigen technologischen und ökonomischen Wandel. Hier werden einige grundlegende Zusammenhänge aufgezeigt und die sich daraus ergebenden Tendenzen beschrieben.

Die derzeitige weltweite Rohölproduktion liegt bei zirka 87 Millionen Barrel pro Tag [IEA10]. Für die zukünftige Entwicklung der weltweiten Erdölfördermengen, aus denen teilweise Rückschlüsse auf die Bitumenproduktionsmengen möglich sind, gibt es zahlreiche Veröffentlichungen (vgl. [MWV06] [IHS06] [SchZi08] [KeReBIFa09] [IEA10] [EIA10] u.a.). Zumeist werden in diesen Prognosen, Studien, Simulationen und der hierin beschriebenen Szenarien die zukünft-

tigen Erdölproduktionsmengen unter anderem mittels des weltweiten Rohölbedarfs prognostiziert. Die Ergebnisse dieser Veröffentlichungen unterscheiden sich teilweise stark. Da die Bitumenproduktion eng mit der Rohölproduktion zusammenhängt, werden die unterschiedlichen Resultate dieser Veröffentlichungen hier als Beleg der inkonsistenten Prognostizierbarkeit zukünftiger Entwicklungen in der Bitumenproduktion herangezogen. Nationale Bitumenproduktion kann in diesem Kontext nicht entkoppelt von Entwicklungen der globalen Ölnachfrage und Produktion betrachtet werden.

So prognostizieren Kesicki, Remme und Blesel [KeReBIFa09] bis zum Jahr 2035 einen Anstieg der Rohölproduktion auf zirka 105 Millionen Barrel am Tag und bis zum Jahr 2050 auf zirka 124 Millionen Barrel am Tag. Auch die International Energy Agency (IEA)[IEA10] prognostiziert, dass der Produktionspeak nicht vor 2035 überschritten wird. Bakhtiari [Ba04], Deffeyes [De02], Mohr und Evans [MoEv07][MoEv08] so wie Wells [We05.1][We05.2] gehen hingegen davon aus, dass die konventionelle weltweite Erdölproduktion noch vor dem Jahr 2025 ihren Höhepunkt erreicht haben wird, was allerdings teilweise durch die unkonventionelle Gewinnung von Rohöl aus Ölsanden kompensiert werden kann.

Es zeigt sich, dass Prognosen hinsichtlich der Rohölproduktion und damit hinsichtlich der mit ihr einhergehenden Bitumenproduktion einer hohen Unsicherheit unterliegen, woraus sich ein Bedarf nach Absicherungsinstrumenten für rohölbasierende Produkte ergibt. Eine mögliche Folge ist, dass zu Methoden der Bitumenkaltlogistik gegriffen wird, um den Baustoff über längere Zeiträume zu niedrigen Kosten lagern und über größere Distanzen transportieren zu können. Die genaue Bestimmung der Lagerzeiträume und Transportdistanzen, für die sich die Bitumenkaltlogistik lohnt, ist Gegenstand dieser Arbeit. In Kapitel 5 werden die Gesamtkosten der Bitumenkaltlogistik bestimmt.

Aus Sicht der Raffinerien ist Bitumen zumeist ein mengenmäßig verhältnismäßig unbedeutendes Nebenprodukt ihres Produktionsprozesses [Hö09]. Raffinerien sind daher stets bestrebt, entweder anteilig mehr höherwertige Bestandteile aus den Rohölen zu destillieren und dabei die Eignung des Destillationsrückstandes als Asphaltbindemittel für den Straßenbau zu vernachlässigen oder gar keine bitumenfähigen Rohöle weiterzuverarbeiten [Al10]. Unter anderem deshalb ist tendenziell ein **Rückgang der Bitumenproduktion** zu verzeichnen (Abbildung 4). Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass in jüngster Zeit neue Komponenten der Raffinerietechnik dazu führen, dass noch mehr höherwertige Bestandteile aus den bituminösen Rückständen der Destillationsprozesse gewonnen werden können [Al10]. Alle neuen Raffinerien und eine Anzahl alter Raffinerien sind bereits mit diesen technischen Komponenten ausgestattet.

Durch den Einsatz dieser Technologien nimmt die Eignung der Destillationsrückstände als Straßenbaubitumen stetig ab. Albrecht [Al10] spricht daher auch von einem „**Qualitätsrückgang**“ (durch einen zu hohen Anteil an nicht siedenden Komponenten wie Schwefel) und einem „**Rückgang der Produktionsstandorte**“ von Bitumen. Beides wird bei Albrecht als ein Indikator für einen sich wandelnden Bitumenmarkt gesehen, in dem auch die Bitumenkaltlogistik vermehrt zum Einsatz kommen wird. Durch die Anwendung eines Modells, wie es in Kapitel 6 entwickelt wird, kann auf die sich wandelnden Bitumenmärkte reagiert werden.

2.3 Bitumenlogistik und Betrachtungsrahmen

Die Bitumenlogistik zwischen der Bitumenproduktion in der Raffinerie und der Weiterverarbeitung des Bitumens in der Asphaltproduktion ist der Betrachtungsrahmen dieser Arbeit. Abbildung 5 stellt den Betrachtungsrahmen dar.

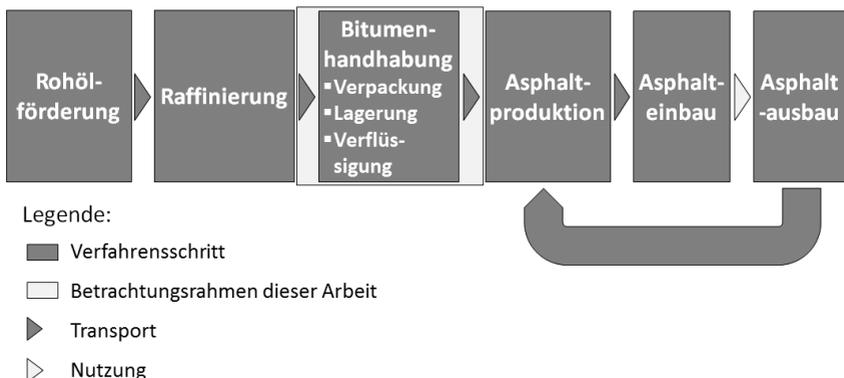


Abbildung 5: Prozessschritte der Bitumenhandhabung von der Rohölförderung zur Asphaltproduktion mit dem Betrachtungsrahmen dieser Arbeit

Da die Prozesse der Ausgangsstoffe wie Rohöl oder Energie und des fertigen Asphalts hierdurch kaum beeinflusst werden, können sie als gegeben betrachtet werden. Deshalb wird an dieser Stelle zunächst die gängige Praxis (vgl. [HuWö10]) des heißflüssigen Transports und der heißflüssigen Lagerung beschrieben, bevor hierauf aufbauend in den Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 die neuen Technologien in diesem Bereich beschrieben werden. Hierzu werden zunächst die prinzipiellen Abläufe in der Bitumenlogistik zwischen Asphaltmischanlagen und den bitumenproduzierenden Raffinerien beschrieben (Abschnitt 2.3.1). Daraufhin werden die Tanklager- (Abschnitt 2.3.2) und Transporttechno-

logien (Abschnitt 2.3.3) dargestellt und schließlich aktuelle Tendenzen in der weltweiten Bitumenlogistik aufgezeigt (Abschnitt 2.3.4).

2.3.1 Bitumenlogistik zwischen Raffinerie und Asphaltmischanlage

Bitumen wird in Deutschland größtenteils heißflüssig gehandhabt. Eine Belieferung während der Asphaltproduktion erfolgt daher just-in-time [HuWö10]. Das heißt, der Asphaltproduzent muss das Bitumen so aus einem Tanklager (zumeist dem einer bitumenproduzierenden Raffinerie) bestellen, dass er zum einen zum Zeitpunkt der Anlieferung schon genügend Tankraum zur Verfügung hat, um die Liefercharge aufzunehmen, zugleich aber genügend Bitumenreserve vorhanden ist, um eventuelle Verspätungen überbrücken zu können [HuWö10]. In kleineren asphaltproduzierenden Unternehmen erfolgt dies meist direkt durch den Anlagenleiter oder Mischmeister. Größere Unternehmen haben zumeist eine zentrale Koordinationsstelle, bei der die Bestellungen der Produktionsstandorte eingehen. Diese Abteilung übernimmt auch das Aushandeln von Bitumenpreisen mit den Raffineriebetreiberfirmen und die Koordination der Tanklagerung und Bitumenverteilung, insbesondere bei eventuellen Lieferengpässen. Zusätzlich gibt es teilweise, bei größeren Asphaltproduzenten, entsprechend beauftragte Anlagenleiter, die diese zuletzt genannte Aufgabe für etwa sechs Produktionsanlagen vor Ort übernehmen.

Für den Spediteur hat der Heißtransport zur Folge, dass er sich zeitlich auf den Transportweg einstellen muss [HuWö10]. Da Bitumen ein Thermoplast ist, können Wärmeenergieverluste auf zu großen Transportstrecken und durch Verzögerungen dazu führen, dass es nicht mehr pumpfähig ist. Es erfolgt ein Temperaturrückgang von zirka einem Kelvin pro Stunde im Tankkraftwagen (TKW) [HuWö10]. Trotzdem ist es nicht unüblich, dass die deutschen Asphaltmischanlagen aus Nachbarländern (insbesondere Polen, Tschechien und Niederlande) beliefert werden.

Eigenschafts- und damit Qualitätsänderungen des Bitumens im vorschriftsmäßig verschlossenen Heißtransport sind, verglichen mit dem späteren Mischvorgang, verhältnismäßig gering. Das heißt, monetäre Einbußen aufgrund von Qualitätsminderung durch Kalttransport sind nicht zu erwarten und können in dieser Arbeit daher vernachlässigt werden.

2.3.2 Funktion und Aufbau von Bitumentanks

In der Praxis ist zwischen Tanklagern (zumeist mit mehreren verhältnismäßig großen Bitumentanks (300-3000 Tonnen) und Bitumentanks zur Lagerung des

angelieferten Bitumens in den Asphaltmischanlagen (zumeist 50-200 t je nach Anlagengröße) zu unterscheiden. Der technische Aufbau unterscheidet sich prinzipiell nicht. Ein Unterschied besteht allerdings bei ihrer Zweckbestimmung. Während die kleineren Bitumentanks in den Asphaltmischanlagen dazu dienen, die Lieferchargen von Bitumentankwägen aufzunehmen und nach und nach an die angeschlossene Asphaltproduktion abzugeben, dienen die großen Tanklager-Tanks primär zum Zwecke der Versorgungssicherung mehrerer Produktionsstandorte. Es muss erwähnt werden, dass große Tanklager auch in den Raffinerien vorhanden sind, um das produzierte Bitumen zumeist außerhalb der Hauptstraßenbausaison (Herbst bis Winterbeginn [HuWö10]) zwischenzulagern.

In der Literatur zu Tanklagern für Bitumen gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen, Regelwerken und Empfehlungen (vgl. hierzu [EnIn05]) hinsichtlich Sicherheitsbestimmungen, -maßnahmen und -standards, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Stattdessen werden der schematische Aufbau und die Komponenten eines Bitumentanks anhand Abbildung 6 beschrieben.

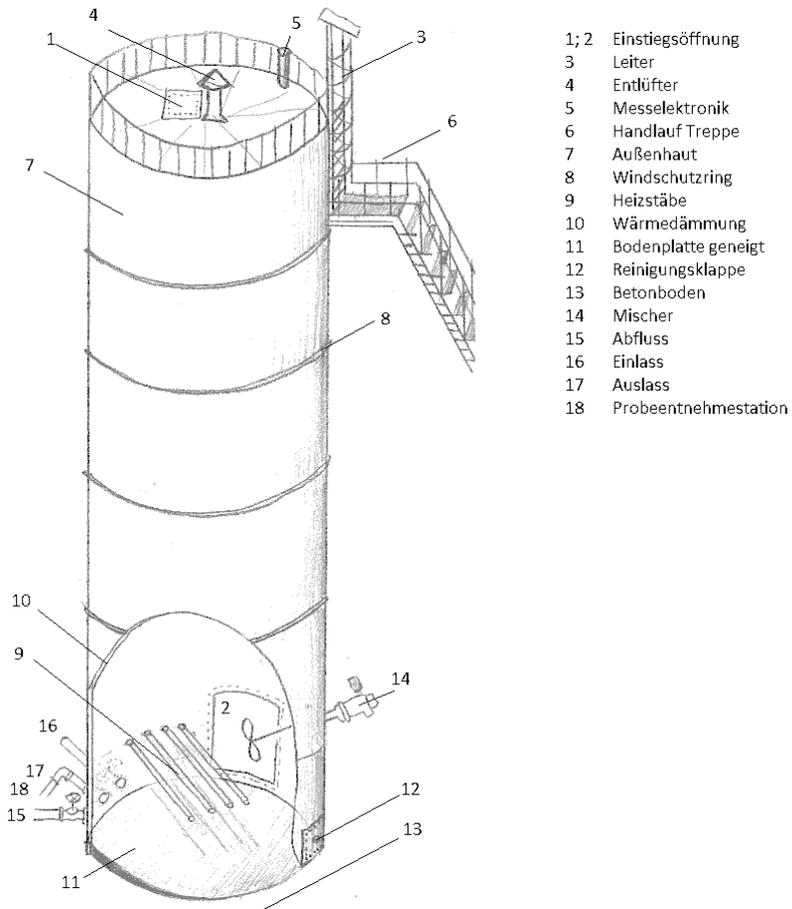


Abbildung 6: Prinzipskizze eines Bitumentanks mit beschrifteten Komponenten (eigene Darstellung)

Bei der Konstruktion von Bitumentanks ist auf eine ausreichende Tragfähigkeit des Untergrunds und den Einbau entsprechend dimensionierter Fundamente zu achten. Auch der Boden rund um den Tank muss mit Kies oder Beton ausgeführt sein, um eine leichte Reinigung und einen guten Kontaminationsschutz zu gewährleisten. Der Boden im Tank ist leicht zu einer Reinigungsklappe hin geneigt. Zum Zwecke einer regelmäßig stattfindenden Innenreinigung des Tanks muss sich außerdem mindestens eine, nach Möglichkeit zwei Einstiegsöffnungen in der Tankaußenwand befinden. Die Tankaußenwand besteht aus geeig-

netem Konstruktionsstahl, der zusätzlich von Windschutzringen umschlossen wird, und einer Wärmedämmung. Dieser thermischen Dämmung kommt nicht nur hinsichtlich der Einsparung von Strom oder Brennstoffen, sondern auch hinsichtlich der Qualitätssicherung eine große Bedeutung zu. So müssen auch die Zu- und Abflüsse zum Tank gut gedämmt sein, um eine „Verkokung“ des Bindemittels an der Innenwand zu vermeiden. Die Wärmeenergie wird schließlich über elektrische Heizstäbe oder Thermalölleitungen eingetragen, die mit Temperaturfühlern versehen sind, um eine Überhitzung des Bitumens, beispielsweise über den Flammpunkt, zu verhindern. Das Bindemittel hat im Tank zumeist eine Temperatur von zirka 160°C. Um die temperaturbedingten Druckschwankungen im oberen Tankbereich auszugleichen, muss jeder Tank mit einem entlüftenden Überdruckventil ausgestattet sein. Dieser Entlüfter befindet sich ebenso wie eine mechanische Füllstandsmessvorrichtung an der Tankoberseite, die zum Zwecke der Wartung und Reparatur dieser Anlagenkomponenten begehbar ist. [Be09]

Die Bitumentanks können liegend und stehend ausgeführt werden [HuWö10], wobei in der Regel die stehende Konstruktion aufgrund der geringeren freien Oberfläche des Inhalts, an der es zu Qualitätseinbußen durch Bitumenalterung kommen kann, bevorzugt wird.

2.3.3 Tankkraftwagen als Standardtransportmittel

Da die Asphaltmischanlagen an Standorten errichtet werden, die für das Ausliefern des heißen Mischguts nahe an den Baustellen gelegen sind, ist es zumeist nicht möglich, diese über Schienen oder Seewege mit Rohstoffen zu beliefern [HuWö10]. Die Belieferung erfolgt daher mittels Straßentanklastzügen (Tankkapazität zirka 25 t). Diese „Tankkraftwägen“ (TKW) liefern das Asphaltbindemittel Bitumen im heißflüssigen Zustand aus der Raffinerie in die Lagertanks der Asphaltmischanlagen und in Tanklager, von denen aus es letztlich wieder mittels TKW in Asphaltmischanlagen distribuiert wird. Dies stellt einige Bedingungen an die Konzeption und die Handhabung von Bitumentransportern. Da Bitumen bei über 100 Grad Celsius transportiert wird, zählt der Bitumenheißtransport laut Gefahrgutbeförderungsgesetz (Deutschland; § 1 und § 2) zu den Gefahrguttransporten. Der TKW muss daher unter anderem mit zwei Pulverfeuerlöschern, spezieller Schutzkleidung und Werkzeugen ausgerüstet sein [ARBIT08]. Darüber hinaus sind verschiedene Dokumente auch bei Leerfahrten mitzuführen und der Fahrer muss über spezielle Kenntnisse verfügen [ARBIT08]. Der Transporter muss, bevor er mit einer anderen Bitumensorte beladen wird, von einer Fachfirma gereinigt werden. Der TKW darf maximal bis zu

95 % gefüllt sein, um ein Überlaufen zu verhindern [ARBIT08], und der heiße Bitumeninhalt darf nicht mit Wasser in Berührung kommen.

Zumeist fällt bei Heißtransporten eine Leerfahrt zurück in das Bitumendepot der Raffinerie an, wodurch Heißtransporte höhere Kosten als konventionelle LKW-Transporte verursachen.

Neben der in Deutschland üblichen Form des TKW-Transports von heißflüssigem Bitumen gibt es weltweit zahlreiche Varianten des Bitumentransports. Im Wesentlichen kann dabei zwischen Heiß- und Kalttransport unterschieden werden. Für jede Transportvariante werden neben Kraftfahrzeugen auch Schiffe und Schienenfahrzeuge eingesetzt.

2.3.4 Tendenzen und Prognosen für die weltweite Bitumenlogistik

Abschnitt 2.2.2.3 zeigt, wie eng der nationale Bitumenmarkt mit internationalen Entwicklungen verknüpft ist. So müssen Prognosen für die Asphaltbindemittellogistik in Deutschland stets im Kontext internationaler Trends in diesem Bereich gesehen werden.

Es ist ein Rückgang der Produktionsstandorte von Bitumen (unabhängig von der Anzahl der Raffinerien) zu verzeichnen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Dies hat insbesondere in der Bitumenlogistik zur Folge, dass Bitumen tendenziell über immer **größere Distanzen** transportiert werden muss [Al10]. Damit steigt der Bedarf an **größeren Flotten** (Kraftfahrzeuge, Tankschiffe u.a.) [Al10]. Ebenso nimmt die **Distributionszeit** zu [Al10] und eine Bitumenbestellung muss von Asphaltproduzentenseite tendenziell immer früher erfolgen. Der Trend zu vergleichsweise **frühen Bestellungen** wird dadurch verstärkt, dass die **globale Bitumennachfrage steigt** [HüMü09]. Im Zuge der Globalisierung werden gerade Länder, die sich noch in ihrer infrastrukturellen Entwicklung befinden, immer stärker erschlossen. Dies erfolgt zumeist durch den Neu- oder Ausbau von Asphaltstraßen.

Der Anspruch, die Versorgungssicherheit mit Bitumen zu gewährleisten, stellt Logistiker daher mittelfristig vor große Herausforderungen.

2.4 Asphaltproduktion und -markt

Asphaltemischgut wird in Asphaltmischanlagen aus Gesteinskörnungen, Bitumen und gegebenenfalls Zusätzen hergestellt [HuWö10]. Die Anlieferung der bituminösen Bindemittel erfolgt zumeist im Tankkraftwagen (TKW) [HuWö10].

Ebenso wie die Gesteinskörnung wird das Bitumen auf dem Anlagengelände zwischengelagert, bevor es der Produktionsanlage hinzugegeben wird.

Im Kontext dieser Arbeit ist die Asphaltproduktion in Deutschland insofern von Interesse, als der für die Bitumenkalthandhabung betrachtete Ausschnitt der Bitumenversorgungskette direkt an die Asphaltproduktion grenzt, somit die Schnittstelle der Bitumenverflüssigung eng mit den Techniken der Asphaltproduktion verbunden ist. So können die Erkenntnisse aus einer Wirkungsabschätzung der Integration neuer Handhabungstechnologien in der Bitumenversorgung direkte Auswirkungen auf die Lagerhaltung und Produktionsplanung der Asphaltproduzenten und die gesamte Asphaltindustrie haben. In diesem Abschnitt wird deshalb zunächst der technische Aufbau einer Asphaltmischanlage beschrieben (Abschnitt 2.4.1). Daraufhin wird die technische Schnittstelle zur Kaltlogistik kurz beschrieben (Abschnitt 2.4.2). Schließlich wird der Asphaltmarkt mit den Hauptakteuren und Produktionskapazitäten vorgestellt (Abschnitt 2.4.2) und abschließend werden aktuelle und zukünftige Tendenzen aufgezeigt, die die Asphaltproduktion betreffen (Abschnitt 2.4.4).

2.4.1 Asphaltmischanlagen und Herstellungsprozess

Die Herstellung von Asphalt bedarf einer Vermengung von Gesteinskörnungen (Zuschlag) in vorbestimmtem Verhältnis mit Bitumen, um eine homogene Mischung zu erzeugen, die den spezifischen Mischvorschriften und Temperatur- oder Endprodukt-Randbedingungen genügt [ReWh03].

Dies bedeutet, dass das Gelände einer Asphaltmischanlage neben der Produktion unter anderem auch dem Zwecke der Lagerung von Zuschlagsstoffen dient. Diese Lagerung kann in Haufen, in Boxen mit und ohne Überdachung und in Silos erfolgen [HuWö10]. Bei trockener Lagerung der Gesteinskörnung können verhältnismäßig große Mengen an Brennstoffen für die Trocknung der Gesteinskörnung eingespart werden. Die Trocknung erfolgt in einem speziell konstruierten Drehrohrofen [HuWö10]. Dieser leicht geneigten sogenannten „Mischtrommel“ werden die Gesteinskörnungen an der höher liegenden Seite zugegeben, während ein Brenner an der niedrigeren Seite eine Brennerflamme zur Wärmeenergiezufuhr in das rotierende Rohr wirft. Der Staub, der bei der Trocknung anfällt, wird in mehrstufigen Abluftfiltern aufgefangen und als sogenannter „Füller“ mit angeliefertem Gesteinsmehl, das ebenso als Füller dient, in Silos aufbewahrt. Die getrockneten und heißen Gesteinskörnungen werden vom Ausgang der Trockentrommel zur Heißabsiebung oder mittels eines Bypass direkt zur Heißsilierung transportiert [HuWö10]. Die zur Heißabsiebung eingesetzten Vibrationssiebe sorgen dafür, dass eine exakte Abstimmung auf das As-

phaltrezept möglich ist und die Auswirkungen verschiedener Liefer- oder dosierbedingter Störeinflüsse auf den Zuschlag minimiert werden können. Über den Bypass wird unter anderem auch gebrauchter Asphalt als „Fräsgut“, „Ausbauasphalt“ oder „Recycling“ (RC) zugegeben. Nun erfolgt im Mischer der eigentliche Mischprozess. Verschiedenste Zusatzmittel (Wachse, Kunststoffgranulat, Fluxmittel) und Füller werden dem heißen Zuschlag und dem RC-Material zumeist direkt im Mischer zugegeben. Erst an dieser Stelle erfolgt auch die Zugabe des heißflüssigen Bitumens. Bitumen kann volumetrisch oder gewichtsmäßig zugegeben werden [HuWö10]. Das fertige Mischgut wird anschließend entweder direkt in einen offenen LKW (Muldenkipper) verladen oder vorher noch einem oder mehreren Mischgutsilos für eine Zwischenlagerung über einige Minuten zugegeben.

Auch für jede weitere der genannten Anlagenkomponenten gibt es eine gewisse Auswahl an verschiedenen Ausführungsprinzipien und Anordnungsmöglichkeiten, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, da lediglich der prinzipielle Herstellungsprozess des Asphaltmischguts gezeigt wird.

2.4.2 Schnittstellen zur Bitumenkalthandhabung

Die Bitumenkalthandhabung, deren Technologien in Kapitel 4 ausführlich beschrieben werden, ist derzeit nicht Stand der Technik in den deutschen Asphaltmischanlagen. Vielmehr wird das Bitumen heiß angeliefert, heiß gelagert und heiß dem Mischvorgang zugegeben [HuWö10]. Diese Form der Handhabung wird hier als Just-in-time-Handhabung bezeichnet, zu der Hutschenreuther und Wörner auch schreiben, dass es energetisch und ökonomisch am günstigsten ist, diese heiße Kette nicht zu unterbrechen und keine hohen Temperaturschwankungen zuzulassen [HuWö10]. Bei kurzen bis mittleren Lagerzeiträumen ist dies durchaus zutreffend. Doch bei langen Lagerzeiten, wie beispielsweise der witterungsbedingten Winterpause im Asphaltstraßenbau, ist es in vielen Anlagen nicht unüblich, die Tanklager herunterzufahren und ihren Bitumeninhalt somit erkalten zu lassen. Nicht selten werden die Tanklager vorher noch mit Bindemittel zum niedrigen Winterpreis gefüllt. Bitumen unterliegt in Deutschland in den letzten Jahren starken saisonalen Preis- und bisweilen auch Angebotsschwankungen. Die Lagerkapazität (in Tanklagern) für Bitumen an den Mischanlagen ist (allerdings) begrenzt [HuWö10]. Dies hat zur Folge, dass Asphaltproduzenten nur bedingt gegen eventuelle Versorgungsengpässe und höhere Preise abgesichert sind. Die Lagerung von verpacktem Bitumen stellt in diesem Kontext einen zu prüfenden Lösungsansatz dar, zumal in der Heißlagerung kontinuierlich Wärmeenergie benötigt wird. Hutschenreuther und Wörner nennen auch weitere Nachteile der Heißhandhabung:

„Der Zeitpunkt muss so gewählt sein, dass der zu befüllende Bitumentank die angelieferte Menge aufnehmen kann, ohne das es zu Vermischungen mit anderen Bindemitteln kommt [...]“ und „[...] keine Stillstandzeiten an der Mischanlage entstehen, weil die benötigte Bitumensorte nicht mehr vorrätig ist“ [HuWö10]

Eine Schnittstelle zur Bitumenkaltlogistik, die diese Probleme größtenteils lösen würde, kann unterschiedlich beschaffen sein. Zunächst ist es möglich, eine Verflüssigungsanlage, in der dem kalten Bindemittel wieder Wärmeenergie zugeführt wird, direkt an die Bitumentanks der Asphaltmischanlage anzuschließen. Auch das zugehörige Bitumenkaltlager kann, insofern ausreichender Platz vorhanden ist, in diese Asphaltmischanlage integriert werden. Darüber hinaus wäre es aufgrund der Kaltlagerung vor Ort theoretisch denkbar, gänzlich auf Tanklagerung in den Asphaltmischanlagen zu verzichten, insofern Verflüssigungsanlagen mit ausreichender Verflüssigungsleistung vorhanden sind. Alle mit der Tanklagerung zusammenhängenden Aufwendungen könnten so eliminiert werden. Denkbar wäre auch, dass sich Kaltlager und Verflüssigungsanlagen an einem anderen Standort (auch einer anderen Mischanlage) befinden, von dem aus die Tanklager einer oder mehrerer Mischanlagen auf konventionellem Wege mittels Tankkraftwägen beliefert werden. Die damit zusammenhängenden Fragen hinsichtlich einer unter techno-ökonomischen Gesichtspunkten optimalen Integration der Kalthandhabung wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

2.4.3 Asphalthersteller und Produktionsmengen

In Deutschland gibt es zirka 670 Asphaltmischanlagen [WBN07]. Die Asphaltproduzenten sind im Deutschen Asphaltverband (DAV) organisiert, der die Interessen der Asphaltindustrie vertritt [DAV11]. Der Asphaltmarkt wird von drei Hauptakteuren bestimmt, die gemeinsam zirka 50 Prozent der Gesamtproduktion an Mischgut herstellen. Die Entwicklung der Asphaltproduktion der letzten 30 Jahre in Deutschland ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: Entwicklung der Asphaltproduktion in Deutschland [DAV11]

Das Unternehmen, in dessen Logistikstrukturen die Technologien der Bitumenkalthandhabung modellhaft in Kapitel 6 integriert werden, ist der zweitgrößte Asphaltproduzent [St09.1]. Zugleich ist das Unternehmen das größte Straßenbauunternehmen und damit der größte Asphaltnachfrager Deutschlands. Naturgemäß liegt es daher im Unternehmensinteresse, die Rohstoffbeschaffung als eine Basis der Geschäftstätigkeit hinsichtlich Versorgungssicherheit und Marktanteil auszubauen [St09.2].

2.4.4 Tendenzen und Ausblick auf die zukünftige Asphaltproduktion

Ein Akteur in der Asphaltproduktion ist an einer realitätsnahen Abschätzung und zuverlässigen Prognostizierung aktueller und zukünftiger Trends in der Asphaltproduktion interessiert. In diesem Abschnitt wird der Fokus auf Entwicklungen gelegt, die Auswirkungen auf die Logistik bituminöser Bindemittel im Straßenbau haben können.

Zunächst ist hier der aktuelle Trend hin zum Einsatz von mehr Ausbauasphalt zu nennen. Abbildung 8 zeigt die Zunahme des Anteils an diesem Recyclingmaterial (RC-Material) im Asphaltstraßenbau der letzten drei Jahrzehnte.



Abbildung 8: Zunahme des RC-Anteil in der Asphaltproduktion in Deutschland seit 1982

Bedingt wird dieser Trend größtenteils durch Regelwerke (TL Asphalt-StB 2007; RuVA-StB 2001) und wird sich weiter fortsetzen, denn laut Straube und Krass [StKr05] kann der Anteil an Ausbausphalt zum Beispiel bei neuen Asphalttragschichten (zumeist unterste Schicht im Asphaltoberbau, die zirka 50 % der Asphaltproduktionskapazitäten beansprucht) bis zu 80 M.-% betragen.

Auf Auftraggeberseite ist im nationalen und internationalen Straßenbau ein Trend zu performanceorientierter Bauweise zu verzeichnen. Das heißt, es wird vermehrt nach Anforderungen (Flüsterasphalt, offener Asphalt u.v.m.) an das Straßenbauwerk und weniger nach genormtem Asphalteinbau und Asphaltprodukten ausgeschrieben. Dies hat eine anforderungsgerechte individuelle Asphaltproduktion für jede der Baumaßnahmen zur Folge, welche wiederum einer größeren Sortenvielfalt bei bituminösen Bindemitteln bedarf [AI10]. Da die Raffinerien teilweise nicht mehr in der Lage sind, diese Sortenvielfalt abzudecken, werden vermehrt polymermodifizierte Bitumen oder Technologien zur Modifikation von Bitumen in den Asphaltmischanlagen eingesetzt [AI10]. Diese Modifikation kann auch in der Oxidation von Bitumen in einer speziellen Anlage bestehen. Da sich gerade bei kleineren internationalen performanceorientierten Baumaßnahmen der Bau spezieller Modifizieranlagen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vor Ort nicht lohnt, wird die Anzahl an internationalen Transporten von modifizierten Bitumen ansteigen [AI10]. Eine weitere,

in den USA bereits weiter verbreitete Folge der spezifischeren Anforderungsprofile an die Asphalttechnologie ist das Verfahren des Inline-Blendings, bei dem harte und weiche Bitumensorten zur Erreichung einer gewünschten Spezifikation vermischt werden [AI10]. Auch für Europa wird erwartet, dass der dargestellte abzusehende Mangel an bituminösen Bindemitteln zu vermehrtem Inline-Blending führen wird [AI10].

2.5 Auswirkungen von Veränderungen in Bitumen- und Asphaltproduktion bzw. -distribution

Abschließend wird hier aus den in diesem Kapitel dargestellten Technologien und Trends nochmals zusammenfassend dargelegt, wie sich Entwicklungen auf dem internationalen Bitumen-, Logistik- und Asphaltmarkt vor dem Hintergrund der derzeitigen technischen Abläufe in der Zukunft auswirken können. Hierzu müssen nationale Trends (Deutschland) in den Kontext der internationalen Trends gestellt werden.

In den jeweiligen Abschnitten zu den aufeinanderfolgenden Prozessen Bitumenproduktion, Transport und Asphaltherstellung (Abschnitte 2.2.3, 2.3.4 und 2.4.4) werden die in Abbildung 9 stichpunktartig dargelegten Trends herausgearbeitet.

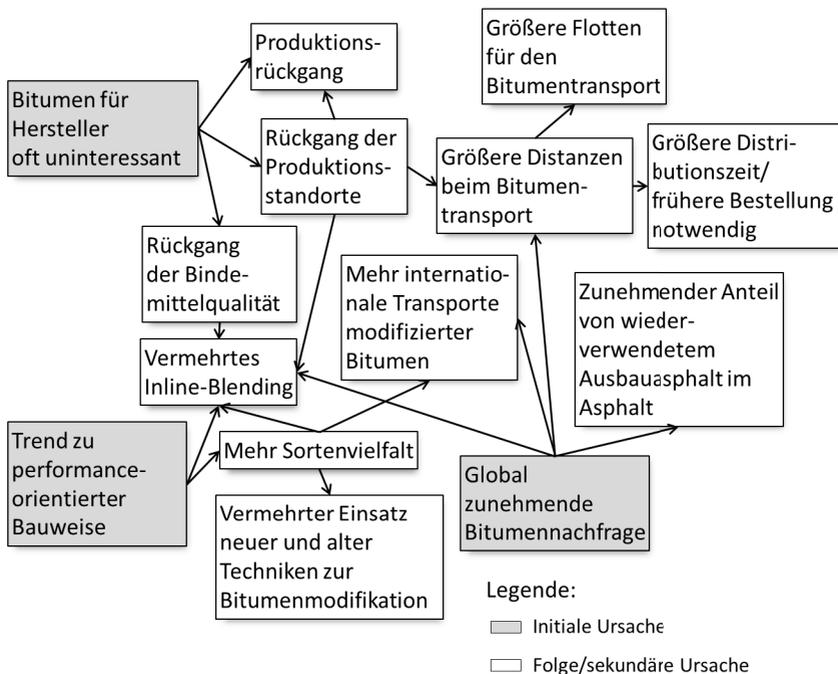


Abbildung 9: Gegenseitige Beeinflussung aktueller Trends im weltweiten Bitumensektor

Die genannten Entwicklungen sind größtenteils in gegenseitiger Abhängigkeit oder stehen in Wechselwirkung. Als die drei Hauptursachen der von Albrecht [Al10] und anderen aufgezeigten oder prognostizierten Trends sind die mangelnde Attraktivität des Bitumenverkaufs für die Raffineriebetreiber, die global steigende Nachfrage und die performanceorientierte Baupraxis zu sehen. Die Entwicklungen, wie größere Transportstrecken und größere Unsicherheiten bei der Versorgung, zu denen diese Trends naturgemäß führen werden, bewirken wiederum, dass die Thematik der Bitumenlogistik immer stärker in den Mittelpunkt der Betrachtung von Logistikern, Kaufleuten und Technikern rückt. Insbesondere ein wirtschaftlicher Transport und eine wirtschaftliche Lagerung von Asphaltbindemitteln können dabei von großem Interesse sein. Die Bitumenkalthandhabung bietet hier ein mögliches Alternativkonzept an, mit dem der Aufwand für Energieträger, Lager- und Transportkosten reduziert werden kann. Nicht zuletzt deshalb wurden seit 2008 zahlreiche Entwicklungsprojekte in der

Industrie (Bitubale [Bi11], Bi2Bag [Pö04][Pö05][Pö07][Pö08], Clovertainer, Strabasa [Wu11], Polycube® [Po11]) ins Leben gerufen, die sich mit Technologien rund um das Verpacken und Wiederverflüssigen von Bitumen beschäftigen oder beschäftigt haben. Während diese technischen Untersuchungen voranschritten, wurde auf betriebswirtschaftlicher Seite, aufbauend auf teilweise bewährten Methoden, nach kurzfristigeren Lösungen – insbesondere zur Preisabsicherung – gesucht, die in nachfolgendem Abschnitt vorgestellt werden. Ein wesentliches Merkmal der jährlichen Bitumenpreisentwicklung ist in diesem Kontext die große saisonale Preisdifferenz, die gerade in den Jahren 2007 bis 2010 (Abbildung 10) deutlich wurde.

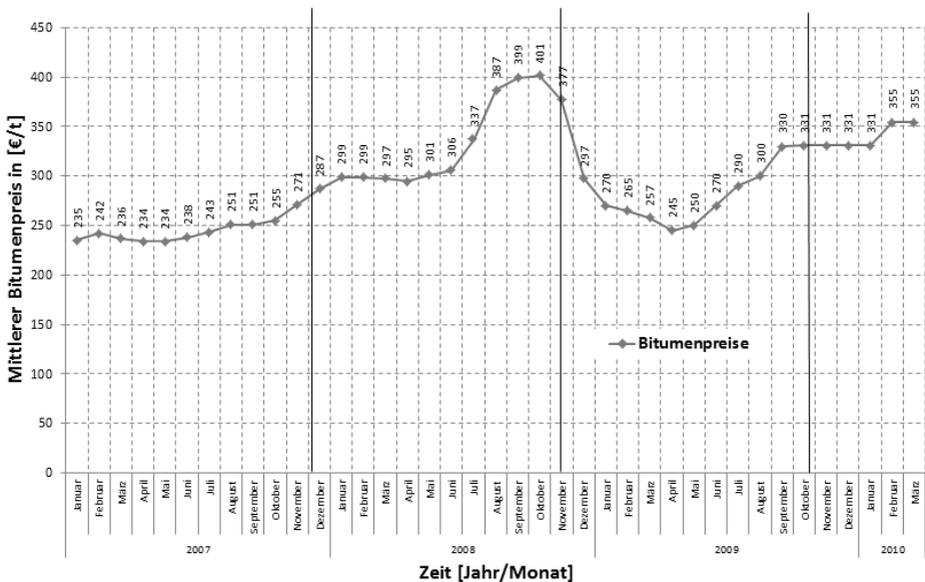


Abbildung 10: Räumlich gemittelte Bitumenpreise (Bitumen 70/100) in Deutschland von Januar 2007 bis März 2010

Da Asphaltstraßen witterungsbedingt zumeist in der zweiten Jahreshälfte gebaut werden, ist die Nachfrage nach Bitumen nicht konstant. Die Bitumenkaltbehandlung ist daher nicht nur eine Folge der zuvor gezeigten Tendenzen auf den Märkten, sondern sie kann auch – ähnlich einem Termingeschäft – zur saisonübergreifenden Preisabsicherung beziehungsweise Materialkostenreduktion eingesetzt werden. Hierbei konkurriert sie allerdings gegen Absicherungsinstrumente beim Bitumeneinkauf, weshalb diese neben der physischen Versor-

gungssicherung im Kapitel 3 unter dem Sammelbegriff „Sicherungsinstrumente“ genauer betrachtet werden.

3 Sicherungsinstrumente in der Bitumenversorgung

Wie in Kapitel 1 und Kapitel 2 dargelegt, ist auf dem derzeitigen Asphaltbindemittelmarkt eine Veränderung abzusehen [Al10]. So rückt die Frage nach neuen Möglichkeiten der Versorgungssicherung in den Vordergrund [Al10]. Stets liegt der Absicherung die Überlegung zugrunde, dass für ein Unternehmen, das seine Wertschöpfung aus einem Produktionsprozess bezieht, offene Preisentwicklungen eines Inputfaktors ein größeres Risiko darstellen als begrenzte Mehrkosten aus dem Einsatz von Absicherungsinstrumenten [Br10]. Dennoch wird ein Großteil der Asphaltbindemittel zum Tagespreis eingekauft (tagesaktueller Einkauf) und dann zeitnah in die Asphaltmischanlagen geliefert. Dieses Verfahren wird hier nach Hutschenreuther und Wörner [HuWö10] (wie bereits in den Unterabschnitten 2.3.1 und 2.4.2) als Just-in-time-Handhabung/Logistik bezeichnet. Die Liefersicherheit in diesem Standard-Distributionsverfahren unterliegt zahlreichen Einflüssen. So können Produktionspeaks in der Asphaltproduktion, ebenso wie Produktionsausfälle auf Raffinerieseite (streikbedingt, wartungsbedingt), zu großen Engpässen bei der Versorgung führen. Da diese Probleme in der Vergangenheit bereits auftraten, gibt es bereits eine gewisse Anzahl an einkaufsseitigen Absicherungsinstrumenten. Abschnitt 3.1 erläutert diese Preisabsicherung beim Bitumeneinkauf. Daneben gibt es technische Methoden der Versorgungssicherung, welche in Abschnitt 3.2 vorgestellt werden. Hinzu kommen Entwürfe für Instrumente der Preisabsicherung, die derzeit in der Praxis angedacht sind oder erprobt werden. Auch diese Sicherungsinstrumente der Asphaltbindemittelversorgung werden in diesem Abschnitt hinsichtlich ihrer theoretischen Grundlagen, ihres derzeitigen Entwicklungsstands in der Praxis und ihrer Umsetzung dargelegt und anschließend diskutiert. Auch diese neuen Methoden werden in einkaufsseitige Preis- und physische Versorgungssicherung unterschieden und in den jeweiligen Abschnitten 3.1 und 3.2 behandelt.

3.1 Preisabsicherung beim Bitumeneinkauf

Unter Preisabsicherung beim Bitumeneinkauf oder einkaufsseitiger Absicherung werden hier alle Maßnahmen verstanden, die es einem Akteur auf dem Bitumenmarkt ermöglichen, sich gegen nicht vorhergesehene Schwankungen

des Preises² beim Einkauf (also ohne technische Hilfsmittel wie eigene Lagerhaltung) abzusichern. Ein Großteil des Bitumenbedarfs in Deutschland wird von den bitumenverarbeitenden Betrieben zum Tagespreis eingekauft. Je nach Unternehmensrandbedingungen wird daneben ein Anteil des voraussichtlichen Bedarfs mittels Termingeschäft (Hedge) vorab preislich fixiert. Wie in vielen Bereichen der Versorgungssicherung mit Rohstoffen hat der Einsatz von einkaufsseitigen Sicherungsinstrumenten in den letzten Jahren deutlich zugenommen [Br10]. Normalerweise hängt die Auswahl einer Absicherungsstrategie von den Zielen ab, die ein Unternehmen mit der Absicherung verfolgt [Br10]. Da Bitumen allerdings nicht auf dem Finanzmarkt gehandelt wird³, sind für Asphaltproduzenten derzeit Termingeschäfte zumeist nur direkt mit den Lieferanten oder den Zwischenhändlern möglich (Forward-Verträge). Die theoretischen Grundlagen dieser und weiterer Hedge-Geschäfte gilt es daher im Kontext der Preisabsicherungsinstrumente genauer vorzustellen (Abschnitt 3.1.1) und ihre Ausprägungsformen im Bitumenhandel zu erläutern (Abschnitt 3.1.2). Daraufhin gilt es, Ansätze vorzustellen, die Versorgungssicherung um die Absicherung auf dem Finanzmarkt (Future-Kontrakte in Abschnitt 3.1.3 und Optionen in Abschnitt 3.1.4) zu erweitern. Abschließend werden die vorgestellten Möglichkeiten diskutiert und ein möglicher Lösungsansatz vorgestellt (Abschnitt 3.1.5). Die Preisabsicherung wird hierbei als Teil der Absicherungsinstrumente verstanden.

3.1.1 Grundlagen zur einkaufsseitigen Preisabsicherung

Auf den Finanzmärkten werden zahlreiche Werte (oder engl.: Assets) gehandelt. Eines davon ist das Derivat. Das Derivat ist ein Wertpapier, dessen Preis von dem eines anderen Werts oder Assets abgeleitet wird [Hu09]. Das Asset, von dem das Derivat abhängt, wird als Basiswert (oder engl.: Underlying) bezeichnet. Derivate gehören zur Gruppe der Termingeschäfte [BIer08]. Zu den Standardgeschäften bei den Derivaten zählen Forward-Kontrakte (Forwards), Future-Kontrakte (Futures), Swaps und Optionen [Hu11]. Sie lassen sich in unbedingte und bedingte Termingeschäfte sowie Swaps unterscheiden. Bei Fu-

² Unter dem Preis kann hierbei auch der Preis für das Bitumen selbst zuzüglich einer Versicherungsprämie verstanden werden.

³ Diese Aussage bezieht sich auf Futures bzw. Optionen mit dem Bitumen(-preis) als Basiswert. Diese Begriffe werden allerdings erst in den Unterabschnitten 3.1.3 und 3.1.4 erläutert.

tures und Forwards handelt es sich um unbedingte Waretermingeschäfte, bei denen das Asset am Ende einer vertraglich vorgeschriebenen Zeit physisch geliefert werden muss. Optionen stellen hingegen Derivate dar, bei denen die Option auf eine Ausgleichszahlung statt der physischen Lieferung des Basisgutes besteht. Daneben existieren noch Swaps, welche zukünftige Zahlungsströme auf Grundlage von bestimmten Kursentwicklungen zwischen den Vertragsparteien regeln. Auf die genauen Eigenschaften der vier genannten Derivate wird in den nachfolgenden Unterabschnitten eingegangen. Der Fokus wird auf Derivate gelegt, deren Basiswert Güter beziehungsweise deren Preise sind. Da es auf dem Finanzmarkt keine Derivate gibt, deren Basiswert Bitumen ist, wird in dieser Arbeit versucht, die Eignung derivativer Absicherungsinstrumente zur Bitumenpreissicherung abzuschätzen, deren Basiswert eine ähnliche Preisentwicklung wie die des Bitumens aufweist. Dieser Vorgang wird als Cross-Hedge bezeichnet [ChSu07], wobei auch mehrere Derivate zu diesem Zweck in einem Composite-Hedgeportfolio zusammengefasst werden können. Auf die Möglichkeiten und Probleme bei der Zusammenstellung solcher Portfolios aus Futures wird im zugehörigen Unterabschnitt explizit eingegangen.

3.1.2 Absicherung mittels Forwards

Die Absicherung der Bitumenpreise mittels Forward-Kontrakten stellt die gängige Praxis im deutschen Bitumenhandel dar [Hö10]. Unter anderem deshalb wird diese Form der Preisabsicherung im Bitumenhandel zumeist vereinfacht als „Hedging“ bezeichnet, obwohl der Hedging-Begriff theoretisch weitere Instrumente umfasst.

Beim Forward-Kontrakt werden zwischen den Vertragspartnern, zumeist einem bitumenverarbeitenden Betrieb und einem Raffineriebetreiber oder Bitumenhändler, feste Preise für zukünftig zu lieferndes Bitumen vereinbart. Es ist dabei möglich, in Verträge zu unterscheiden, bei denen bestimmte beziehungsweise variable Liefermengen festgelegt werden. Es liegt dabei zumeist im Interesse der Bitumenabnehmer, die Verträge möglichst flexibel zu gestalten, da so bei Änderung der Auftragslage entsprechend reagiert werden kann [Hö19].

In jedem Fall besteht für die Vertragsparteien ein Restrisiko, dass das Bitumen nicht lieferbar ist. Für solche Fälle sind spezielle Vertragskonditionen festzulegen. Allgemein gilt, dass die Vertragsgestaltung Gegenstand der Verhandlungen der Vertragsparteien ist.

3.1.3 Absicherung mittels Futures

Anders als bei Forwards handelt es sich bei Futures um Terminkontrakte, die vereinheitlicht sind [MüMö02]. Sie werden an den Terminbörsen gehandelt und sind standardisiert hinsichtlich Qualität, Menge, Laufzeit und Lieferort des Basiswertes. Die Börse stellt mittels einer sogenannten Clearingstelle sicher, dass sowohl die Ware als auch das Geld transferiert werden. Die Börse tritt also als Abwicklungspartner auf, wobei die Clearingstelle der Ansprechpartner der beiden Vertragsparteien ist. Verlangt ein Verkäufer nach Auslaufen des Futures die Warenauslieferung, so findet die Clearingstelle einen Käufer, der die Ware abnehmen muss oder innerhalb einer bestimmten Zeitspanne (zumeist einer Stunde) auf einen Händler übertragen kann. Andersherum heißt dies für die Käufer, dass sie die Future-Kontrakte jederzeit verkaufen und die Preisabsicherung durch den Kauf eines neuen Futures verlängern können. Dies ist von entscheidender Bedeutung, wenn man den Basiswert nicht beziehen will, sondern die Futures zur Kompensation von Preisänderungen anderer Güter einsetzt [Hu09][MuMö02].

Die direkte Preisabsicherung mittels Futures mit Bitumen als Basiswert ist, wie in Unterabschnitt 3.1.1 dargestellt, nicht möglich. Eine Absicherung ist daher nur indirekt über Futures auf andere Güter möglich. Ein solches Vorgehen wird als Cross-Hedging bezeichnet [ChSu07].

3.1.3.1 Future Cross-Hedges

Eine Preisabsicherung mittels eines Derivats, dessen Basiswert ein anderes Gut als das abzusichernde Gut ist, wird als Cross-Hedging bezeichnet. Das Cross-Hedging ist gängige Praxis bei anderen Produkten, die aus Rohöl hergestellt werden. So werden Dieselpreise mit den Notierungen für »ULSD 10 ppm FOB Barges Rotterdam« abgesichert, da diese dem deutschen Tankstellendiesel weitgehend entsprechen [Br10]. Bei der Auswahl eines Kontraktes für einen Cross-Hedge können ähnliche Regeln angewendet werden wie zur Auswahl eines Kontraktes für einen direkten Hedge [AnDa81]. Entscheidend ist, dass der Preis des abzusichernden Gutes mit dem Preis des Basiswerts ausreichend korreliert. Nach Hull kann dies auf Grundlage historischer Daten überprüft werden [Hu09]. Trotzdem erhöht sich das Risikopotential, da eine zukünftige Abweichung nie gänzlich ausgeschlossen werden kann.

In der Praxis scheitert das Future-Cross-Hedging zur Absicherung von Bitumenpreisen zumeist an der Findung eines geeigneten Basiswertes.

3.1.3.2 Future Composite-Hedges

Werden zum Cross-Hedging mehrere Derivate genutzt, so liegt ein „Composite-Hedge“ vor. Die Portfoliobestandteile müssen dabei denselben Risikoquellen wie der Wert des abzusichernden Gutes unterliegen [ChSu07]. Der Bitumenpreis in Deutschland hängt unter anderem von Wechselkursen, Rohölpreisen, Energiepreisen, Lieferbedingungen, Jahreszeit und der Marktsituation ab. Hieraus wird bereits deutlich, dass sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten ergibt.

Da keiner der Basiswerte physisch geliefert werden soll, müssen die Terminkontrakte im Portfolio immer wieder verlängert werden. Hieraus ergeben sich zusätzlich erhöhte Händlergebühren und Risiken.

3.1.4 Optionen und Swaps zur Bitumenpreisabsicherung

Optionen räumen dem Käufer das Recht ein, bestimmte Zahlungen oder Lieferungen zu erhalten, die unter festen Konditionen an bestimmte Ereignisse geknüpft sind [De08-1]. Sie werden in Kaufoptionen (Call) und Verkaufsoptionen (Put) unterteilt. Durch Kombination von Calls und Puts in einem Portfolio kann an starken Preisschwankungen partizipiert, beziehungsweise es können zukünftige Preiskorridore für die Rohstoffbeschaffung gesichert werden.

Zieht ein Unternehmen beispielsweise Schweröl-(HFO)-Optionen zur Absicherung des Bitumenpreises heran, haben die in Unterabschnitt 3.1.1 genannten Probleme weiterhin Bestand, da der Bitumenpreis aufgrund von konjunkturellen, saisonalen sowie qualitätsspezifischen Einflüssen nicht ausschließlich vom Schwerölpreis abhängig ist.

Bei Swaps handelt es sich nicht um Terminkontrakte. Vielmehr wird zwischen den Vertragsparteien der Tausch von Zahlungsströmen vereinbart [BlEr08]. Ein produzierendes Unternehmen zahlt beispielsweise einer Bank regelmäßig einen festen Betrag, damit die Bank dem Unternehmen den Differenzbetrag zu den aktuellen Rohstoffpreisen auszahlt. Das Kursrisiko wird dadurch von der Bank übernommen.

Für Bitumen besteht die Möglichkeit, die Preisdaten der Argus Media Limited, die durch eigens festgelegte Methoden Preise und Marktdaten erhebt, dem Swap-Vertrag zugrunde zu legen [ARGUS09]. Die Zahlungen, die für den Asphaltproduzenten hierbei in der Praxis entstehen können, werden mit zirka 20 €/t angegeben [Er10].

3.1.5 Bewertung einkaufsseitiger Versorgungssicherungsinstrumente

Dieser Abschnitt zeigt, welche Möglichkeiten es zur Bitumenpreisabsicherung gibt, wie diese teilweise weiterentwickelt werden und wo die jeweiligen Probleme sind. Bei reiner Absicherung des Preises mittels derivativer Finanzinstrumente verbleibt ein gewisses „Basisrisiko“. Dieses Basisrisiko kann

„[...] im Zusammenhang mit unterschiedlichen Produktspezifikationen (zum Beispiel Schwefelgehalt), Lieferorten (zum Beispiel Rotterdam oder Düsseldorf) und Zeitpunkten (zum Beispiel Monatsdurchschnitt oder Stichtag) zwischen physischem Produkt und finanzieller Sicherung auftreten“ [Br10].

Das Risiko wird bei der oft notwendigen Zugrundelegung anderer Basiswerte, beispielsweise beim Cross- oder Composite-Hedging, noch dadurch verstärkt, dass eine Lieferung des fremden Basiswerts in einem bitumenverarbeitenden Betrieb nicht erwünscht ist.

Bisher unberücksichtigt blieb der zeitliche Aspekt. Neben der Frage, ob und in welchen Mengen eine Sicherung sinnvoll ist, sehen sich Unternehmen mit der Wahl des Absicherungszeitpunktes konfrontiert [Br10]. Ein Blick auf historische Preisdaten lässt vermuten, dass eine Abhängigkeit zwischen dem Bitumenpreis und den prozentualen Preisänderungen von Assets, die von Rohöl abgeleitet werden, mit einem zeitlichen Versatz von zirka zwei Monaten besteht. Abbildung 11 verdeutlicht beispielhaft diesen Zusammenhang, indem sie die zeitliche Verschiebung einiger Preisspitzen von Bitumen und Rohölfutures zeigt.

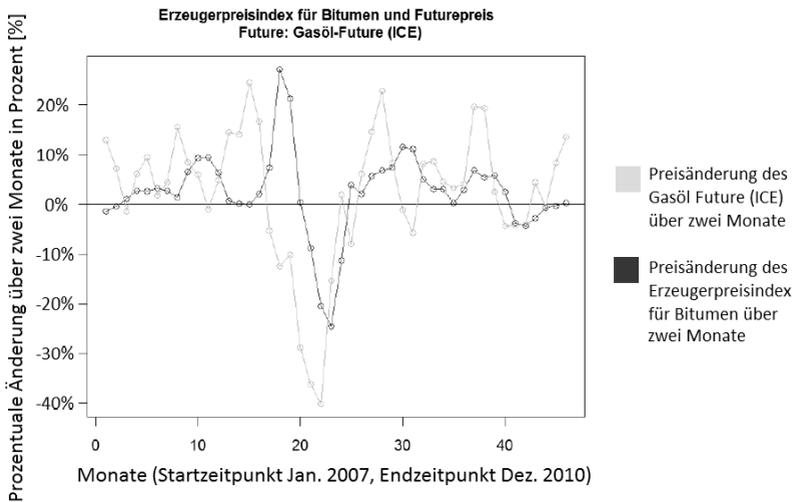


Abbildung 11: Zweimonatige prozentuale Änderungen des Erzeugerpreisindex für Bitumen 70/100 ohne zeitliche Verschiebung und zweimonatige prozentuale Änderungen des Gasöl-Futurepreises (ICE; Datenquelle: Bloomberg, Statistisches Bundesamt)

Gemäß der in Abschnitt 3.1 formulierten Fragestellung lässt sich daher abschließend festhalten, dass derzeit unter den einkaufsseitigen Absicherungsinstrumenten vor allem Termingeschäfte mit den Lieferanten (Forwards) für die Sicherung der Bitumenversorgung eingesetzt werden. Noch sinnvoller erscheint es aber, die zeitliche Verschiebung in der Korrelation zwischen Bitumen und Rohölpreisen zu nutzen, um mittels der im nächsten Kapitel vorgestellten Technologien das Bitumen rechtzeitig einzulagern oder zu verflüssigen.

3.2 Physische Bitumenversorgungssicherung

Zwischen dem finanziellen Absicherungsgeschäft und dem physischen Produkt verbleibt ein Basisrisiko [Be10]. Zur Minimierung dieses Risikos gibt es verschiedene Arten der physischen Versorgungssicherung, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Hierzu werden zunächst in Abschnitt 3.2.1 grundlegende Probleme, Fakten und Chancen der physischen Bitumenversorgung dargestellt. Daraufhin werden in Abschnitt 3.2.2 alle Arten der konventionellen Tanklagerung vorgestellt. Im Weiteren wird in Abschnitt 3.2.3 die Möglichkeit der Bitumenkaltlagerung gezeigt und schließlich werden in Abschnitt 3.2.4 alternative Versorgungsansätze vorgestellt. Abschließend werden die verschiedenen

physischen Absicherungsinstrumente dieses Kapitels in Abschnitt 3.2.5 vergleichend bewertet.

3.2.1 Grundlagen zur physischen Absicherung

Die physische Bitumenversorgungssicherung (also der Einkauf und die Lagerung des Asphaltbindemittels selbst) unterliegt diversen Problemen, bringt aber auch Vorteile mit sich. Ein Problem ist, dass neben den zahlreichen Bitumenspezifikationen des Destillationsbitumens nach DIN 1426 über hundert verschiedene polymermodifizierte Bitumen, Oxidationsbitumen, Fluxbitumen, Gummibitumen und viele mehr existieren. Eine bedarfsgerechte Lagerhaltung gestaltet sich daher schwierig.

Das Problem wird zum einen dadurch gemindert, dass ein verhältnismäßig hoher Anteil des Gesamtbedarfs im Asphaltstraßenbau aus Destillationsbitumen, insbesondere Bitumen 70/100, gedeckt wird. Darüber hinaus erfolgt die Modifizierung dieses Basismaterials teilweise erst nach der Lagerhaltung. Hierfür werden in der Praxis auch derzeit immer flexiblere und vielseitigere Modifizierungsanlagen entwickelt (Bsp.: Biturox-Anlage [Pö12]) [Al10].

Ein Grund, die physische Absicherung den im letzten Abschnitt behandelten einkaufsseitigen Absicherungsinstrumenten vorzuziehen, stellt die regionale und zeitliche Inhomogenität der Bitumenpreise dar. Hinzu kommt, dass selbst wenn es gelänge, über das reine Termingeschäft hinausgehende Finanzinstrumente mit Bitumen als Basiswert zu erschaffen, damit eine Vielzahl unterschiedlicher Bitumensorten abgesichert werden müssten. Abbildung 12 stellt dar, wie stark die Preise sich innerhalb eines Jahres an den Lieferstandorten alleine für Bitumen 70/100 unterscheiden können. Preisunterschiede von zirka 40 € pro Tonne sind demzufolge normal.

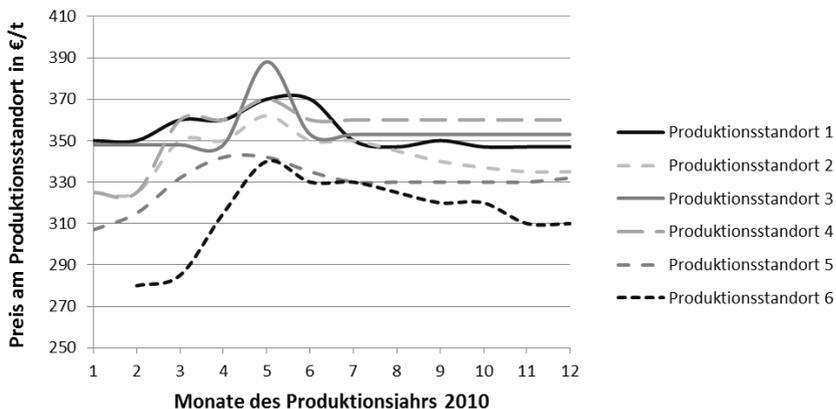


Abbildung 12: Regionale Schwankungen der jeweils für die Monate gemittelten Bitumenpreise (Bitumen 70/100) ausgewählter Raffineriestandorte in 2010 aus Daten eines Unternehmens

Außerdem gibt es bisweilen von Seiten der Bitumenproduzenten niedrige öffentliche Preisangebote für begrenzte Bitumenmengen, die naturgemäß nach wenigen Tagen erschöpft sind und dazu dienen, die Lager der Raffinerien zu entlasten. Nur mittels eines flexiblen Bitumeneinkaufs wird es möglich, an den dargestellten regionalen und zeitlichen Preisschwankungen zu partizipieren, indem Bitumen zu niedrigen Preisen gekauft und zu hohen Preisen verkauft⁴ wird. Hierzu ist auf Nachfragerseite das Vorhalten ebenso flexibler Lagerkapazitäten erforderlich, die unter anderem im Folgenden vorgestellt werden.

3.2.2 Konventionelle Bitumenheißlagerung

In Abschnitt 2.1.2 wird dargelegt, dass aufgrund der thermophysikalischen Eigenschaften des Bitumens (thermoplastisches Bindemittel mit temperaturabhängiger Viskosität) bituminöse Bindemittel nur in heißem Zustand pumpbar sind. Bei kurzen Lagerdauern (beispielsweise im Zusammenhang mit der Produktion) und entsprechenden Tanklagern wird es daher zumeist als günstiger erachtet, Bitumen heißflüssig zu belassen. Diese konventionelle Art der Bitumenlagerhaltung kann entsprechend des industriellen Kontexts verschiedene Formen annehmen und verschiedenen Zwecken dienen, die im Folgenden vor-

⁴ Hierunter kann auch der Verkauf in Form von Asphalt, also an einen Bauträger im Asphaltstraßenbau, verstanden werden.

gestellt werden. Die Technologien werden in Kapitel 4 ausführlicher beschrieben.

3.2.2.1 Lagerung in der Raffinerie

Raffinerien verfügen zumeist über Bitumentanklagerkapazitäten von mehreren tausend Tonnen in mehreren zylindrischen Lagertanks. Die Tanklagerung von Produkten der Erdölgewinnung in der Raffinerie dient in erster Linie dem Zweck einer kontinuierlichen Lieferfähigkeit. Darüber hinaus kann das Lager bei einigen Produkten wie Bitumen, die teilweise stark saisonalen Preisunterschieden unterliegen, der Pufferung von Nachfrageschwankungen (auch Nachfragespitzen) dienen. Auch auf der im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachteten Produzentenseite kann es daher zu spekulativen Einflüssen auf die Preisentwicklung kommen.

3.2.2.2 Lagerung in Tanklagern

Bitumentanklager sind Industrieanlagen, die lediglich aus den in der Raffinerie üblichen Lagertanks bestehen und in denen unterschiedliche Bitumensorten eingelagert werden. Die Tanklagerbetreiber sind Auftragnehmer der Raffineriebetreiber, der Bitumenhändler und der Produzenten von bituminösem Bindemittel und Asphalt. Die Vertragsgestaltung zwischen den Akteuren kann sehr unterschiedlich ausfallen. Zumeist wird das Vorhalten einer bestimmten Lagerkapazität von Seiten der Lagerbetreiber für den jeweiligen Kunden gegen einen Pauschalbetrag vereinbart. Die Lagerhaltung dient zum einen dem Zweck der Versorgungssicherung, zum anderen ist es möglich, durch Lagerhaltung von Preisschwankungen zu profitieren [Wa08].

3.2.2.3 Lagerung in Asphaltmischanlagen

Die Heißlagertanks in den Asphaltmischanlagen sind entweder stehend oder liegend ausgeführt [HuWö10]. Sie haben ein Tankvolumen von 26 Tonnen bis über 100 Tonnen [HuWö10]. Unter betrieblichen Gesichtspunkten dienen sie der Aufnahme von heißflüssigen Bitumenlieferungen aus den Tankkraftwägen, die jeweils zirka 25 Tonnen liefern. Das Bitumen wird dann aus den Lagertanks nach und nach an die Produktion abgegeben. In der Nebensaison werden die Lagertanks auch zur Kaltlagerung des Bitumens genutzt. Vor Produktionsstart wird dem erkalteten Bitumen dann rechtzeitig Wärmeenergie zugeführt.

Die Tanklager in den Asphaltmischanlagen können aufgrund ihres verhältnismäßig geringen Fassungsvermögens in Kombination mit ihrer dezentralen An-

ordnung und ihrer ständigen Entleerung für die Produktion nur schwer für Maßnahmen der Versorgungssicherung und die Spekulation auf Preisentwicklungen herangezogen werden.

3.2.3 Bitumenkalthandhabung mit anschließender Wiederverflüssigung

Die Bitumenkalthandhabung war vor zirka 50 Jahren eine gängige Form der Bitumenlogistik [HuWö10]. Aufgrund der Tatsache, dass es zahlreiche kleine Bitumenlieferchargen gab, wurden zahlreiche Eisenblechtrommeln gegen ein Verkleben mit dem Bindemittelinhalt „ausgetont“, befüllt und distribuiert [HuWö10]. Auch in den ehemals planwirtschaftlich organisierten Ländern Osteuropas war die Bitumenkalthandhabung aufgrund infrastruktureller Probleme unter anderem Stand der Technik [Hö10][Wu11]. Heute findet gerade in der Verguss- und Abdichtungsmassenproduktion für den Hoch-, Tief- und Verkehrswegebau zu einem großen Anteil Bitumenkalthandhabung statt. „Harte Bitumen“ werden hierzu entweder als Blockware in Kunststofffolien verpackt oder in silikonisierten Kartons unterschiedlicher Größe bis zirka 40 Kilogramm gefüllt (Abbildung 13).



Abbildung 13: Bituminöse Bindemittel in (links:) Schumpffolie und (rechts:) silikonisierten Kartons

Insbesondere für den Transport über weite Distanzen bietet sich die Kalthandhabung an, da die Transportkosteneinsparungen des Kalttransports gegenüber dem Heißtransport die Kosten für Verpackung und Verflüssigung überkompensieren können. Gerade für Baumaßnahmen in Ländern, die sich noch in ihrer infrastrukturellen Entwicklung befinden, werden daher größtenteils Bitumenkalttransporte zumeist in 200-Liter-Fässern durchgeführt. Auch Transportcontainer kommen hier zum Einsatz [Wu11]. Global steigt die Nachfrage nach kaltem Bitumen aufgrund steigender Bauaktivitäten in diesen Ländern [Al10]. Wegen zusätzlicher witterungsbedingter Nachfrage- und damit Preisschwankungen wird auch in Industrieländern wie Deutschland über Bitumenkalthandhabung in erster Linie zum Zwecke der Preisabsicherung nachgedacht. Die Entwicklung neuer und die Weiterentwicklung vorhandener Verpackungs- und Verflüssigungstechnologien ist die Folge. Welche Technologien in diesem Bereich derzeit zur Verfügung stehen, wird ausführlich in Kapitel 4 vorgestellt.

3.2.4 Sonderformen der physischen Versorgungssicherung

Neben der konventionellen Heißlagerung und dem Einsatz moderner Bitumenkalthandhabungstechnologien zur physischen Versorgungssicherung mit Bitumen sind weitere Sonderformen der Versorgungssicherung denkbar und teilweise im Einsatz. Diese Sonderformen der Versorgungssicherung werden hier der Vollständigkeit halber kurz vorgestellt.

3.2.4.1 Lagerschiffe im Kontext der internationalen Versorgung

Einige Unternehmen des internationalen Bitumenhandels haben sich darauf spezialisiert, Tankschiffe mit Bitumen zu befüllen. Diese Tankschiffe werden anschließend allerdings nicht immer einem definierten Zielhafen zugeführt, sondern es kann vorkommen, dass der Bestimmungsort der heißflüssigen Schiffsladung sich aus der Entwicklung der regional stark unterschiedlichen Bitumenpreise weltweit ergibt. Das heißt, in dieser Sonderform der Lagerhaltung folgt der Weg des Bitumens dem internationalen Preisanstieg. Dies kann in Einzelfällen zur Folge haben, dass die Bitumentanker tagelang auf See verweilen und mehrmals den Kurs ändern, bevor sie einen Zielhafen zur Entladung ansteuern.

3.2.4.2 Versorgungssicherung mittels alternativer Bindemittel

Zur Absicherung der Asphaltproduktion wäre die Verwendung alternativer Bindemittel denkbar. Theoretisch wäre der Einsatz der teuren alternativen Asphaltbindemittel immer dann möglich, wenn die Bitumenpreise ein bestimmtes Preisniveau übersteigen. In der Praxis hätte dies einen nachfragebedingten An-

stieg der Preise für alternative Bindemittel zur Folge, deren Distributionsmengen in der derzeitigen Industriekonfiguration verhältnismäßig gering ausfallen. Es ist unter anderem deshalb trotz der Preisschwankungen derzeit keine größere Anwendung alternativer Bindemittelvorkommen zur Versorgungssicherung bekannt.

3.2.5 Bewertung der physischen Versorgungssicherungsinstrumente

In den letzten Abschnitten werden verschiedenste Instrumente der physischen Versorgungssicherung vorgestellt. Demzufolge steht bei der Wahl von physischen Absicherungsinstrumenten der Bitumenversorgung in einem Großunternehmen in erster Linie die konventionelle Heißlagerung in Tanklagern der modernen Bitumenkalthandhabung (Kaltlagerung mit anschließender Wiederverflüssigung) gegenüber. In der Praxis bestimmen die Gesamtkosten der jeweiligen Variante den Anteil, mit dem sie im Rahmen des Versorgungsmanagements zum Einsatz kommt. Die Gesamtkosten bestimmen sich allerdings in einer Versorgungskette unter anderem auch aus Transport- und Lagerkosten. So ist ein wesentlicher Vorteil der Versorgungssicherung mittels Kaltlagerung die Tatsache, dass jeder LKW, der zum Stückguttransport verwendet wird, auch für die kalten Bitumengebinde verwendet werden kann [HuWö10]. Es werden keine Tanklastkraftwagen benötigt. Sowohl Transport- als auch Lagerkosten sind darüber hinaus abhängig von den Lagerstandorten. Eine gegenüberstellende Bewertung dieser beiden physischen Absicherungsinstrumente ist daher nur nach einer vorhergehenden Standortplanung möglich, wie sie in Kapitel 6 durchgeführt wird. An dieser Stelle wird daher zunächst nur auf nicht-monetäre Aspekte eingegangen. Im Folgenden werden diese ergänzenden Vorteile der Lagervarianten im Kontext physischer Handhabungsmethoden von Bitumen aufgezählt [Wu11].

Vorteile der Heißlagerung sind

- hohe Flexibilität hinsichtlich der Entnahmemengen,
- keine Verpackungsentsorgung,
- jahrelange Erfahrung in der Praxis,
- keine Abfüllvorrichtungen für die jeweiligen Gebindesysteme notwendig,
- keine aufwändige Wiederverflüssigung.

Vorteile der Bitumenkaltlagerung sind

- hohe Flexibilität hinsichtlich Lagerstandort und der jeweiligen Lagerkapazität,

- keine aufwändigen Lagertanks mit Gründungsfundament,
- keine Energiezufuhr während der Lagerung,
- kaum Sicherheitsvorschriften im Lager.

3.3 Diskussion Bitumenversorgungssicherungsinstrumente und Ausblick

In diesem Kapitel werden im Wesentlichen zwei Verfahrensweisen der Versorgungssicherung beschrieben. Zum einen werden die Preisabsicherungsinstrumente beim Bitumeneinkauf wie Termingeschäfte und Swaps einzeln betrachtet und die physische Versorgungssicherung in Heiß- oder Kaltlagern vorgestellt. Daneben werden die beiden Verfahrensweisen der physischen Sicherungsinstrumente in ihren unterschiedlichen technischen Ausprägungsformen dargelegt.

Bei Betrachtung der jeweiligen Verfahren, stellt sich heraus, dass sowohl die einkaufsseitige als auch die physische Absicherung in der Praxis praktiziert werden. Sowohl der Handel mit Forwards auf Bitumen als auch die Tanklagerung in heißflüssigem Zustand scheinen daher technisch sinnvolle Varianten der jeweiligen Absicherungsformen für die Produktion zu sein.

Um nun die physischen Absicherungsinstrumente untereinander und gegenüber der einkaufsseitigen Absicherung vollständig bewerten zu können, ist es notwendig, die Kosten dieser Verfahren genauer zu untersuchen. Es gilt herauszufinden, ob die Bitumenkalthandhabung andere Verfahren ganz oder teilweise zur Reduzierung der Gesamtkosten ersetzen kann. Bevor dies in Kapitel 5 erfolgt, müssen allerdings die unterschiedlichen Technologien der Bitumenkalthandhabung noch genauer analysiert werden, um diesbezüglich eine Vorauswahl zu treffen und eine Kategorisierung der Verfahren zu ermöglichen. Dies erfolgt im nächsten Kapitel.

4 Technologien der Bitumenkalthandhabung

Wie in den vorausgegangenen Kapiteln dargelegt, stellt die Bitumenkalthandhabung eine Alternative zu anderen Logistikvarianten (vgl. Kapitel 3) dar. Laut Albrecht ist damit zu rechnen, dass die Entwicklungen in dieser Marktnische in den nächsten Jahren gerade im internationalen Kontext immer mehr in den Mittelpunkt logistischer Problemlösungen rücken werden [Al10]. Diesem Kapitel liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine sinnvolle Auswahl vielversprechender Technologien der Bitumenkalthandhabung zu treffen und diese vorzustellen. In diesem und in den nächsten Kapiteln wird damit gemäß dem Schema der

Abbildung 14 der Auswahlprozess von Technologiekombinationen (Verpackungsart kombiniert mit einer Verflüssigungstechnologie) vollzogen.

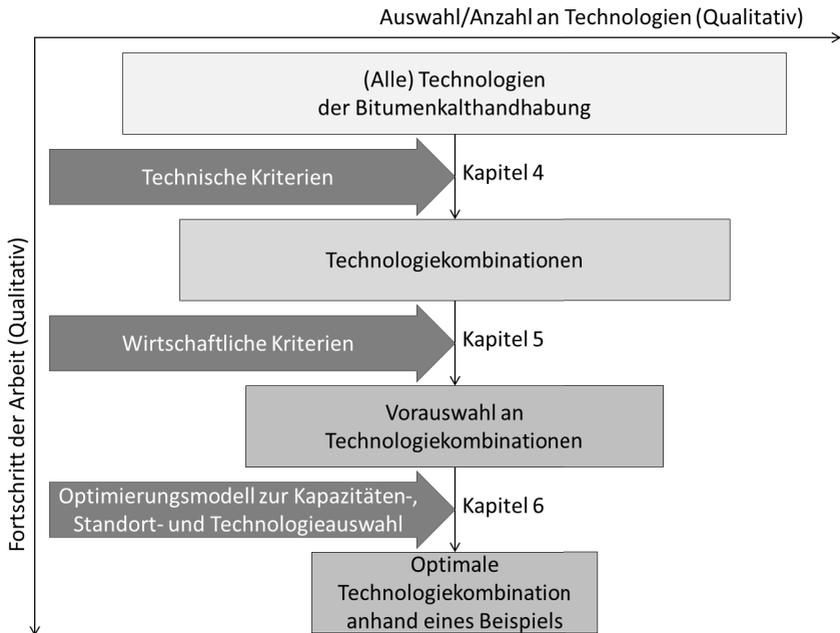


Abbildung 14: Auswahlprozess von Technologiekombinationen für eine unternehmensspezifische Versorgungskette

In Abschnitt 4.1 werden Technologien der Bitumenabfüllung und Lagerung vorgestellt. Ausgehend von den jeweiligen Verpackungsvarianten können die be-

nötigten Abfüllanlagen und die jeweilige Lagerausstattung beschrieben werden. Aufbauend auf den Darstellungen der Verpackungen und der Lagerstruktur werden in Abschnitt 4.2 Technologien der Wiederverflüssigung des Asphaltbindemittels dargestellt und in Abschnitt 4.3 alle gezeigten Technologien abschließend technisch bewertet.

4.1 Technologien der Stoffabfüllung und Lagerung

Bitumen werden weltweit im Rahmen der Kalthandhabung in Stahlgebilde (Blechtrommeln, Fässer, Transportcontainer), Kunststoffgebilde (Big-Bags, Schrumpffolie) und silikonierter Kartongebilde verpackt. Verpackungen aus Holz oder Materialkombinationen sind auch gebräuchlich. Als Verpackung seien hier die Stoffe definiert, die eingesetzt werden, um das Bindemittel Bitumen im Rahmen der heißflüssigen Befüllung bis zur Wiederverflüssigung von umliegenden Medien zu trennen. Ein Gebilde sei dann eine Einheit der mit kaltem Bitumen gefüllten Verpackungen. Je nach Verpackungsart sind unterschiedliche Abfüllanlagen im Einsatz und teilweise erforderlich. Insbesondere für das Befüllen von Kunststoffverpackungen muss das Bitumen auf für das Gebidematerial verträgliche Temperaturen heruntergekühlt werden. Die Eignung einer Verpackungsart ist aber nicht nur material-, sondern ebenso geometrieabhängig [Wu11]. So haben zu voluminöse Gebilde unter anderem den Nachteil, dass der Bitumeninhalt, dessen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeeindringvermögen ohnehin sehr gering sind, nur sehr langsam verflüssigt werden kann. Sind die Bitumenverpackungen hingegen zu klein, fallen zumeist Mehrkosten für das Verpackungsmaterial an. Darüber hinaus spielen eine Vielzahl anderer technischer und wirtschaftlicher Größen und Zusammenhänge eine Rolle, auf die in diesem Abschnitt eingegangen wird.

4.1.1 Bitumenverpackungsarten

Bei einer vergleichenden Eignungsbewertung von Bitumenverpackungen sind vorab stets die Anforderungen und Randbedingungen der jeweiligen Anwendung zu definieren [SiWuZa11]. So haben Asphaltmischanlagen in abgelegenen Regionen Afrikas andere Anforderungen an die Robustheit des Verpackungsmaterials als Produktionsstätten in Deutschland. Die Wahl der letztlich zum Einsatz kommenden Verpackungsart stellt daher ein komplexes Problem dar. Tabelle 4-1 zeigt die derzeit bekannten, einander teilweise sehr ähnlichen Verpackungssysteme.

Tabelle 4-1: Übersicht über Verpackungssysteme

Name	Bitumen- inhalt [Li- ter]	Beschreibung
Transportcontainer	24.000	Abgedichteter ISO 20 Container, mit integriertem Heizrohr entlang des Containerbodens, das als Thermalölleitung oder als Flammrohr zur Erwärmung eingesetzt wird
Transporttank	24.000	Tankcontainer mit integriertem Heizrohr entlang des Containerbodens, das als Thermalölleitung oder als Flammrohr zur Erwärmung eingesetzt wird
Flachcontainer	12.000	Containersystem mit halber Containerhöhe. Die abgeflachte Geometrie beschleunigt den Vorgang der Erwärmung
Fass	120-200	Zylindrisches Stahlbehältnis
Trommel	60	Zylindrisches Stahlblechbehältnis
Eimer	40	Zylindrisches Stahlblechbehältnis mit Deckel
Big-Bag	1.000-2.000	Tragender Polypropylen-Sack mit PE oder PP-Inliner als Trennmittel
B2bag®	1.000	Tragender Polypropylen-Sack mit PE oder PP-Inliner als Trennmittel. Konische Form und Aussteifungselemente zur Sicherstellung der Lagerstabilität; Hebeschlaufen
POLYCUBE®	330	Tragender Polypropylen-Sack mit Trageschlaufen + PE-Inliner als Trennmittel. Optimale Geometrie für Containertransport, günstige Geometrie für Wiederverflüssigung
Folienschlauch	50-100	Befüllte Folienschläuche geschnitten nur für "harte" Bitumen

Name	Bitumen- inhalt [Li- ter]	Beschreibung
Schrumpffolie	50	PE-Tüten im Wasserbad befüllt. Die Polyethylen-Schrumpffolien sind in biaxialer oder monoaxialer Ausführung herstellbar
Granulattüten	40	Verschweißte PE-Tüten. Gesteinsmehl als Trennmittel. Die einzige Verpackung, die kalt befüllt wird
PE-Eimer	30-40	Eimer aus Polyethylen, nur für "weiche Bitumen" wie Fluxbitumen einsetzbar
Bitubale®	25 und mehr	Flacher PE-Schlauch (SBS) mit Bitumenfüllung aufgerollt
STRABOX®	111	Innenseitig silikonierter Karton mit Umreifungsbändern aus Kunststoff, die tragende und stabilisierende Funktionen erfüllen. Ein Deckel ermöglicht Stapelbarkeit. Optimale Geometrie für Wiederverflüssigung in allen Typen von Verflüssigungsanlagen
verschiedene Kartontagen	2-40	Innenseitig silikonierter Kartonschachteln, teilweise u.a. als Witterungsschutz eingeschweißt
Clovertainer	1.000	Karton oder Pressholzgebände mit aussteifenden Vollholzelementen, die auch die Stapelbarkeit begünstigen. Teilweise mit Silikonkarton und Kunststoffumreifungsbändern

Für die Auswahl von Verpackungen wurde teilweise bereits eine gewisse Vorauswahl getroffen (vgl. [SiWuZa11]). Die Auswahl kann aus Erkenntnissen im Bereich der thermodynamischen Simulation des Verflüssigungsvorgangs und wirtschaftlichen Überlegungen getroffen werden [SiWuZa11]. So können beispielsweise Tankcontainer aufgrund der langen Verflüssigungszeit, also der

thermophysikalisch bedingten Handhabungskosten, ausgeschlossen werden. Es werden aufgrund ihrer Eignung Fässer, Polycubes® und der Strabox®, also jeweils eine Metall-, Kunststoff- und Silikonkartonvariante, als Vorauswahl vorgeschlagen (vgl. [SiWuZa11]). Die drei Verpackungsarten seien daher auch für diese Arbeit ausgewählt und im Folgenden kurz vorgestellt.

4.1.1.1 Fässer

Das Fass stellt die derzeit gängigste Form der Handhabung verhältnismäßig kleiner Mengen von Erdölprodukten dar. Beim Einsatz als Bitumenverpackung ist das Herauslösen des adhäsiven Inhalts allerdings nur unter Wärmezufuhr möglich [Wu11]. Das Fass erleidet dabei keinerlei Verformungen.

Die Kosten für das Metall sind mit bis zu zirka 200 €/t [Ri12] vergleichsweise hoch. Es gibt daher nur wenige Gründe, die das wirtschaftlich aufwändige Fasshandling in Anbetracht der Entwicklung günstigerer Konkurrenzsysteme derzeit noch rechtfertigen. Einer davon ist, dass Fässer robust sind und damit den rauen Handhabungsbedingungen einiger Produktionsstätten angemessen erscheinen. Oft wird die Möglichkeit angeführt, dass das Fass in der Praxis auch von nur einer Person über wenige Meter gerollt werden kann.

Darüber hinaus ist eine Wiederverwendung der Fässer zumindest in Industrieländern Stand der Technik, was die Verpackungskosten stark reduzieren kann. Letztlich kommen Fässer in vielen Fällen deshalb zum Einsatz, weil hierzu die größte Praxiserfahrung vorliegt. Die Kosten für das Fassmaterial können sich stark unterscheiden, je nachdem ob die Fässer wiederverwendet werden oder gegen Korrosion geschützt sind.

4.1.1.2 Polycube®

Ebenso wie das Fass kann auch der Polycube® für andere Stoffe (beispielsweise Wasser oder Kunststoffgranulat) verwendet werden. Er stellt eine Weiterentwicklung der Big-Bags dar, die in vielen Bereichen der Industrie (auch der Asphaltindustrie) für verschiedenste andere Stoffe zum Einsatz kommen. Sein wesentliches Merkmal ist unter anderem ein zweischichtiger Aufbau der Gebindehaut. Während der außen liegende Gewebesack aus Polypropylen stabilisierend und formgebend wirkt, wirkt eine innen liegende Folie aus Polyethylen gegen ein Verkleben der tragenden Außenhülle mit dem Bitumen. Beide Kunststoffsäcke müssen zunächst ineinander gedrückt werden, bevor das heißflüssige Bitumen (bei für die Verpackung verträglichen 110 °C) eingefüllt wird und das Gebinde so in seine voluminöse Form (zirka 50 cm * 50 cm * 110 cm)

drückt. Die innere Trennfolie (Inliner) ist nach dem Abkühlen des Bitumens fest mit diesem verbunden. Die tragende Außenhaut ist mit mehreren stabilen Schlaufen versehen, die das Anheben mittels Kran, Radlader oder Gabelstapler erleichtern. In das Material der Außenhülle sind Bestandteile eingearbeitet, die es UV-beständiger machen.

Unter technischen Gesichtspunkten besitzt der Polycube® eine Vielzahl von Vorteilen. Er ist äußerst robust gegenüber stumpfen Einwirkungen (Kippen vom Radlader). Das Verpackungsmaterial ist leicht und recyclebar. Seine Geometrie ermöglicht das Befüllen von Transportcontainern unter Ausnutzung von fast 100 % des Laderaums [Po11]. Mit Standardgerät ist er auch mit heißflüssigem Inhalt leicht zu handhaben, aber auch eine manuelle Handhabung unter Zuhilfenahme von Winden und Hebeln ist theoretisch möglich. Die längliche Geometrie erleichtert die Wiederverflüssigung mittels konduktiver Wärmezufuhr. Die Verflüssigung ist mittels der in der Praxis teilweise bereits vorhandenen Fassschmelzer oder spezieller Schmelztöpfe möglich [Po11], auf die in Abschnitt 4.2.1 eingegangen wird. Der Polycube® kann über verhältnismäßig lange Zeiträume unter Bewitterung im Freien gelagert werden, ohne dabei nennenswerte Verformungen zu erfahren.

Der entscheidende Vorteil, der in der Praxis genannt wird, sind die niedrigen Stückkosten⁵ [Po11] für diese Form der Kunststoffverpackung (zwischen 30,- und 38,- Euro pro Tonne Bitumen). Dabei wird allerdings zumeist vergessen, dass eine Investition für eine Abfüllanlage mit hohem technischen Aufwand und hohem Energiebedarf benötigt wird, um das Bitumen auf die oben erwähnten Temperaturen herunterzukühlen.

Ein großer technischer Nachteil ist die Tatsache, dass die Gebindeinnenhaut nach Abkühlen des Bindemittelinhalts fest mit dem Bitumen verschmolzen, verklebt und teilweise verschlungen ist [Wu11]. Dies hat zur Folge, dass das Bitumen-Kunststoff-Gemisch anschließend entweder homogenisiert werden muss, um dann in den Asphalt eingearbeitet zu werden, oder dass die Kunststoffreste in der Schmelze unter hohem Personalaufwand manuell entfernt werden müssen.

⁵ Stückkosten (€/t) sind die auf eine Ausbringungseinheit (hier Tonnen) entfallenden Kosten.

4.1.1.3 Strabox

Wie der Polycube® ist auch die Strabox Verpackungslösungen aus der Distributionspraxis bituminöser Bindemittel entlehnt, denn sogenannte Silikonkartons kommen für modifizierte Abdichtungs- und Vergussmassen in allen Bereichen des Ingenieurbaus zur Anwendung. Diese Kartonkisten von bis zu zirka 50 Liter Fassungsvermögen sind auf ihrer dem Bitumen zugewandten Seite mit einer dünnen Silikonschicht versehen, die den adhäsiven Kräften der bituminösen Bindemittel entgegenwirkt. Zur Erhöhung der Stabilität sind die Oberkantenränder mit einer aussteifenden Umschlaglasche versehen. Trotzdem kann es gerade während der Lagerung zu Verformungen der Gebinde kommen. Größere Kartons ab zirka 20 Liter Fassungsvermögen werden daher oft zusätzlich mit stabilisierenden Stahlklammern versehen.

Die Vorteile der Silikonkartons sind im Allgemeinen die Möglichkeit, sie mit Bitumen bei bis zu 200 °C [DPMA10] befüllen zu können und die Möglichkeit, die Verpackung sowohl vom kalten als auch vom warmen oder heißen Inhalt leicht wieder ablösen zu können.

Die Strabox stellt eine Modifikation dieser einfachen Verpackungskisten dar, wie im Folgenden dargelegt wird. Ihr wichtigstes Merkmal ist, dass sie über ein vergrößertes Fassungsvermögen von zirka 110 Litern verfügt. Der dadurch verhältnismäßig große Verformungsdruck wird von Umreifungsbändern aus Kunststoff zum Teil aufgefangen [DPMA10]. Diese Umreifungsbänder, die jeweils ein Gebinde zweimal vertikal umspannen, dienen ebenfalls dazu, die Strabox mittels Gabelstapler oder Radlader anheben zu können [DPMA10]. Besonders effizient ist die Handhabung dann, wenn der Radlader oder Gabelstapler mit drei Zinken ausgestattet ist. Dann können jeweils drei Gebinde mit insgesamt rund einer Dritteltonne Gesamtgewicht gemeinsam angehoben werden. Unter anderem zu diesem Zweck sind jeweils drei Gebinde mit horizontalen Umreifungsbändern zusammengefasst. Ist ein solches Dreiergebinde mit einem lastverteilenden Deckel versehen, so ist das Stapeln von drei Dreiergebinden, also insgesamt einer Tonne, auf einer Europalette möglich [DPMA10]. Damit die Gebindeverformungen die Europaletten-Maße nicht bereits bei der heißflüssigen Befüllung überschreiten, dienen einerseits die bereits erwähnten horizontalen Umreifungsbänder zur Stabilisierung und andererseits werden die Kartonabmessungen (Bodenfläche: 715·330 mm; Höhe: 473 mm) so gewählt, dass die Europaletten-Maße auch nach Verformung gerade noch eingehalten werden [DPMA10]. Die Geometrie des kalten Bitumens entspricht damit auch einem Kompromiss zwischen Verpackungskosten und Verflüssigungszeit in Abhängigkeit von der Geometrie.

Gegenüber den Fässern hat die Strabox den Vorteil, dass sie leicht (2,5 kg/Stück), faltbar, von geringem Eigenvolumen, recyclebar und der Bitumeninhalt kalt entpackbar ist [Wu11] und niedrige Stückkosten (je nach Abnahmemenge 31,- bis 40,- Euro pro Bitumentonne) hat. Die Nachteile der Strabox gegenüber dem Fass liegen darin, dass sie empfindlich gegenüber spitzer Beanspruchung und Feuchtigkeit ist [Wu11]. Die Vorteile der Strabox gegenüber dem Polycube® liegen darin, dass keine aufwändige Abfüllanlage benötigt wird, in der hundertprozentigen Trennbarkeit der Verpackung vom bituminösen Bindemittel und in der Möglichkeit, die Gebinde nicht nur Fassschmelzern und Schmelztöpfen, sondern auch Mikrowellenverflüssigungsanlagen zugeben zu können [Wu11]. Die Nachteile der Strabox gegenüber Kunststoffverpackungen sind die tendenziell etwas höheren Kosten für das Verpackungsmaterial, die geringere Robustheit gegen physische Beanspruchungen (Feuchtigkeit, mechanische Beanspruchung) und die schlechte Stapelbarkeit [Wu11].

4.1.2 Abfüllanlagen

Prinzipiell wird nur ein einfacher Bitumenauslauf aus einem Tanklager benötigt, um die einfachste Form einer Abfüllanlage zu erhalten. Wie bei einer Probenentnahme fließt das Bitumen bei Lagertemperatur (zirka 160 °C) in die entsprechende Verpackung, die unter dem Auslauf positioniert wird.

Kunststoffverpackungen (siehe Tabelle 4-1) lassen sich allerdings nicht bei Bitumen-Pump- beziehungsweise Lagertemperatur füllen. Die verwendeten Kunststoffe zersetzen sich bei hoher Temperatur. Dies ist in der Regel auch gewünscht, da insbesondere Folienverpackungen mit dem Bindemittel (mit dem sie verklebt sind) verflüssigt werden sollen. Je nach Folienrezeptur ist daher eine Temperaturdifferenz zwischen der Bitumen-Lagertemperatur und der Abfülltemperatur notwendig. Es genügt dabei nicht, das Bitumen in irgendeiner Form „von selbst abkühlen“ zu lassen. Erstens ist eine solche Abkühlung sowohl in Tanks als auch in Rohrleitungen aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Bitumens stets von hoher Inhomogenität. Zweites ist das Bindemittel dann aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der Viskosität nur unter hohem Aufwand pumpbar und homogenisierbar.

Diesen Grundprinzipien folgend, wird der Aufbau einer Verflüssigungsanlage daher bei Pörner [Pö04][Pö05][Pö07][Pö08] wie im Folgenden dargestellt beschrieben. Abbildung 15 stellt zunächst den Bitumentank 1 mit Heizelementen 2 dar, wie sie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben werden und wie sie sowohl in der Bitumen- als auch der Asphaltproduktion Standard sind. Die Förderpumpe 3

pumpt das heißflüssige Lagerbitumen durch eine Förderleitung 5 zu einem Plattenwärmetauscher 6. Eine Rückstromleitung 4 ermöglicht es, die Förderleitung wieder zu entleeren. Der Plattenwärmetauscher dient bei Anlagenbetrieb dazu, das Bitumen auf für die Kunststoffverpackung verträgliche Temperaturen herunterzukühlen, und wird mittels Kühlmittelkreislaufleitung 10 und Pumpe 11 vom Kühler 12 aus mit einem Wärmeträger wie Thermal-Öl beschickt. Das zähe Niedertemperaturbitumen wird indessen durch die Füllleitung 7 zum Abfüllkopf 8 gepresst, um in die Verpackungen 13 und 9 eingefüllt zu werden. Die fertigen Gebinde 14 müssen anschließend in ein Abkühlager gebracht werden, wo sie bis zu 7 Tage [Pö05] verweilen müssen.

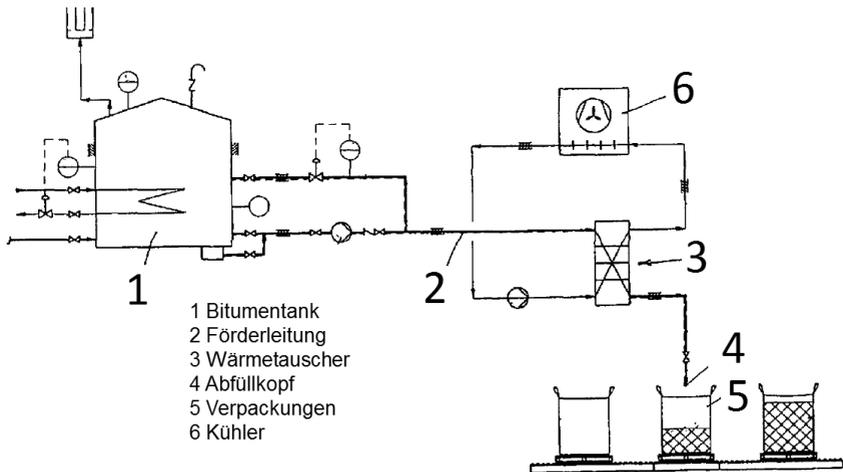


Abbildung 15: Skizze der Elemente einer Abfüllanlage [Pö04][Pö05][Pö07][Pö08]

Diese Abfüllanlagen sind nicht zu verwechseln mit den relativ unaufwändigen Abfüllvorrichtungen zur Befüllung anderer Verpackungssysteme, denn der Bau von Abfüllanlagen ist mit hohen Investitionen verbunden. Sie stellen damit einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten der Bitumenkalthandhabung mit Kunststoffverpackungen dar. Auf die ökonomische Bewertung der Technologien wird im nächsten Kapitel ausführlich eingegangen.

4.1.3 Bitumenkaltlager

Bei den Lagern für Bitumengebinde sind Abkühl- und Versorgungslager zu unterscheiden. In den gut gelüfteten [Pö05] Abkühlagern verweilen die Karton- oder Kunststoffgebinde nur für einen fest vorgegebenen Zeitraum, der je nach Gebindegeometrie bis zu 7 Tage [Pö05] dauern kann. Es gibt auch Kunststoff-

gebinde-Konfigurationen, die direkt nach der Abfüllung mit heißflüssigem Inhalt verladen werden können. Sowohl beim Verladen als auch im Abkühlager ist ein sorgfältiger Umgang mit den Gebinden erforderlich, denn ein Einreißen der Kunststoffhülle kann zum Auslaufen des heißflüssigen Bitumens führen. Das auslaufende Bindemittel gefährdet nicht nur das Personal und die Geräte, sondern ist auch nur unter sehr hohem Aufwand wieder entfernbar, wenn es abgekühlt ist.

Auch in den Lagern, die der Versorgungssicherung der Produktion dienen, ist in Abhängigkeit von der Robustheit der Bitumenverpackungen eine gewisse Handhabungssorgfalt geboten. Da das Bitumen hier zumeist bereits erkaltet ist, sind die Folgen beschädigter Gebindehüllen nicht mit so hohem Beseitigungsaufwand verbunden wie in den Abkühlagern. Trotzdem wird eine regelmäßige Bestandskontrolle empfohlen, um das Auslaufen des thermoplastischen Bitumens zu minimieren.

Bei nicht witterungsbeständigen Bitumenverpackungen wie der „Strabox“ sind Zelthallen notwendig, um die Gebinde zu schützen. Auch andere Konstruktionen können als Lagerhallen dienen, die Zelthallen stellen jedoch die wirtschaftlich günstigste Variante dar [He10]. Darüber hinaus haben Zelthallen technische Vorteile. So ist tagsüber keine Beleuchtung notwendig. Zelthallen sind modular erweiterbar und die Zusatzmodule können monatsweise angemietet werden. Bei entsprechender Anordnung der Aluminiumgerüste halten sie denselben Wind- und Schneelasten Stand wie massive Gebäude. Die Errichtung der Zelthallen geht schnell und ohne Lärmemission vor sich. Es sind keinerlei Fundamente oder ähnliches notwendig. Zelthallen können auch auf abfallendem Gelände installiert werden. Die Lebensdauer einer Zelthalle kann bei über 20 Jahren liegen.

Neben den Lagerflächen ist ein Bitumenkaltlager mit weiteren Elementen ausgestattet, die teilweise für einen reibungslosen Betrieb erforderlich sind. Hierzu gehören die Flächen, die für das Be- und Entladen von Transportcontainern erforderlich sind, das hierfür benötigte Gerät (Krane, Radlader, Stapler), Container für das Personal, Anschlüsse an die Versorgungsnetze, Beleuchtung und Zäune.

4.2 Technologien der Wiederverflüssigung

Bitumen kann durch das Zuführen von Wärme verflüssigt werden, denn als Thermoplast ist die Viskosität des Bitumens temperaturabhängig [Ai04]. Neben unterschiedlichen Verpackungssystemen stehen in der Bitumenkalthandha-

bung auch unterschiedliche Verflüssigungsverfahren mit unterschiedlichen Typen von Verflüssigungsanlagen zur Verfügung. Dabei ist die Wahl der Verpackungs- und Verflüssigungssysteme nicht entkoppelt zu sehen. Nicht jede Verflüssigungsanlage ist mit Gebinden jeder Verpackungsvariante beschickbar. In diesem Abschnitt werden nun die Verflüssigungsverfahren, die Anlagentypen und ihre Anforderungen an die Verpackung beschrieben.

4.2.1 Konventionelle Anlagentypen

Als konventionell werden hier all die Anlagen zur Verflüssigung, also zur Erwärmung des Bitumens definiert, die in der Praxis bereits im Einsatz sind. Konventionelle Anlagentypen können nach benötigtem Energieträger (Strom oder fossile Brennstoffe), nach Bauart (Schmelztopf, Fassschmelzer), nach Wärmeträgersystem (Flammrohr, Thermalölleitung usw.) oder nach primär zugegebenem Gebindesystem (Fassschmelzer, „Polycube®-Melting-Unit“ usw.) unterschieden werden. Für eine Analyse von Verflüssigungssystemen unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit bietet sich die Unterteilung nach Bauart als Spezifikation mit größtem Einfluss auf die Kostenstruktur der Anlage an. Der Begriff „Fassschmelzer“ schließt in diesem Kontext nicht aus, dass die Anlagenform auch mit einigen Kunststoff- und Kartongebinden beschickt werden kann, wie es in der Praxis bereits durchgeführt wird.

4.2.1.1 Verflüssigung mittels Fassschmelzern

Fässer stellen in der Bitumenkaltlogistik derzeit noch eine der häufigsten Verpackungsformen dar. Entsprechend sind in Asphaltmischanlagen in Ländern, in denen Kaltlogistik praktiziert wird, größtenteils Fassschmelzer anzutreffen.

Fassschmelzer bestehen aus einer Schmelzkammer mit Zugabe- und Entnahmeklappen für die Bitumenfässer. In der Schmelzkammer verlaufen Heizleitungen, die mit einem Wärmeträger wie Thermalöl beschickt werden. Zusätzlich gibt es jeweils eine gewisse Anzahl an Komponenten, die der Erzeugung von Wärmeenergie dienen und die, unter anderem je nach Art des Energieträgers (Strom oder Brennstoffe), unterschiedlich sein können.

Die Schmelzkammer, an deren gegenüberliegenden Seiten jeweils die Zugabe- und Entnahmeklappen angeordnet sind, ist zweigeteilt. Im unteren Teil befindet sich eine vergleichsweise schwach beheizte Auffangwanne für das Bitumen, aus der es auch abgepumpt wird. Im oberen Teil sind viele der Wärmeträgerleitungen so angeordnet, dass die Bitumenfässer vierseitig von den Leitungen gehalten von den Zugabeklappen zu den Entnahmeklappen geschoben werden.

Bei Anlagenbetrieb erfolgt dieser Schiebevorgang mittels einer hydraulischen Kippvorrichtung unterhalb der Zugabeklappen. Auf diese Kippvorrichtung wird ein volles Bitumenfass gerollt. Anschließend hebt die Kippvorrichtung das Bitumenfass in die Zugabeöffnung und schiebt dabei die sich in der Anlage befindenden Fässer weiter zur Entnahmeöffnung, an der die Fässer letztlich leer entnommen werden können.

Dieser einfache Vorgang kann ebenso an Kunststoffgebinden oder an entpackten Kartongebindeinhalten passender Abmessungen durchgeführt werden, mit dem Unterschied, dass keine Verpackungen an den Entnahmeklappen entnommen werden müssen.

4.2.1.2 Verflüssigung mittels Schmelztöpfen

Neben den Fassschmelzern gibt es, unter anderem, die Möglichkeit der Bitumenverflüssigung mittels Schmelztöpfen. Unter Schmelztöpfen werden alle Vorrichtungen verstanden, in denen eine gewisse Menge an heißflüssigem Bitumen in einem Behälter vorgehalten wird, um entpackt zugegebenes kaltes Bitumen mittels Wärmeleitung zu erwärmen. Die Anordnung der Wärmeträgerleitungen innerhalb des bereits verflüssigten Bitumens ist daher ein wesentliches technisches Merkmal aller Verflüssigungsvorrichtungen, die den Schmelztöpfen zugeordnet werden können. Anders als beim Fassschmelzer erfolgt die Erwärmung des kalten Bitumens somit indirekt über das bereits verflüssigte Material. Die Verfahrensweise bietet einige Vorteile gegenüber der direkten Erwärmung, bei der Wärme direkt von den Heizelementen in das kalte Bitumen strömt. Ein Vorteil ist, dass die Wärme ganzflächig über die Oberfläche der zumeist versinkenden Bitumenkalteinheit eingetragen wird. Dies ermöglicht das Übertragen einer größeren Wärmemenge. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Temperaturgradient von heißem zu kaltem Bitumen kontinuierlich ist, was wiederum bedeutet, dass die Erwärmung materialschonend abläuft.

Ein Nachteil dieses Anlagentyps besteht darin, dass kein in Fässer verpacktes Bitumen zugegeben werden kann. In der Regel wird daher eine Zugabe von Bitumen praktiziert, das in Kunststoffgebinde verpackt ist, wobei der tragende Polypropylensack, falls vorhanden, vorher entfernt wird. Der Teil der Kunststoffverpackung, der in direktem Bitumenkontakt ist und daher nicht entfernt werden kann (vgl. 4.1.1.2), wird entweder teilweise mitverflüssigt oder muss dem Schmelztopf manuell entnommen werden. Eine vergleichsweise einfache Variante der Bitumenkaltzugabe stellt hingegen das Einbringen entpackter Silikonkartoninhalte dar, an denen naturgemäß keine Verpackung klebt.

In den meisten Fällen muss das Bitumen jedoch vor der Zugabe entpackt werden. Dieser zusätzliche Aufwand ist aus verfahrenstechnischer Sicht von Nachteil und muss auch in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieses Anlagentyps Berücksichtigung finden.

4.2.1.3 Grenzen konventioneller Technologien

Die beiden hier aufgeführten konventionellen Verflüssigungsanlagentypen bedienen sich Verfahren der Wärmeübertragung mittels des Wärmestroms und gegebenenfalls⁶ des Wärmetransports. Beide Verfahren sind von den thermophysikalischen Parametern des zu erwärmenden Materials, insbesondere von der Wärmeleitfähigkeit abhängig. Die Bitumenwärmeleitfähigkeit ist allerdings vergleichsweise gering. Während beispielsweise Wasser im flüssigen Zustand eine Wärmeleitfähigkeit von $0,6 \frac{W}{m \cdot K}$ aufweist [MeSch89], hat flüssiges Bitumen lediglich eine Wärmeleitfähigkeit von $0,16 \frac{W}{m \cdot K}$. Dies hat zur Folge, dass viel Zeit benötigt wird, um das Bitumen mittels konventioneller Verflüssigungsanlagen zu erwärmen.

Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf diesen Prozess kann verringert werden, indem das Bitumen mittels Mikrowellen, also von innen, verflüssigt wird. Diese Möglichkeit wird im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

4.2.2 Verflüssigung mittels Hochfrequenztechnologie

Ergänzend zu den konventionellen Methoden der Bitumenverflüssigung kann Hochfrequenztechnologie (Mikrowellen) zur Erwärmung des Baustoffs eingesetzt werden. Der technische Aufbau der Mikrowellenverflüssigungsanlagen stellt sich wie folgt dar: Die Mikrowellen werden in einem sogenannten Magnetron erzeugt. Magnetrons haben, verglichen mit den anderen Anlagenkomponenten, eine geringe Nutzungsdauer. Um die thermischen Lasten auf das Magnetron zu reduzieren, ist eine Kühlvorrichtung für das Magnetron notwendig, die zusätzliche Energie benötigt. Die Kühlvorrichtung kann aus einem Kühlkreislauf mit unterschiedlichen Wärmeträgern oder einer einfachen Ventilation

⁶ In der Regel werden konventionelle Verflüssigungsanlagen mit Rührwerken und Umwälzpumpen versehen, um die Wärmekonduktion (Wärmeleitung) von den Heizelementen in das Bitumen zusätzlich durch Konvektionsprozesse (Wärmetransport) zu unterstützen.

bestehen. Die erzeugten Mikrowellen werden mittels Hohlleitern aus Metall in die Ofenkammer geleitet, wo sie mittels des Einkopplungssystems in das Bitumen eingetragen werden. Das Einkopplungssystem kann aus einer bestimmten Anordnung der Hohlleitermündungen, Antennen und anderen Vorrichtungen zur Homogenisierung des elektromagnetischen Feldes in der Ofenkammer bestehen. Eine anwendungsbezogene Ausgestaltung des Einkopplungssystems ist von entscheidender Wichtigkeit zur Erreichung eines hohen Anlagenwirkungsgrads und hoher Feldhomogenität. Schutzvorrichtungen aus mikrowellenresistenten Materialien wie Keramik oder Teflon verhindern, dass das Bitumen auf die Anlagenkomponenten gelangt. Das Bitumen kann kontinuierlich in entpacktem Zustand zugegeben werden. Heißflüssiges Bitumen wird im unteren Teil des Ofens kontinuierlich abgepumpt. Es gibt derzeit noch keine Erfahrungswerte darüber, ob zugegebenes Bitumen, das mit Trennfolie verbunden ist, auch im Mikrowellenofen verflüssigt werden kann.

Der Vorteil der Mikrowellenverflüssigungsanlagen für Bitumen ist die niedrige Verflüssigungszeit, die es ermöglicht, die großen Stoffmengen so schnell zu verflüssigen, wie sie in der Asphaltproduktion benötigt werden. Von Nachteil ist, dass zusätzliche Energie für die Rückkühlung der Magnetrons benötigt wird. Die gegenüber der restlichen Anlage reduzierte Lebensdauer der Magnetrons stellt einen weiteren Nachteil dar, der sich in den Kosten für Betriebsstoffe wiederfindet. Darüber hinaus ist der Energiepreis höher, wenn Strom statt Heizöl genutzt wird. Ein zusätzlicher Nachteil der Mikrowellenanlagen ist die Höhe der Investition und somit der investitionsabhängigen Kosten. Dies wird unter anderem dadurch verstärkt, dass dieser Anlagentyp bisher noch nicht zum Einsatz gekommen ist und daher nicht in Serie hergestellt wird.

4.3 Auswahl der Kalthandhabungstechnologien unter technischen Gesichtspunkten

Bei Gegenüberstellung möglicher Technologiekombinationen, also der Kombination von Verpackungs-, Lager- und Verflüssigungssystemen im Bereich der Bitumenkalthandhabung, wird deutlich, wie stark die Wahl eines geeigneten Systems einerseits von ökonomischen Aspekten und andererseits von den jeweiligen technischen Randbedingungen der Versorgungskette abhängig ist. Wirtschaftliche Kenngrößen ausgewählter Technologien werden erst im nachfolgenden Kapitel betrachtet. Hier wird zunächst auf die Problematik der technischen Restriktionen eingegangen.

In diesem Kapitel werden die neuen Technologien der Bitumenkalthandhabung in den Bereichen Verpackung, Abfüllung, Lagerung und Verflüssigung dargestellt. Es wird deutlich, dass die Wahl einer optimalen Bitumenverpackung nicht entkoppelt von Abfülltechnologien und Anforderungen an die Lagerhaltung gesehen werden kann. So benötigen Kunststoffverpackungen spezielle Abfüllanlagen und Kartonverpackungen eine überdachte Lagerhaltung. In der Praxis spielen vor allem auch monetäre Aspekte eine wichtige Rolle, weswegen davon ausgegangen werden kann, dass das aufwändige Fasshandling (vgl. Abschnitt 4.1.1.1) mit der Zeit an Bedeutung verlieren wird [WuHiStSch12]. Neben wirtschaftlichen Aspekten wird aber vor allem auch nach technischen Anforderungen der „Supply-Chain“ entschieden [SiWuZa11]. Dies hängt oft indirekt mit Kostenüberlegungen zusammen. Da eine direkte Bewertung hinsichtlich der monetären Auswirkungen der Systeme schwierig ist, fungieren die technischen Kriterien als Ersatzkriterien. In der Literatur [SiWuZa11] werden 20 Kriterien genannt, die in den Prozess der Entscheidungsfindung zu unterschiedlichen Gewichten miteinfließen. Diese sind wie folgt.

- 1) Handhabbarkeit der Gebinde
- 2) Technischer Aufwand bei der Befüllung
- 3) Laderaumausnutzung beim Transport
- 4) Mechanische Robustheit
- 5) Thermische Robustheit
- 6) Robustheit gegen Witterung
- 7) Abkühlverhalten
- 8) Technischer Aufwand bei der Wiederverflüssigung
- 9) Formstabilität
- 10) Stapelverhalten
- 11) Gestaltbarkeit der Gebindegeometrie
- 12) Standardisierungsgrad der Transportmaße
- 13) Verpackungsgewicht
- 14) Verpackungsvolumen
- 15) Entpackbarkeit
- 16) Innovativität

- 17) Handhabungserfahrung vorhanden
- 18) Ressourcenschonung
- 19) Wiederverwendbarkeit
- 20) Möglichkeiten des Recyclings

Das heißt, es gibt unterschiedliche Anforderungsprofile und damit keine eindeutige Technologieempfehlung. So kann beispielsweise in einem Anwendungsfall der Fokus auf einer bedarfsgerechten und damit schnellen Bitumenverflüssigung liegen, was das Verfahren der Mikrowellenverflüssigung mit kompatiblen Verpackungssystemen (vgl. Tabelle 4-2) notwendig macht. In einem anderen Fall werden eine oder mehrere Anlagen benötigt, die im Dauerbetrieb für eine Umwandlung des kalten Lagerbitumens in heißflüssiges Material ohne nennenswerte Bedarfsspitzen sorgen, wofür einer der konventionellen Anlagentypen geeigneter erscheint. Ebenso ist eine Kombination beider Verflüssigungsverfahren denkbar und unter bestimmten Voraussetzungen optimal. Diese Problematik gewinnt an Komplexität, wenn zusätzlich die möglichen Anforderungen an das Verpackungssystem betrachtet werden und hierbei berücksichtigt wird, dass nicht jede Verpackung mit jeder Verflüssigungsanlage kombinierbar ist. Um diese komplexe Fragestellung in einem ersten Schritt beherrschbar zu machen, werden die Verpackungs-, Lager- und Verflüssigungstechnologien hier in mögliche Technologiekombinationen zusammengefasst. Tabelle 4-2 macht deutlich, welche Technologiekombinationen möglich sind und welche zusätzlichen Abfüll- und Lagervorrichtungen dadurch benötigt werden.

Tabelle 4-2: Kombinierbarkeiten von Verpackungsart und Verflüssigungstechnologie. Kunststoffgebinde benötigt eine Abfüllanlage

Kombination	Fass- schmelzer	Schmelz- topf	Mikro- wellen- Ofen	Abfüll- anlage	Zelthalle
Fass	möglich	nicht mög- lich	nicht mög- lich	nicht not- wendig	nicht not- wendig
Kunststoff- verpackung	möglich	möglich	Nicht mög- lich	notwendig	nicht not- wendig
Karton- verpackung	möglich	möglich	möglich	nicht not- wendig	notwendig

Gemäß Tabelle 4-2 gibt es folgende sechs Technologiekombinationen⁷: Ein Fassschmelzer, der mit allen Gebindetypen, ein Schmelztopf, der mit Kunststoffgebinden und Kartongebinden und ein Mikrowellenofen, der mit Kartongebinden beschickt werden kann. Es werden jeweils für Kunststoffgebinde spezielle Abfüllanlagen und für Kartongebinde Lagerhallen benötigt.

Das hier verwendete Verfahren zur Vorauswahl von Technologiekombinationen auf Grundlage technischer Kriterien (Betrachtung der Kostenstruktur in Kapitel 5) ist insofern kritisch zu sehen, als eine klare Trennung zwischen technischem Aufwand und Kosten, welche durch die jeweilige Verfahrensweise verursacht werden, nicht immer möglich ist. So verursacht beispielsweise ein hoher Aufwand beim Aufrichten von Kartonverpackungen zugleich höhere Personalkosten.

Kapitel 5 wird es ermöglichen, die Gesamtkostenfunktionen der einzelnen hier erarbeiteten Technologiekombinationen zu generieren, so dass sie in das mathematische Optimierungsmodell in Kapitel 6 integriert werden können. Eine optimale Technologieauswahl wird so unter Einbeziehung der gesamten Bitumenversorgungskette des jeweiligen Anwendungsfalls möglich.

⁷ Die Notwendigkeiten hinsichtlich Abfüllanlage und Zelthalle werden nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

5 Ökonomische Bewertung von Technologien der Bitumenhandhabung

Zu Technologien im Bereich der Bitumenkalthandhabung zählen Verpackungskonzepte für Bitumen sowie Abfüll- und Verflüssigungsanlagen für Bitumen. Aufgrund des derzeit noch hohen Innovationsgrads von Technologien im Bereich der Bitumenkalthandhabung ist hier noch keine wissenschaftlich adäquate Literatur aufführbar. Es gibt technische Datenblätter zu verschiedenen Technologien von Seiten der Hersteller [Po11] [Bi11] u.a.), ökonomische Bewertungen dieser Produktsysteme werden derzeit jedoch nur in den Unternehmen (Bsp. [StZü11][StZü12][WuSk13]), vorgenommen, die die Anlagen operativ einsetzen. In diesem Kapitel werden die Technologien, die im Bindemittelversorgungsmanagement zum Einsatz kommen, mit Hilfe einer Investitions- und Kostenschätzung analysiert. Dabei werden die Technologien herausgegriffen, die im Zuge der anhaltenden Entwicklungen auf dem Bindemittelmarkt in den Fokus der Betrachtung von Bitumenversorgungsmanagern gerückt sind. Gemäß der Vorauswahl in Kapitel 4 werden drei exemplarische Verpackungssysteme, drei Arten von Verflüssigungsanlagen und eine neuartige Abfüllanlage ökonomisch bewertet. Zunächst werden hierzu in Abschnitt 5.1 Methoden zur Investitions- und Kostenabschätzung vorgestellt. Die Methodik zur Bewertung der genannten Technologien wird in Abschnitt 5.2 angewendet. Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der oben genannten modernen Technologien zur physischen Bindemittelversorgungssicherung werden in Abschnitt 5.3 dargelegt. Die Transport- und Lagerkosten werden dabei gesondert behandelt, da sie in Kapitel 6 gesondert in das Optimierungsmodell integriert werden. Die Kostenfunktionen, welche in Kapitel 6 benötigt werden, werden in Abschnitt 5.4 vorgestellt. Abschließend findet in Abschnitt 5.5 eine Zusammenfassung der für Investitionsentscheidungen relevanten Berechnungsergebnisse statt.

5.1 Methoden zur Investitions- und Kostenschätzung

Nach Rentz [Re79] lassen sich die jährlichen Gesamtkosten industrieller Prozesse mittels Gleichung 5-1 abschätzen.⁸ Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus investitionsabhängigen Kostenarten, betriebsmittelverbrauchs-abhängigen

⁸ In der Gleichung nach Rentz sind noch Erlöse (€/a) für Produkte berücksichtigt. Diese fallen in den hier betrachteten Bitumenversorgungsketten nicht an.

Kostenarten, Personalkosten, sonstigen Kosten und Folgekosten sowie dem Verkaufserlös für Produkte, insofern diese anfallen.

$$K = \sum_{j \in J} a_j \cdot (I - \Delta I_j) + \sum_{v \in V} m_v \cdot p_v + \sum_{l \in L} A_l \cdot p_l + \sum_{n \in N} S_n + \sum_{q \in Q} F_q \quad 5-1$$

Tabelle 5-1: Parametertabelle mit Relevanz für diese Arbeit und Referenz zum Abschnitt dieses Kapitels

Parameter	Beschreibung	Relevanz für die Beschreibung der Bitumenkalt-handhabung	Abschnitt/Kapitel
K	Gesamtkosten (€/a)	relevant	5.2.2; 5.2.3; 5.2.4; 5.2.5; 5.2.6; 5.2.7; 5.4.1; 0
j	Indexmenge der investitionsabhängigen Kostenarten	relevant	
a _j	Prozentsatz zur Ermittlung der investitionsabhängigen Kostenart j	nicht relevant	
I	Investition (€)	relevant	5.2.1
ΔI _j	Korrektur der Investition zur Bestimmung der Kostenart j (€)	nicht relevant	
v	Indexmenge der verbrauchsabhängigen Kostenarten	relevant	
m _v	Verbrauchsmenge der Sorte v (Mengeinheit/a)	relevant	5.2.3
p _v	Verrechnungspreis der Sorte v (€/Mengeinheit)	relevant	5.4
l	Indexmenge der Personalkostenarten	relevant	
A _l	Personalbedarf der Art l (Mitarbeiter/a)	relevant	5.2.4
p _l	Personalkosten der Art l (€/Mitarbeiter)	relevant	5.2.4
n	Indexmenge der sonstigen Kostenarten	nicht relevant	
S _n	Sonstige Kosten der Art n (€/a)	relevant	5.2.5
q	Indexmenge der Folgekostenarten	relevant	5.2.5
F _q	Folgekosten der Art q (€/a)	nicht relevant	5.2.5

Ein entscheidender Bestandteil der Kostenabschätzung ist die Quantifizierung der Gesamtinvestition. Insbesondere bei den vier hier untersuchten Anlagen in der Bitumenkalthandhabung (drei Verflüssigungsanlagen und eine Abfüllanlage) wird die Höhe der Investition in Abschnitt 5.2.1 abgeschätzt. Die Gesamtinvestition umfasst sämtliche Ausgaben für die Anlagenerrichtung von der Planung bis zur Inbetriebnahme [Re91]. Die Investition setzt sich zusammen aus der Anlagengrenze, bestehend aus Hauptkomponenten des Produktionssystems (Maschinen, Bauelemente) und direkten Nebenpositionen (Nebenkomponenten des Produktsystems, Montage aller Komponenten; Baustelleneinrichtung der Montagebaustelle; unvorhergesehene Investitionen) sowie indirekten Nebenpositionen wie Planung, Lagerhaltung und Bauzinsen. Die indirekten Nebenpositionen werden getrennt von der Anlagengrenze angegeben [ChFoRa03].

5.1.1 Methoden zur Investitionsschätzung

Die Investition eines Vorhabens kann mittels summarischer Verfahren, Verfahren mit Zuschlagsfaktoren oder über eine detaillierte Einzelermittlung geschätzt werden [Ko09]. Die Unterschiede dieser Verfahren hinsichtlich Genauigkeit und Datenbedarf und damit Eignung für die hier untersuchte Technologieintegrationsentscheidung seien im Folgenden dargelegt. Auch aufgrund dieser Unterschiede kommen sie in der Regel in unterschiedlichen Projektphasen zum Einsatz.

5.1.1.1 Summarische Verfahren der Investitionsschätzung

Bei summarischen Verfahren wird die Höhe der Gesamtinvestition mittels Summation ermittelt. Diese Methode kann auf Basis von Umschlagskoeffizienten des Anlagenkapitals und auf Basis von spezifischen Kapitalbedarfsziffern erfolgen.

Der Anlagenkapitalumschlagskoeffizient spiegelt das Verhältnis des jährlichen Ertrags einer Anlage und des Kapitalbedarfs der Anlage wider. Bei der Methode auf Basis des Umschlagskoeffizienten des Anlagenkapitals wird der Jahresumsatz also durch den Anlagenkapitalumschlagskoeffizienten dividiert. Voraussetzung ist, dass der Umschlagskoeffizient und der jährliche Umsatz der Anlage bekannt sind. Offensichtlich kann hierbei keine hohe Genauigkeit erzielt werden, da sich Umschlagskoeffizienten lediglich auf Anlagentypen im Allgemeinen beziehen, so dass in der Praxis die Verwendung der tatsächlichen Kapitaldaten dieser Methode nach Möglichkeit vorgezogen wird [Sch99].

Bei der konventionellen Anwendung von spezifischen Kapitalbedarfsziffern werden auf eine Kapazitätseinheit bezogene Werte des Kapitalbedarfs für die Anlage herangezogen. Ein Beispiel hierfür aus der Bitumenindustrie ist die Faustformel, nach der für ein Tanklager eine Investition (in Euro) in tausendfacher Höhe der Lagerkapazität (in Kubikmetern) eingeplant werden muss. Es liegt auf der Hand, dass beispielsweise bei derartigen Kapazitätseinheiten (Volumen), die in einem überproportionalen Verhältnis zum eigentlichen Aufwand beim Anlagenneubau (im Wesentlichen die Außenhülle) stehen, im oberen und unteren Anlagenkapazitätsbereich (20 m³ und 3000 m³ Tanklager) die abgeschätzten Investitionen relativ stark von den tatsächlichen Werten abweichen. Deshalb wird bei dieser Methodik eine Erweiterung herangezogen, die dazu dienen kann, den Schätzwert der Investition je nach Beschaffenheit der Kapazitätseinheit hinsichtlich Preisniveau, Standorteinfluss und Kapazität zu präzisieren. Während für Anpassungen des Preisniveaus oft Preisindizes für Anlagen der entsprechenden Industrie herangezogen werden, um sie mit der Gesamtinvestition zu multiplizieren [Sch80], werden Einflüsse der Kapazität beispielsweise durch einen Größendegressionsansatz berücksichtigt, wie er in nachfolgender Gleichung dargestellt ist.

$$I = a \cdot Kap^R \quad 5-2$$

I Investition in €

Kap Kapazität, beispielsweise Verflüssigungsleistung in Tonnen pro Stunde oder Lagermengen in Kubikmeter

a Kapitalbedarfsziffer

R Anlagenspezifischer Größendegressionsexponent

Aus einer bekannten Investition *I*₀ bei einer Kapazität *Kap*₀ und dem anlagenspezifischen Größendegressionskoeffizient *R* kann die zu ermittelnde Investition *I*₁ mit der Kapazität *Kap*₁ unter Eliminierung des Parameters *a* wie folgt bestimmt werden [ChFoRa76]:

$$I_1 = I_0 \cdot \left(\frac{Kap_1}{Kap_0} \right)^R \quad 5-3$$

Der Größendegressionskoeffizient ist anlagenspezifisch und liegt im Allgemeinen meistens zwischen 0,6 und 0,7.

5.1.1.2 Zuschlagsfaktormethoden

Die Methode der Investitionsermittlung mittels Zuschlagsfaktoren kommt meist in frühen Phasen der Anlagenprojektierung, also im Vorfeld eines Auftrages zur Anwendung [KI02]. Beim Anwenden der Zuschlagsfaktormethode wird oft eine höhere Genauigkeit hinsichtlich einer spezifischen Investitionsabschätzung erreicht. Dies liegt unter anderem daran, dass technische Eigenarten des Produktsystems umfassender berücksichtigt werden. Hierzu werden nur die wesentlichen Schlüsselpositionen einer Anlage oder eines Produkts detailliert kalkuliert. Alle anderen Bestandteile hingegen werden über empirisch ermittelte Beträge oder aus den Berechnungen einer eventuell vorhandenen Vorabkalkulation mittels Zuschlagsfaktoren geschätzt. Dieser Vorgehensweise liegt der empirisch oft beobachtbare Zusammenhang zu Grunde, dass die Investition für Apparate und Maschinen im Allgemeinen in einem proportionalen Verhältnis zum gesamten Anlagenkapitalbedarf steht [Sch99]. Die Zuschlagsfaktoren sind laut Klapp [KI02] abhängig vom Anlagentyp, insbesondere vom Aggregatzustand der Roh- und Fertigprodukte (fest, fest-flüssig oder flüssig). Klapp [KI02] gibt Gesamtfaktoren von 3,10 für feste, 3,63 für fest-flüssige und 4,74 für flüssige (Bitumen) Produkte an. Da die Hauptkomponenten der Anlagen nur ein geringer Bestandteil der Investition sind, ist diese Betrachtung nicht ausreichend. Eine Verfeinerung dieser Methode der globalen Zuschlagsätze stellt die Block-/Modulmethode zur Abschätzung von Investitionen dar. Bei dieser Faktormethode wird die geplante Anlage in funktionale Einheiten zerlegt. Die Kosten für eine funktionale Einheit werden durch eine Funktion der Kapazität und der Komplexität, z.B. ausgedrückt durch Druck- und Temperaturbereiche sowie Konstruktionsmaterialien, beschrieben [Ke08][Re91]. Um Ungenauigkeiten der Methode beispielsweise bei der Existenz von Kreislaufströmen und Nebenströmen zu berücksichtigen, wurde sie von Stallworthy [St70] und von Wilson [Wi71] weiterentwickelt. Gemeinsam ist den Block-/Modulmethoden jedoch, dass sie sich meistens auf Produktionsanlagen zur Verarbeitung flüssiger Stoffe beziehen [Ke08] und einen umfangreichen Datenbestand aus realisierten und ausgewerteten Projekten voraussetzen [Re91].

Diese Anforderung trifft auch auf die Verwendung differenzierter Zuschlagssätze und analytischer Zuschlagsfaktoren zu. Bei der Verwendung differenzierter Zuschlagssätze liegen für alle Bestandteile der Anlage mehrere, unterschiedlich detailliert ermittelte, technisch spezifische Zuschlagssätze vor. Diese Zuschlagssätze können sowohl aus der betriebsinternen Projekterfahrung als auch aus der Literatur stammen. Gleichung 2 zur Berechnung der Investition verdeutlicht die Einsatzweise dieser Methode, bei der die Zuschlagssätze addiert und multipliziert werden können.

$$I = I_0 \cdot \sum a_i \quad \text{bzw.} \quad I = I_0 \cdot \prod a_i$$

5-4

I Gesamtinvestition in €

I_0 Kapitalbedarf für Investition in €

a_i Zuschlagssatz ($i \in I$) für beispielsweise Aggregatzustand der Prozessmedien, Anlagenkapazität, Werkstoffe

Bei der Methode analytischer Zuschlagssätze wird die Gesamtinvestition mit Hilfe von empirisch abgeleiteten Funktionen bestimmt [Sch99]. Zumeist in Großunternehmen werden aus den erfassten Daten einer Vielzahl abgeschlossener Projekte hierbei die nötigen Hilfsmittel in Form von Tabellen, mathematischen Gleichungen und Diagrammen generiert. Die Gleichungen zur Ermittlung der Gesamtinvestition können dabei beispielsweise aus verschiedenen additiven und multiplikativen oder auch logarithmierten Teilfunktionen, Parametern und Skalaren bestehen [Ke08].

5.1.1.3 Detaillierte Einzelermittlung

Bei der detaillierten Einzelermittlung werden die spezifischen Investitionen für die Komponenten des Produktionssystems einzeln und im Detail ermittelt. Eine Möglichkeit hierfür ist beispielsweise das Heranziehen von sogenannten Angebotspreisen von Lieferanten der Prozess- bzw. Produktsystemkomponenten. Bei der Ermittlung der Anlagenkosten für Bitumenverflüssigungsanlagen ist dies durchweg möglich, da für diese neuartigen Anlagentypen bereits Anbieter auf dem Markt agieren und sich teilweise bereits international etabliert haben. Hinzu kommt, dass für die Asphaltbindemittelverflüssigung nur eine beschränkte Anzahl von Anlagenkomponenten benötigt wird.

Für Produktsysteme der Bitumenverpackung gilt ebenso wie bei Verflüssigungs- und Abfülltechnologien, dass jeweils zumindest von einzelnen Anbietern Aufwandswerte zu erhalten sind. Die Wahl der detaillierten Einzelermittlung als Methode der Investitionsabschätzung bietet sich somit an, da sie auf Grundlage der vorhandenen Zahlen laut Schleaf [Sch99] eine Genauigkeit von 5 % bis 15 % erreichen kann.

5.1.2 Methoden zur Vorausbestimmung der Kosten nach Kostenarten

In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen zur Ermittlung der Kosten erläutert. Der Begriff der „Kosten“ wird dabei im betriebswirtschaftlichen Sinne gemäß Peters, Brühl und Stelling [PeBrSt05] verwendet. Es handelt sich hierbei folglich um den Wert des Verzehrs an Gütern (Sach- und Dienstleistungen) zur betrieblichen Leistungserstellung und -verwertung innerhalb eines bestimmten Zeitraums [PeBrSt05]. Die Kosten werden hier in investitionsabhängige Kostenarten und betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten unterschieden (vgl. [Fi05 (S. 117)]⁹). Alle Kosten werden ohne Mehrwertsteuer angegeben.

5.1.2.1 Investitionsabhängige Kostenarten

Die investitionsabhängigen Kostenarten können sich aus Abschreibungen, Kapitalzins, Wartungs- sowie Versicherungskosten zusammensetzen. Sie lassen sich proportional zur Investitionssumme ableiten [Re91]. Die Abschreibung beschreibt den Wertverlust eines Produktionsfaktors, verteilt auf die Perioden, in denen er genutzt wird. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Abschreibungsmethoden, die sich hinsichtlich der zugrunde gelegten mathematischen Berechnung unterscheiden. So werden die Abschreibungsursachen wie ruhender Verschleiß und technischer Fortschritt als zeitlich bedingte Abschreibung mittels Gleichung 5-1 berücksichtigt.

$$\text{Jahresabschreibung}_{\text{linear}} = \frac{(\text{Investition in €} - \text{Anlagenrestwert in €})}{\text{Nutzungsdauer in Jahren}} \quad 5-5$$

Leistungsbedingter Verschleiß und Substanzminderungen können mittels Gleichung 5-2 berechnet werden.

$$\text{Abschreibung} = \frac{(\text{Investition in €} - \text{Anlagenrestwert in €})}{\text{Gesamtlebensvorrat in Leistungseinheiten}} \quad 5-6$$

In diesem Fall ist die jährliche Abschreibung durch Multiplikation der Abschreibung je Leistungseinheit mit der jährlichen Leistungsinanspruchnahme zu berechnen. Die zuletzt genannte Formel kommt in dieser Arbeit beispielsweise bei der Schätzung der Abschreibung von Magnetrons an Mikrowellenverflüssigungsanlagen zum Einsatz.

Die kalkulatorischen Zinsen werden mittels des durchschnittlich gebundenen Kapitals und eines kalkulatorischen Zinssatzes berechnet (Gleichung 5-3). Liegt, wie oben angenommen, eine lineare Wertminderung zugrunde, so gilt:

$$\begin{aligned} & \text{kalk. Zinsen p.a.} \\ & = \frac{(\text{Investition in €} - \text{Anlagenrestwert in €})}{2} \cdot \text{kalkulatorischer Zinssatz p.a.} \end{aligned}$$

5-7

Der kalkulatorische Zinssatz geht aus unternehmensinternen Vorgaben hervor oder kann, falls diese nicht bekannt sind, aus dem marktüblichen Kapitalzins ermittelt werden.

Die Wartungskosten, welche bei Remmers die Kosten für die Instandhaltung und Reparatur von Gebäuden und Anlagen beinhalten, können mit Hilfe spezifischer Prozentsätze, bezogen auf die jeweilige Investitionssumme, bestimmt werden [Re79]. Die spezifischen Prozentsätze liegen je nach Anlagentyp im Bereich von 4 % bis 10 % [Re91]. Auch die Versicherungskosten können relativ zur Investitionssumme ermittelt werden. Im Regelfall betragen die Versicherungskosten 0,2 % bis 1 % der Investitionssumme [Re91] [Sch99]. Auch Steuern werden häufig in erster Näherung mit 1 % der Investition abgeschätzt [Re91].

5.1.2.2 Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten

Die betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten bestimmen sich aus der in der Anlage jährlich eingesetzten Menge an Rohstoffen, Hilfsstoffen und Energieträgern sowie den in der Anlage entstehenden Abfallkosten. Zur Bestimmung dieser Größen reicht eine Dokumentation der Input- und Outputströme über einen speziell festgelegten repräsentativen Produktionszeitraum, die dann im Rahmen einer Energie- oder Stoffbilanz ausgewertet werden. Die berechneten Stoff- und Energiemengen werden dann zur Bestimmung der durchsatzabhängigen Kosten mit den spezifischen Verrechnungspreisen der einzelnen Stoffarten und Energieträger multipliziert [Re79]. Zumeist wird hierbei die Annahme konstanter Verrechnungspreise für den Betrachtungszeitraum getroffen oder ein Mittelwert genutzt.

5.1.2.3 Personalkosten

Zur Abschätzung der Personalkosten sind verschiedene Ansätze möglich. Personalkosten können über den Mitarbeiterbedarf des Produktionssystems zusammen mit den Lohn- und Lohnnebenkosten des Arbeitgebers sowie über investitionssummenabhängige Prozentsätze bestimmt werden. Bei ersterem Verfahren ist zumeist eine größere Genauigkeit erreichbar, insofern die benötigten Daten vollständig vorliegen. Hierzu können Löhne und Gehälter, Arbeitskräftebedarf der Anlagen usw. aus den Jahreskennzahlen des Unternehmens gewonnen werden. Anschließend müssen der Mitarbeiterbedarf für einzelne Prozessschritte sowie das Management ermittelt werden. Das Berücksichtigen von Gehalts- bzw. Lohngruppen führt dann zu einer relativ exakten Kostenbestimmung.

Im zweiten Fall werden zur Bestimmung der Personalkosten branchen- und anlagenspezifische Richtwerte in Form aggregierter Prozentsätze benötigt [Sch99]. Dieses zumeist mit größeren Abweichungen behaftete Verfahren bietet sich also beispielsweise dann an, wenn unternehmensübergreifende Personalkosten (Branche, Region) bestimmt werden müssen oder keine ausreichenden Daten vorliegen (neue Technologie in früher Entwicklungsphase).

5.1.2.4 Sonstige Kosten und Folgekosten

Unter sonstigen Kosten fallen Gemeinkostenanteile, Gebühren und Kosten für Fremdleistungen, die nicht bestimmten, vom Betrieb erbrachten Leistungen

zugeordnet werden können, und Kosten für mess- und sicherheitstechnische Überwachungen. Unter Folgekosten werden Kosten verstanden, die sich durch Rückkopplungen des bewerteten Anlagenteils mit anderen Anlagenbestandteilen ergeben [Ko09][Re79].

5.1.3 Transport- und Lagerkosten

Transport- und Lagerkosten werden hier gesondert aufgeführt, da sie gesondert in das Optimierungsmodell in Kapitel 6 integriert werden. Die Kosten für Transport und Lagerung lassen sich im Kontext der Bitumenlogistik aus Angeboten von Transportunternehmen und Lieferanten von Komponenten der Lager ermitteln. Bei der Bestimmung der Gesamtlagerkosten wird hier gemäß Fichtner [Fi05] in investitionsabhängige Kostenarten und betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten unterschieden (vgl. auch [Ko09][Ke08][WiFiRe04]⁹). Die investitionsabhängigen Kostenarten bestimmen sich nach der geplanten Kapazität eines Standorts. Die betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten unterscheiden sich wiederum je nach Art der Lagerung in Kosten, die einmalig, also pro Tonne beim Einlagern (Bsp. Kaltlagerung), oder über den gesamten Lagerzeitraum (beispielsweise aufgrund von Energiezufuhr in der Heißlagerung) pro Tonne und Zeiteinheit anfallen. Da die beschriebene Systematik eine zentrale Grundlage der Integration der Kostendaten in das Optimierungsmodell in Kapitel 6 darstellt, wird hierauf in Abschnitt 5.4 noch einmal explizit eingegangen.

5.2 Anwendung der Bewertungsmethoden auf ausgewählte Technologien der Bitumenkalthandhabung

Die Technologien im Bereich der Bitumenkalthandhabung lassen sich in die zwei Kategorien der konventionellen und der modernen Technologien unter-

⁹ Bei Koch [Ko09], Kerdoncuff [Ke08 (S. 127 f.)] wird in investitionsabhängige Kostenarten und betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten (und Personalkosten und sonstige Kosten) unterschieden. Bei Wietschel, Fichtner und Rentz [WiFiRe04 (S. 152)] wird von „investitionsabhängigen, fixen und betriebsmittelverbrauchsabhängigen Ausgaben“ gesprochen. Hier werden im Folgenden wie bei Fichtner [Fi05 (S. 117)] die Begriffe investitionsabhängige Kosten, betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten verwendet. Die Personalkosten werden diesen beiden Gruppen anteilig zugeordnet. Sonstige Kosten fallen in der Bitumenkalthandhabung nicht an.

scheiden. Zu den konventionellen Technologien bei der Verflüssigung werden hier der Fassschmelzer und der Schmelztopf gezählt, da sie sich ausschließlich des Wärmeeintrags mittels Konduktion (Wärmeleitung) und Konvektion (Wärmestrom) bedienen. Je nach Anlagenkonfiguration wird bisweilen auch nur einer der beiden Effekte gezielt genutzt. Als konventionelle Bitumenverpackungen werden hier die verschiedenartigen Metallgebände angesehen. Zu den modernen Gebindevarianten zählen hier alle Formen der Asphaltbindemittelverpackung mittels Kunststoffen oder Kartonagen, da diese bisher zwar für verschiedenste bituminöse Baustoffe, aber bis vor wenigen Jahren nicht für Asphaltbindemittel zum Einsatz kamen. Den modernen Verflüssigungsvarianten kann hier die Mikrowellenverflüssigung zugeordnet werden.

Bei der Kombination von konventionellen und modernen Verpackungs-, Abfüll- sowie Verflüssigungstechnologien gibt es technisch bedingte Einschränkungen. Es ist beispielsweise nicht möglich, Fässer einer Mikrowellenverflüssigungsanlage oder einem Schmelztopf zuzuführen. Über die Zuführbarkeit von in Kunststoffen verpacktem Bitumen in Mikrowellenverflüssigungsanlagen gibt es derzeit noch keine Erfahrungswerte. Umgekehrt benötigt beispielsweise das Fass und das Kartongebinde keine spezielle Abfüllanlage, die das thermoplastische Bitumen auf verpackungsverträgliche Temperaturen herunterkühlt. All dies führt zu der Vorgehensweise, die Bausteine der Bitumenkaltlogistikette im Folgenden im Einzelnen zu betrachten und sie dann gemäß den in Kapitel 4.3 Tabelle 4-2 dargestellten Kombinationsmöglichkeiten zusammenzufügen. Für die drei hier untersuchten Anlagen der Bindemittelverflüssigung und die Abfüllanlage liegen für diese Arbeit jeweils mehrere Angebote¹⁰ vor. Es werden zunächst technische Daten der Anlagen aus jeweils einem charakteristischen Angebot (2010) herausgegriffen. Die aus den Angeboten ausgewählten Anlagen haben einen Energiebedarf und Verflüssigungsdurchsatz von:

Typ 1: 520 kW / 2,5-5 t/h (Fassschmelzer)

Typ 2: 200 kW / 1-2 t/h (Schmelztopf)

Typ 3: 1000 kW / 10-15 t/h (Hochfrequenzofen)

¹⁰ Auf der Basis von schriftlichen Angeboten von Lieferanten, die im Rahmen dieser Arbeit erfragt wurden, werden hier Annahmen getroffen und die Zahlen anonymisiert. Das Angebotsjahr wird jeweils in Klammern angegeben.

Die relativ große Durchsatzspanne bei der Bindemittelverflüssigungsleistung ist neben der Bindemittelausgangstemperatur auf die unterschiedliche Viskosität der einzelnen Bindemittelsorten zurückzuführen. Der kleinere Durchsatz in t/h wird zumeist als Verflüssigungsleistung bei „harten“ Bitumensorten wie 30/45 angegeben, die größere Zahl für die Verflüssigung von 70/100 (Nadelpenetration nach DIN EN 1426). Das heißt, die Kapazität der Anlage ist für „weiches Bitumen“ höher. Auch für die Abfüllanlage bei Kunststoffverpackungen werden Werte aus Angeboten (2010) herausgegriffen. Die Abfüllanlage hat eine Leistung bzw. einen Abfülldurchsatz von:

Typ 4: 150kW/ 15-20t/h (Abfüllanlage).

Auf weitere Kenngrößen wie den Bedarf an Personal oder Energieträgern wird im Folgenden in den jeweiligen Abschnitten zur Investitions- und Kostenschätzung eingegangen. Die Investition wird hierbei bezogen auf die jeweiligen Anlagenleistungen als spezifische Investition, die Kosten werden, jeweils bezogen auf die Verflüssigungsleistung bzw. Durchsatzmenge der jeweiligen Anlage, als Stückkosten¹¹ oder spezifische Kosten angegeben. Hierdurch wird ein Vergleich der Kostenstrukturen ermöglicht. Es wird davon ausgegangen, dass die Jahresverflüssigungsleistung über einen Zeitraum von 100 Arbeitstagen kontinuierlich erfolgt.

In den Verfahrensschritten der Bitumenkalthandhabung wie Abfüllung, Transport, Lagerung und Wiederverflüssigung fallen Kostenarten an, die den oben vorgestellten Kategorien zugeordnet werden können. Tabelle 5-2 zeigt diesen Zusammenhang.

¹¹ Stückkosten werden hier stets auf eine Tonne Bitumen bezogen. Die Einheit der Stückkosten ist Euro pro Tonne (€/t).

Tabelle 5-2: Zuordnung von Kosten zu Kategorien und Verfahrensschritten

	Abfüllung (in Karton- und Kunststoffgebinde)	Transport (Heiß- und Kalt- transport)	Lagerung (Heiß- und Kaltlage- rung)	Verflüssigung (in den drei Ver- flüssigungs- anlagentypen)
Investitions- abhängige Kosten	Abschreibungen, Reparaturkosten, Kapitalkosten, Versicherungs- Kosten Personal- kostenanteil		Abschreibungen, Reparaturkosten, Kapitalkosten, Versicherungs- Kosten, Grund- stückskosten Personal- kostenanteil	Abschreibungen, Reparaturkosten, Kapitalkosten, Versicherungs- kosten, Personal- kostenanteil
Betriebs- mittel- abhängige Kosten	Energiekosten, Ver- packungskosten, Entsorgungskosten ¹² Lagerkosten ¹³ Personal- kostenanteil	Heiß- transport- kosten, Kalt- transport- kosten	Energiekosten (Heiß- lagerung), gebundenes Kapital Personal- kostenanteil	Energiekosten, Personal- kostenanteil

Hier werden nun gemäß dem in der Tabelle dargestellten Schema die Transport- und Lagerkosten gesondert aufgeführt, da sie als solche gesondert von den anderen Handhabungskosten in das Optimierungsmodell in Kapitel 6 integriert werden.

Die beiden Gruppen von Kosten beziehen sich auf unterschiedliche Bezugsgrößen. Tabelle 5-3 stellt die jeweilige Bezugsgröße erläuternd dar.

¹² Die Kosten für die Entsorgung der Verpackungen werden hier jeweils in den betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten bei der Abfüllung mit berücksichtigt.

¹³ Es fallen bei der Abfüllung in Kartons Lagerkosten für ein Abkühlager an. Der verglichen mit den Lagerstandorten geringe Platzbedarf (zirka $5\text{m}^2/(\text{t}\cdot\text{d})$) am Abfüllstandort hängt direkt mit der Abfüllmenge zusammen und wird hier daher den betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten zugeordnet.

Tabelle 5-3: Gruppen von Kosten mit Bezugsgröße

Bezeichnung	Bezugsgröße	Erläuterung	Beispiel
Investitionsabhängige Kostenarten	Maximal erreichte Kapazität in einer Periode des Betrachtungszeitraums	Die Anlagengröße und damit die Investitionshöhe bestimmt sich anhand der maximal erwarteten Menge	Abschreibung für Tanklager; fixer Anteil der Kosten für Wachpersonal
Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten	Produktionsmenge in Tonnen (Kaltlagerung) oder Monats-tonnen (Heißlagerung)	Jede gelagerte Tonne Bitumen verursacht direkt Kosten, die sonst nicht anfallen würden	Kosten für Heizenergie im Lagertank

5.2.1 Investitionsschätzung mittels detaillierter Einzelermittlung und Größendegressionsansatz

Die für eine Investitionsschätzung gewählten Anlagen können aufgrund der vorhandenen Daten für die Hauptkomponenten (siehe oben) und des verhältnismäßig einfachen Anlagenaufbaus im Ganzen betrachtet werden und müssen nicht in Einzelkomponenten zerlegt werden. Die Berechnung eines Größendegressionskoeffizienten für verschiedene Anlagengrößen erübrigt sich aufgrund der Tatsache, dass die Anlagengeometrie stark durch die Abmessungen von Transportcontainern (DIN EN ISO 668) determiniert wird. Für den Fall, dass im operativen Einsatz höhere Verflüssigungsleistungen gefordert sind, bedeutet dies, dass mehrere Verflüssigungsanlagen des jeweiligen Typs redundant installiert werden. Um die drei betrachteten Verflüssigungsanlagentypen besser vergleichbar zu machen, wird die jeweilige Investition auf 1 KW des Anlagenenergiebedarfs bezogen.

Im Rahmen der Investitionsschätzung kann aufgrund der hohen Innovationsgrade der Technologien der vorhandenen Literatur kein Zuschlagssatz entnommen werden. Es muss daher eine Zuschlagssatzberechnung angenommen werden, die sich laut Hamelinck [Ha04] wie folgt zusammensetzt.

- Direkte Faktoren A_j : Sie beziehen sich direkt auf die zu tätige Investition. Diese Faktoren setzen sich zusammen aus Ausgaben für Mess- und Regelsystem (5 %), Gebäude (1,5 %), Anschluss an die Energieversorgung (5 %),

Standortvorbereitung/Baumaßnahmen (10,5 %), Elektronik (7 %) und Rohrleitungen (4 %).

- Indirekte Investitionsfaktoren B_k : Sie beziehen sich auf die Summe aus Investition und direkten Investitionsfaktoren und berücksichtigen Projekthaftung (10 %), Gebühren/Fixkosten/Gewinn der Lieferanten (10 %) und Anlaufkosten (5 %). Die in der Literatur zumeist zusätzlich aufgeführten indirekten Faktoren Konstruktion/Engineering (15 %) und Bauzinsen (10 %) werden hier nicht berücksichtigt, da diese Investitionen durch die Anlagenhersteller vorgenommen werden, die nicht Teil des in Abbildung 5 beschriebenen Betrachtungsrahmens dieser Arbeit sind und somit bereits innerhalb der oben genannten Angebote berücksichtigt werden.

Somit ergibt sich die spezifische Investition $I_{spez, i}$ einer jeweiligen Anlage in Euro gemäß folgender Gleichung:

$$I_{spez, i} = \left(I_i + I_i \cdot \sum_j A_j \right) \cdot \left(\sum_k B_k + 1 \right) \quad 5-8$$

Hieraus ergeben sich für die gewählten repräsentativen Fassschmelzer Investitionen in Höhe von **249.375,- €** bei dem gewählten Schmelztopf **116.375,- €**, für die Mikrowellenverflüssigungsanlage (Mikrowellenofen) **1.163.750,- €** und schließlich für die Abfüllanlage **2.493.750,- €**. Die Herleitung findet sich in Tabelle 5-4.

Tabelle 5-4: Zuschlagssätze der Investitionen für die Bitumenkalthandhabung in Euro

Heißlager	Abfüll- anlage	Mikro- welle	Schmelz- topf	Fass- schmelzer	Zuschlags- satz	Investitionsart
243.000	1.500.000	700.000	70.000	150.000		Investitionshöhe
12.150	75.000	35.000	3.500	7.500	5%	IMess- u. Regelsystem
3.645	22.500	10.500	1.050	2.250	1,5%	Gebäude
12.150	75.000	35.000	3.500	7.500	5%	Anschluss Energieversorgung
1.215	7.500	3.500	350	750	0,5%	Standortvorbereitung
24.300	150.000	70.000	7.000	15.000	10%	Baumaßnahmen
17.010	105.000	49.000	4.900	10.500	7%	Elektronik
9.720	60.000	28.000	2.800	6.000	4%	Rohre
80.190	495.000	231.000	23.100	49.500	33%	*Summe direkte Zuschlagssätze
32.319	199.500	93.100	9.310	19.950	10,0% von *	Projekthaftung
32.319	199.500	93.100	9.310	19.950	10,0% von *	Gebühren/Gewinn
16.160	99.750	46.550	4.655	9.975	5,0% von *	Anlaufkosten
161.595	498.750	232.750	23.275	49.875	25,0%	Summe indirekte Zuschlagssätze
484.785	2.493.750	1.163.750	116.375	249.375		Investition inkl. Zuschläge

5.2.2 Investitionsabhängige Kostenarten

Zu den investitionsabhängigen Kostenarten zählen kalkulatorische Abschreibungen, Kapitalzins, Instandhaltungs- und Wartungskosten, Versicherungs- und Verwaltungskosten sowie Steuern.

Zur Berechnung der Abschreibungssummen aller Verflüssigungsanlagen und der Abfüllanlage wird die Berechnungsgleichung 5-1 herangezogen. Als Anlagenrestwert wird in erster Näherung 0,- € angesetzt. Die Anlagennutzungsdauer beträgt bei allen Anlagentypen 15 Jahre, da dies in etwa der voraussichtlichen Nutzungsdauer entspricht, wobei bei der Mikrowellenverflüssigungsanlage niedrigere Nutzungsdauern für die Magnetrons zu erwarten sind. Dies wird bei den Kosten für Betriebsstoffe im nächsten Unterabschnitt berücksichtigt, wobei ihre erstmalige Anschaffung zu den Investitionen zählt. Es wird eine lineare Abschreibung angesetzt.

Für den jährlichen Kapitalzins werden hier 6 %/a auf den jeweiligen halben Anlagenneuwert angesetzt. Die Instandhaltungs- bzw. Reparatur- und Wartungskosten werden mit 6 %/a der Gesamtinvestitionssumme angesetzt. Für Versicherungen wird von jährlichen Kosten in Höhe von 0,5 %/a der Gesamtinvestitionen ausgegangen.

Für ein Rechenbeispiel wird ein Jahresdurchsatz von 15.000 Tonnen angenommen. Es werden aufgrund der unterschiedlichen jeweiligen Anlagenleistungen unterschiedlich viele Anlagen eines Typs für diese Menge benötigt. Zur Berechnung der Anzahl der benötigten Anlagen wird die gewünschte Jahresproduktionsmenge durch die maximale Jahresdurchsatzmenge einer Anlage (in 100 Tagen, Tabelle 5-5) geteilt und das Ergebnis aufgerundet.

Tabelle 5-5: Durchsatzleistung der hier verwendeten Referenzanlagen in Euro

Anlage	Stundenleistung bei Bitumen 70/100	Tagesleistung bei 10-stündiger Pro- duktion	Jahresleistung bei 100-tägiger Pro- duktion
	in t/h	in t/d	In t/a
Fassschmelzer	5	50	5.000
Schmelztopf [Po11]	2	20	2.000
Mikrowellenofen [Wu11]	15	150	15.000
Abfüllanlage [Po11]	20	200	20.000

Für 15.000 Tonnen Jahresdurchsatz werden demzufolge drei Fassschmelzer beziehungsweise acht Schmelztöpfe oder ein Mikrowellenofen und eine Abfüllanlage benötigt. Insgesamt ergeben die oben getroffenen Annahmen spezifische investitionsabhängige Kosten von **4,85** Euro pro durchgesetzte Tonne bei den Fassschmelzern, **6,04** Euro pro durchgesetzte Tonne bei Schmelztöpfen und **7,56** bzw. **16,17** Euro pro durchgesetzte Tonne bei Mikrowellenöfen bzw. der Abfüllanlage. Da die im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Zuschlagsätze der allgemeinen Literatur entnommen und damit nicht spezifisch für die Technologien der Bitumenhandhabung sind, wird im Folgenden mit den Investitionen ohne Zuschlagsätze gerechnet. Eine nachträgliche Beaufschlagung der Zuschlagsätze ist jederzeit möglich.

Tabelle 5-6: Berechnung der investitionsabhängigen Kosten in Euro

Technologie	Investition s. Tabelle 5-4	Abschrei- bung linear	Versi- cherung Repara- tur	Verzin- sung	Invest.- abh. Kos- ten pro Tonne	Anzahl d. Anl.	Gesamt- investi- tion
		Über 15 Jahre	6,5% des Neuwert	6% des halben Neuwert	Für 15.000 t p.a.		
Fass- schmelzer	150.000	10.000	9.750	4.500	1,62	3	4,85
Schmelztopf	70.000	4.667	4.550	2.100	0,75	8	6,04
Mikrowelle	700.000	46.667	45.500	21.000	7,54	1	7,54
Abfüllanlage	1.500.000	100.000	97.500	45.000	16,17	1	16,17

Angesetzt werden hier **1,81 €/t**, verursacht durch Investitionen (Annahme 168.000,- Euro) auf Seiten der Raffineriebetreiber.

Tabelle 5-7: Berechnung der investitionsabhängigen Kosten in Euro

Technologie	Investition s. Tabelle 5-4	Abschrei- bung linear	Versi- cherung Repara- tur	Verzin- sung	Invest.- abh. Kos- ten pro Tonne	Anzahl d. Anl.	Gesamt- investi- tion
Annahme		Über 15 Jahre	6,5 % d. Neu- werts	6 % des halben Neu- werts	Für 15.000 t p.a.		
Raffinerie- ausstattung	168.000	9.200	10.920	5.040	1,81	1	1,81

Es ist nicht bekannt, in welcher Form (pauschal oder pro Tonne) diese Kosten von Seiten der Raffineriebetreiber einem Asphaltproduzenten berechnet werden. Diese Kosten werden hier den betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kostenarten zugeordnet.

5.2.3 Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten inklusive Verpackungskosten

Zu den betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten bei Verflüssigungs- und Abfüllanlagen der Asphaltbindemittelkaltlogistik zählen Kosten für Energieträger zur Erwärmung und Rückkühlung. Eventuelle Energiekosten für Steuerungssysteme werden aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Größe an dieser Stelle vernachlässigt. Der Bedarf und die Kosten der entsprechenden Energieträger können Tabelle 5-8 entnommen werden.

Tabelle 5-8: Kennzahlen der untersuchten Anlagentypen

Anlagentyp	Energiebedarf für Erwärmung	Energiebedarf für Kühlung	Energie-träger
Fassschmelzer	520 kW	0 kW	Heizöl
Schmelztopf [Po11]	200 kW	0 kW	Heizöl
Mikrowellenofen [Wu11]	920 kW	100 kW (Kühlung der Magnetrons)	Elektrizität
Abfüllanlage [Po11]	0 kW	150 kW	Elektrizität

Unter Heranziehen der oben genannten Verflüssigungsmengen pro Betriebsstunde ergeben sich unabhängig vom Jahresdurchsatz pro durchgesetzter Bittumentonne mit der Formel

$$\text{Spez. Energiekosten} = \text{Energiepreis} \cdot \text{Energiebedarf} / \text{Stundenleistung} \quad 5-9$$

beim Fassschmelzer Energiekosten in Höhe von **7,93 €**, beim Schmelztopf **7,62 €**, beim Mikrowellenofen **8,57 €** und **0,95 €** bei der Abfüllanlage. Die zugrunde liegenden Parameter sind Tabelle 5-9 zu entnehmen.

Tabelle 5-9: Parameter zur Berechnung der Energiekosten

Anlagentyp	Energiebedarf	Energiepreis (Siehe Tabelle 5-10)	Stundenleistung	Spez. Energiekosten pro Tonne
Einheit	kW	€/kWh	t/h	€/t
Fassschmelzer	520	0,08	5	7,93
Schmelztopf [Po11]	200	0,08	2	7,62
Mikrowellenofen [Wu11]	1.020	0,126	15	8,57
Abfüllanlage [Po11]	150	0,126	20	0,95

Die hierfür verwendeten Energiekosten werden in Tabelle 5-10 berechnet.

Tabelle 5-10: Berechnung des Energiepreises. *Eventuelle Rundungen in der Berechnung haben keine Auswirkung auf die im Folgenden berechneten Werte.

Energieträger	Dichte	Heizwert	Energieträgerpreis (Annahme)	Energiepreis
<i>Einheit</i>	<i>kg/l</i>	<i>kWh/kg</i>	€/l	€/kWh
Diesel/Heizöl	0,85	11,80	0,076	0,08
Elektrizität	-	-	-	(Annahme:) 0,126

Die Kosten für Beschaffung und Entsorgung der Bitumenverpackungen werden den Verpackungen selbst zugeordnet, um eine bessere Vergleichbarkeit der Technologiekombinationen (Anlage und Verpackungsart) untereinander zu ermöglichen. Aufgrund der hohen Kosten beim Verpacken in Fässern (50 €/t bis 200 €/t, je nach Metallpreis und Wiederverwendung) werden hier nur Kosten für eine ausgewählte repräsentative Kunststoffverpackung und eine ausgewählte repräsentative Kartonverpackung berechnet. Es ergibt sich aus Angeboten (2011) von Verpackungsherstellern mit der Formel

$$\text{Spez. Verpackungskosten} = \text{Stückpreis} \cdot 1 \text{ Tonne} / \text{Füllgewicht} \quad 5-10$$

Kosten pro Bitumentonne in Höhe von **30,- €** bei Kunststoffverpackungen und **31,33 €** bei der Kartonverpackung inklusive Lieferung. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 5-11 dargestellt

Tabelle 5-11: Parameter zur Berechnung der Verpackungskosten

Verpackung	Stückpreis gemäß Hersteller für 15.000 Tonnen	Füllgewicht	Stück pro Tonne	Spezifische Ver- packungs- kosten
Einheit	€/Stk.	t	Stk./t	€
Kunststoff- verpackung (gem. [Pö11])	10	0,333	3	30,00
Karton- verpackung (gem. [Wu11])	3,48 Die Kosten für die Kartonde- ckel sind im Stückpreis in- begriffen	0,111	9	31,33

Die Entsorgungskosten der Verpackungen lassen sich über ihr Volumen und ihre Masse nach Entpacken berechnen. Kunststoff und Kartonverpackungen werden nach der Benutzung nicht wiederverwendet, sondern einem Entsorgungcontainer zugegeben. Gemäß der Angaben eines Entsorgers müssen 350,- € pro Tonne Kunststoffverpackungsmaterial und 145,- € pro Tonne Kartonverpackungsmaterial bezahlt werden. Rechnet man diese Beträge unter anderem mit Hilfe der spezifischen Stoffeigenschaften der Verpackungen gemäß der nachfolgenden Gleichung,

$$\begin{aligned}
 \text{Spez. Entsorgungskosten} &= \frac{\text{Verpackungen p. t.}}{\text{Verpackungsgewicht}} \cdot \text{Verwertungskosten} \\
 &+ \text{Verpackungen p. t.} \cdot \left(\frac{\text{Transportkosten}}{\left(\frac{\text{Abfallbehältervolumen}}{\text{Verpackungsvolumen}} \right)} \right) + \left(\frac{\text{Abfallbehältermiete}}{\left(\frac{\text{Jahresproduktion}}{\text{Produktionsmonate}} \right)} \right) \quad 5-11
 \end{aligned}$$

so erhält man Entsorgungskosten bezogen auf die Tonne Bitumen von 1,13 € bzw. 2,72 € pro Tonne für Bitumen, das in Kunststoff- bzw. Kartonverpackungen verpackt wird.

Tabelle 5-12: Parameter zur Berechnung der Entsorgungskosten für Kunststoffverpackungen

Parameter	Angenommener Wert	Einheit
Verwertungskosten pro Tonne Abfall	350	€/t
Verpackungsgewicht	0,0010	t
Verpackungen pro Tonne Bitumen	3	Stk./t
Verpackungsvolumen	0,0088	m ³ /Stk.
Abfallbehältervolumen	30	m ³
Transportkosten pro Abfallbehälter	85	€/Stk.
Abfallbehältermiete (Container) pro Monat	25	€/m
Jahresproduktion	15.000	t
Produktionsmonate	6	m

Tabelle 5-13: Parameter zur Berechnung der Entsorgungskosten für Kartonverpackungen

Parameter	Angenommener Wert	Einheit
Verwertungskosten pro Tonne Abfall	149	€/t
Verpackungsgewicht	0,0017	t
Verpackungen pro Tonne Bitumen	9	Stk./t
Verpackungsvolumen	0,0188	m ³ /Stk.
Abfallbehältervolumen	30	m ³
Transportkosten pro Abfallbehälter (Presse)	85	€/Stk.
Abfallbehältermiete (Presse) pro Monat	100	€/m
Jahresproduktion	15.000	t
Produktionsmonate	6	m

Das Abschätzen von Fassentsorgungskosten ist vorab nicht möglich, da die Entsorger den Standort und die Beschaffenheit der Fässer begutachten wollen, bevor sie ein Angebot aussprechen. Es werden hier pauschal **3,- €** pro Bitumentonne angenommen.

5.2.4 Personalkosten

Bei allen Anlagen zur Bindemittelverflüssigung wird hier pro Anlage zunächst von zwei Beschäftigten ausgegangen. Eine Person wird zur Bedienung und Überwachung der Anlage und eine weitere Person zum Heranholen der kalten Bitumengebinde benötigt. Abgefüllt und verflüssigt wird jeweils nur während eines halben Jahres, da die Bitumenkalthandhabung unter anderem dem Zweck dient, an saisonalen Preisunterschieden zu partizipieren. Da das Jahr insgesamt

zirka 200 Arbeitstage hat, wird mit jeweils 100 jährlichen Betriebstagen einer Abfüll- oder Verflüssigungsanlage gerechnet. Tabelle 5-22 stellt diese und weitere Annahmen zur Berechnung der Personalkosten in diesem Kapitel dar.

Tabelle 5-14: Parameter zur Berechnung der Personalkosten

Parameter	Angenommener Wert	Einheit
Jährliche Auslastung aufgrund der einhunderttägigen Produktion	50	%
Jahresproduktionsmenge	15.000	t
Personalkosten pro Personaleinheit	40.000	€/FTE

Da die Integration der Kalthandhabungstechnologien in die vorhandene Bitumenlogistikstruktur eines Unternehmens und damit die Standortplanung erst in Kapitel 6 erfolgt, wird hier zunächst von einer zentralen Anordnung des Verflüssigungsstandorts ausgegangen. Die benötigten Anlagenkapazitäten eines Typs sind damit an einem Standort und somit hinsichtlich des Personalaufwands optimierbar. Befinden sich alle Anlagen an einem Standort, so wird jeweils nur eine Person zur Betreuung und eine Person zum Heranholen der kalten Bitumengebinde bei bis zu vier Verflüssigungsanlagen benötigt. Die sich zur Berechnung des Personalaufwands p von Verflüssigungsanlagen aus der Anzahl von Verflüssigungsanlagen i ergebende Formel lautet mit n als Anzahl an vorhandenen Bitumenverflüssigungsanlagen eines Typs:

$$p = \begin{cases} 2 & i \in \{1;2;3;4\} \\ 4 & i \in \{5;6;7;8\} \\ 6 & i \in \{9;10;11;12\} \\ \cdot & \\ \cdot & \\ \cdot & \\ n & i \in \{2n-3;2n-2;2n-1;2n\}, \end{cases} \quad 5-12$$

Bei den beiden konventionellen Verflüssigungsanlagentypen mit relativ geringer Verflüssigungsleistung ist von Herstellerseite jeweils nur eine Kapazitätska-

tegorie verfügbar. Damit sind gemäß Tabelle 5-15 drei Fassschmelzer¹⁴ nötig, um 15.000 Tonnen Bindemittel in 100 Tagen (s.o.) zu verflüssigen. Es wird hingegen nur ein Mikrowellenofen für diese Bitumenmenge benötigt. Mit Hilfe der Gleichung

spez. Gesamtpersonalkosten =

$$\frac{(\text{Jahresauslastung} \cdot \text{Personalaufwand} \cdot \text{Personalkosten pro Personaleinheit})}{\text{Jahresproduktionsmenge}} \quad 5-13$$

ergeben sich unter den Annahmen der Tabelle 5-14 spezifische Gesamtpersonalkosten in Höhe von **2,67 €/t** bei Fassschmelzern, **5,33 €/t** bei Schmelztöpfen und **2,67 €/t** bei Mikrowellenofen.

Tabelle 5-15: Personalbedarf aus benötigter Anlagenzahl

Anlage	Jahresleistung bei 100-tägiger Produktion In t/a	Benötigte Anzahl an Anlagen für 15.000 t Jahresproduktion	Personalbedarf p gemäß Gleichung 5-11
Fassschmelzer	5.000	3	2
Schmelztopf [Po11]	2.000	8	4
Mikrowellenofen [Wu11]	15.000	1	2

¹⁴ Die verflüssigte Bitumenmenge pro Stunde bei Bitumen 70/100 beträgt laut Herstellerangabe 5 t/h. Diese Anlage sei zur Berechnung der Werte über 100 Tage jeweils 10 Stunden in Betrieb.

Für Abfüllanlagen kann mittels mehrerer Anlagendatenblätter eines Herstellers (vgl. [Po11]) die Anzahl der benötigten Personen gemäß der Jahresleistung einer Anlage dargestellt (Abbildung 16) werden.

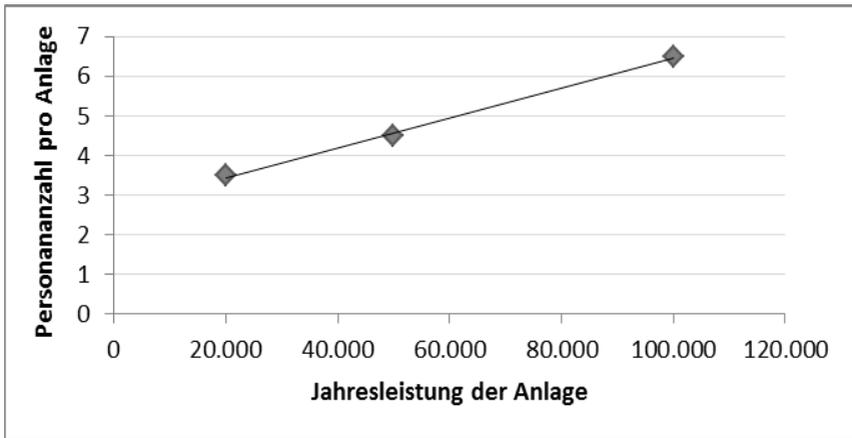


Abbildung 16: Personal in Abhängigkeit der Jahresabfüllleistung

Die folgende Gleichung zur Berechnung des Personalaufwands p (in Personen) in Abhängigkeit der Durchsätze D (in Tonnen) kann auf dieser Grundlage mittels linearer Regression bestimmt werden:

$$p = 4 \cdot 10^{-5} \cdot D + 2,694 \quad 5-14$$

Es ergeben sich gemäß Gleichung und den Annahmen der Tabelle 5-14 spezifische Gesamtpersonalkosten von **4,51 €/t** bei der Abfüllanlage.

Weitere Anlagen, beispielsweise an anderen Standorten, haben ebenfalls einen Personalaufwand gemäß dieser Gleichung und damit entsprechend ihrer Jahresabfüllleistung.

5.2.5 Sonstige Kosten, Folgekosten und Erlöse

Sonstige Kosten und Folgekosten sind zum derzeitigen Stand der Technologiedurchdringung noch nicht bekannt. Zusätzliche Gemeinkosten fallen durch die vier hier untersuchten Anlagentypen nicht an, denn sie dienen dazu, die Gesamtkosten einer existierenden Versorgungskette (mit bereits existierenden Gemeinkosten) zu verringern, indem sie Kaltlagerung und Wiederverflüssigung ermöglichen. Das heißt, dass die derzeitigen Gemeinkosten bestehen bleiben.

Diese wiederum sind in den Bitumenpreisen inbegriffen. Erlöse fallen in der Bitumenhandhabung nicht an.

5.2.6 Transportkosten

Transportkosten innerhalb der Bitumenkaltlogistik fallen für die Bindemittelmengen an, die mittels der untersuchten Anlagentypen verarbeitet werden. Der An- und Abtransport für die Verpackungsmaterialien wird innerhalb der Angebotssummen der Verpackungshersteller und Verwerter berücksichtigt. Es besteht allerdings ein Unterschied zwischen Heißtransportkosten und Kalttransportkosten. Beide Größen lassen sich mittels Angeboten von Transportdienstleitern bereits an dieser Stelle abschätzen. Hierzu werden für verschiedene ausgewählte Distanzen zwischen Raffinerien und Asphaltmischanlagen Angebote (2010) von internetbasierten Frachtbörsen („Trans Aktuell 300“ und „Transbond“) eingeholt und die Angebotssummen gemittelt. Hieraus ergeben sich Transport- und Verladekosten pro Tonne und Kilometer von **0,10 €** für den Heißtransport und von **0,053 €** für den Kalttransport. Die Längen der Transportstrecken und das Verhältnis von Kalt- zu Heißtransportstrecken sind stark von der Anordnung der Anlagen und Lager innerhalb der vorhandenen Bitumenstandardlogistik im jeweiligen Unternehmen abhängig. Die Transportkosten werden also erst im Zuge der Standortwahl in dem nachfolgenden Kapitel berücksichtigt. Generell gilt, dass gegenüber dem Heißtransport mittels Kalttransport zirka 5 €/t auf 100 km Transportstrecke eingespart werden können. Die Kosten für das gebundene Kapital bei Transport werden hier vernachlässigt.

5.2.7 Lagerkosten

In der Asphaltbindemittellogistik ist zwischen Heiß- (Tank-) und Kaltlagerung zu unterscheiden. Derzeit kommen für die Versorgungssicherung in asphaltproduzierenden Unternehmen in Deutschland nur Heißlager zum Einsatz. Heißlager werden auch jenseits des hier definierten Betrachtungsrahmens auf Produzenten- und Verbraucherseite als Puffer für die produzierten bzw. benötigten Bitumenmengen verwendet. Die Kaltlagerung des Bindemittels kann zukünftig zwischen den Raffinerien und den Asphaltmischanlagen zum Einsatz kommen. Hierfür werden dann aber auch kleine Tanklagerkapazitäten an den Abfüll- und Verflüssigungsanlagen benötigt, wenn diese nicht direkt an ein Raffinerietanklager oder eine Asphaltmischanlage angeschlossen sind.

Um abschätzen zu können, ob es möglich ist, an den saisonalen Preisschwankungen des Bitumens zu partizipieren (Kapitel 6), ist die Quantifizierung der Bitumenlagerkosten von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus lässt sich

mittels eines Vergleichs von Heiß- und Kaltlagerkosten bereits frühzeitig eine qualitative Aussage darüber treffen, welche der beiden Lagervarianten sich zu diesem Zweck anbietet.

Die jährlichen Lagerkosten (Stück- und jährliche Gesamtkosten) sind von der maximalen Lagermenge und der Gesamtlagermenge, der Lagerdauer und den Grundstücks-, Personal- und Infrastrukturkosten abhängig. Einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Lagerkosten hat auch die Lagerinvestitionssumme. Aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgrößen (vgl. Tabelle 5-3) ist es nicht immer möglich, die Kosten zu einer Gesamtkostenfunktion (Gesamtkosten in Abhängigkeit der Produktionsmenge) zusammenzufassen. Nur unter der Annahme, dass die Kapazität und die Produktionsmenge gleich sind und an lediglich einem Standort gelagert werden, ist es möglich, diese Kostenfunktionen zu addieren und abschließend als Geradengleichung darzustellen. Das gebundene Kapital bei Lagerung wird in den Lagerkosten mitberücksichtigt.

5.2.7.1 Abschätzung von Heißlagerkosten

Es wird bei der Ermittlung der Kostenfunktion zwischen zwei Gruppen von Kostenarten unterschieden. Investitionsabhängige Kostenarten sind von der installierten Lagerkapazität abhängig und fallen entsprechend der Tanklagerspezifikationen, insbesondere des Fassungsvermögens des Lagertanks an. Die installierte Kapazität ist im – hinsichtlich Anlagenkosten – günstigsten Fall nicht größer als die maximale Lagermenge am Lagerstandort. In die jährliche Gesamtkostenfunktion pro installierter Lagerkapazität fließen die Abschreibungs-, Kapital- und Reparatur- sowie Versicherungskosten für die Lagertanks ein.

Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten sind in erster Linie die Heizkosten und die Kosten für das gebundene Kapital. Die Heizkosten fallen entsprechend der tatsächlich eingelagerten Bitumenmenge an. Sie sind unter anderem auch von den Heizölkosten, der Lagerdauer und den Lagermonaten (Monatstonnen) abhängig. Berechnet man die von der Lagerdauer abhängigen Kosten für gebundenes Kapital und Heizenergie für einen Lagerzeitraum von 6 Monaten, so lassen sich die betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten wie folgt berechnen.

Die spezifischen investitionsabhängigen jährlichen Kosten für das Tanklager berechnen sich nach der folgenden Gleichung:

Spezifische Jährliche Tanklagerkosten = spezifische Investition ·

$$\left(\frac{1}{\text{Abschreibungszeit}} + 0,5 \cdot \text{Kapitalzins} + \text{Anteil Versicherung, Wartung, Reparatur} \right)$$

5-15

Es ergeben sich jährliche spezifische Kosten für das Tanklager selbst von **78,25 €/t** unter Einsetzen der in Tabelle 5-16 gezeigten Parameter.

Tabelle 5-16: Parameter zur Berechnung der investitionsabhängigen Kosten der Tanklager

Parameter	Angenommener Wert	Einheit
Angenommene spezifische Investition pro Tonne Lagerkapazität	484	€/m ³
Abschreibungszeitraum einer linearen Abschreibung	15	Jahre
Kapitalzins als Anteil der halben Investitionssumme	6	%
Reparatur und Wartung als Anteil der Investitionssumme	6	%
Versicherung als Anteil der Investitionssumme	0,5	%

Zur Berechnung der investitionsabhängigen jährlichen Grundstückskosten wird die folgende Gleichung verwendet:

$$\text{Spezifische Grundstückskosten} = \text{Platzbedarf} \cdot \text{Jahresmiete} \quad 5-16$$

Es ergeben sich unter Verwendung der Parameter der Tabelle 5-17 spezifische jährliche Lagerkosten in Höhe von **0,15 €/t**.

Tabelle 5-17: Parameter zur Berechnung der Grundstückskosten (Investitionsabhängige Kosten für das Grundstück des Tanklagers)

Parameter	Angenommener Wert	Einheit
Platzbedarf	0,05	m ² /t
Jahresmiete eines Grundstücks mit Industrieanlagen (Tanklager)	3	€/m ²

Als weitere investitionsabhängige Kostenart in den Tanklagern werden für Zäune, Beleuchtungsanlagen und weitere Infrastrukturinvestitionen eine Gesamtinvestitionssumme von 30.000 € angenommen und unter den sonst gleichen Parametern der Tabelle 5-16 jährliche Gesamtkosten von 4.805 € beziehungsweise spezifische jährliche investitionsabhängige Kosten von **0,32 €/t** berechnet.

Auch die Personalkosten sollen hier den investitionsabhängigen Kosten zugeordnet werden, da sie nur bei der Investitionsentscheidung für einen Lagerstandort anfallen. Es werden, basierend auf der lediglich halbjährigen Nutzung des Tanklagers, Personalkosten von 20.000 €/a (vgl. Tabelle 5-14) und damit spezifische investitionsabhängige Kosten von **1,33 €/t** errechnet.

Alle bisher genannten investitionsabhängigen Kosten fallen in Abhängigkeit der Investitionsentscheidung hinsichtlich eines Tanklagers einer bestimmten Kapazität an. Tanklager- und Grundstückskosten sind abhängig von der erwarteten Kapazität des Lagers. Infrastruktur- und Personalkosten fallen unabhängig von der Kapazität an. Darüber hinaus gibt es betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten wie Kosten für Heizenergie und für das im gelagerten Material gebundene Kapital. Diese Kosten sind nicht von der geplanten Kapazität, sondern von der tatsächlichen Lagermenge abhängig.

Die spezifischen Energiekosten berechnen sich nach der folgenden Gleichung:

$$\text{Spezifische Energiekosten} = \frac{\text{Gesamtjahresarbeitsstunden} \cdot \text{Energiepreis} \cdot \text{Auslastung} \cdot \text{Anlagenleistung}}{5-17}$$

Unter den Parametern der Tabelle ergeben sich Energiekosten in Höhe von **25,48 €/t**, wobei die Energiekosten für Beleuchtung der Anlage vernachlässigt werden.

Tabelle 5-18: Parameter zur Berechnung der Energiekosten

Parameter	Angenommener Wert	Einheit
Heizleistung pro Tonne Lagerkapazität	0,7272	kW/t
Jahresarbeitsstunden im sechsmonatigen Betriebszeitraum	4380	h
Energiepreis gem. Tabelle 5-10	0,08	€/kWh
Auslastung der Anlage	10	%

Die Kosten für das im gelagerten Bitumen gebundene Kapital werden unter der Annahme eines durchschnittlichen Bitumenpreises von 450 €/t und jährlichen Kapitalkosten von 6 % – folglich 3 % über den Lagerzeitraum von 6 Monaten – des gebundenen Kapitals berechnet. Hieraus ergeben sich spezifische Kapitalkosten von **13,50 €/t** in Abhängigkeit der tatsächlichen Lagermenge.

Unter der Annahme, dass die geplante Lagerkapazität der jährlichen Lagermenge entspricht, lässt sich mit Hilfe der hier berechneten Werte eine Gradenglei-

chung für die jährlichen Gesamtkosten des Tanklagers in Abhängigkeit der Lagermenge generieren.

$$\text{Jährl. Gesamtheißlagerkosten} = 117,38 \frac{\text{€}}{\text{t}} \cdot \text{Bitumenlagermenge} + 24.850 \text{ €}$$

5-18

Bei den derzeit verwendeten Heißlagern werden vom Betreiber sehr viel günstigere Konditionen angeboten, als sie sich aus den hier dargestellten Gruppen von Kostenarten ergeben würden. Dies ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Tanklager seit über 40 Jahren bestehen. Die Lager sind abgeschrieben, wodurch eine andere Preisbildung möglich ist.

5.2.7.2 Abschätzung von Kaltlagerkosten

Bei der Bestimmung der Kaltlagerkosten können ebenso hinsichtlich der Bezugsgröße teilweise von den Gruppen von Kosten der Heißlagerung abweichende Gruppen definiert werden. Investitionsabhängige Kosten für Zäune, Beleuchtungsanlagen und Infrastruktur fallen pauschal (fix) und unabhängig von der Lagerkapazität an jedem Standort an. Zu dieser Pauschale, die an jedem Standort anfällt, zählen auch die Personalkosten. Investitionsabhängige Kosten für das Grundstück sind von der Lagerkapazität abhängig und fallen bei allen Verpackungssystemen an. Bei Kartonverpackungen, die nur eine geringe Witterungsbeständigkeit aufweisen, wird zusätzlich eine Zelthalle benötigt, deren Größe und damit deren investitionsabhängige Kostenarten von der Lagerkapazität abhängen. Auch diese Hallenkapazitäten richten sich an der maximalen Lagermenge im Betrachtungszeitraum aus. Die Abschreibung, Kapital-, Reparatur- und Versicherungskosten für diese Lagerinvestition werden in einer Kostenfunktion in Abhängigkeit der Lagerkapazität zusammengefasst. Sie wird aus drei Angeboten von Zelthallenlieferanten generiert. Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten fallen beim Ein- und Auslagern von kaltem Bitumen jeweils nur einmal pro gelagerte Tonne für den jeweiligen Geräte- und Personalaufwand an. Sie werden aufgrund ihrer geringen Größe hier vernachlässigt. Unter der Annahme, dass nur ein Lagerstandort existiert und die erwartete Kapazität gleich der Lagermenge ist, lassen sich die Kaltlagerkosten in Tabelle 5-19 darstellen.

Tabelle 5-19: Kostenstruktur bei 6-monatiger Lagerung an einem Kaltlagerstandort (vgl. Berechnungen im Unterabschnitt 5.2.7.1)

		Jahresgesamt-kostenfunktion Kunststoffgebinde	Kosten pro Tonne (bei 15.000 Tonnen Lagermenge in Kunststoffgeb. p.a.)	Jahresgesamt-kostenfunktion Kartongebinde	Kosten pro Tonne (bei 15.000 Tonnen Lagermenge in Kartons p.a.)
Investitionsabhängige Kostenarten	Zelthalle			12,93 €/t · Kapazität in Tonnen	12,93 €/t
	Grundstück	1,50 €/t · erwartete Kapazität in Tonnen	1,50 €/t	3,00 €/t · Kapazität in Tonnen	3,- €/t
	Zäune, Beleuchtungs-Anlage und Infrastruktur	4.850 €/a	0,32 €/t	4.850 €/a	0,32 €/t
	Personalkosten	20.000 €/a	1,33 €/t	20.000 €/a	1,33 €/t
Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten	Handhabung bei Ein- und Auslagerung	Vernachlässigt	Vernachlässigt	Vernachlässigt	Vernachlässigt
	Gebundenes Kapital	13,50 €/t Lagermenge in Tonnen	13,50 €/t	13,50 €/t Lagermenge in Tonnen	13,50 €/t
Summe		15 €/t · Menge +24.850 €	16,65 €/t	29,43 €/t · Menge +24.850 €	31,08 €/t

Den erläuternden Darstellungen des Unterabschnitts 5.2.7.1, welche die Berechnungen zu Infrastruktur, Personal und Kapitalkosten darstellen, wird an dieser Stelle eine Erläuterung zu den investitionsabhängigen Kosten für Zelthalle und Grundstück hinzugefügt. Die spezifischen jährlichen investitionsabhängigen Kosten für die Zelthalle von **12,93 €/t** berechnen sich mit der nachfolgenden Gleichung und den Parametern der Tabelle 5-25.

Spezifische Jährliche Zeltkosten = Spezifische Investition ·

$$\left(\frac{1}{\text{Abschreibungszeit}} + 0,5 \cdot \text{Kapitalzins} + \text{Anteil Versicherung, Wartung, Reparatur} \right)$$

5-19

Tabelle 5-20: Parameter zur Berechnung der investitionsabhängigen Kosten der Tanklager

Parameter	Angenommener Wert	Einheit
Spezifische Investition pro Tonne Lagerkapazität	80	€/m ³
Abschreibungszeitraum einer linearen Abschreibung	15	Jahre
Kapitalzins als Anteil der halben Investitionssumme	6	%
Reparatur und Wartung als Anteil der Investitionssumme	6	%
Versicherung als Anteil der Investitionssumme	0,5	%

Zur Berechnung der investitionsabhängigen jährlichen Grundstückskosten wird die folgende Gleichung verwendet:

$$\text{Spez. Grundstückskosten} = \text{Platzbedarf} \cdot \text{Jahresmiet e} \quad 5-20$$

Es ergeben sich unter Verwendung der Parameter der Tabelle 5-26 spezifische jährliche Lagerkosten in Höhe von **3 €/t** bei Kartonlagerung und **1,5 €/t** bei Lagerung in Kunststoffgebinden.

Tabelle 5-21: Parameter zur Berechnung der Grundstückskosten
(Investitionsabhängige Kosten für das Grundstück des Tanklagers)

Parameter	Angenom- mener Wert	Einheit
Platzbedarf bei Lagerung	1	m ² /t
Jahresmiete eines Grundstücks ohne Industrieanlagen	1,5	€/m ²
Jahresmiete eines Grundstücks mit Industrieanlagen (Zelthalle)	3	€/m ²

Für die Lagerung bei Abkühlung der Kartongebinde werden pro Tonne 5 m² benötigt. Die Aufenthaltsdauer beträgt einen Tag und der Grundstückspreis pauschal 1 € pro Quadratmeter und Monat. Es werden daher Abkühlkosten von **0,17 €/t** angesetzt. Die Kosten für das bei dieser eintägigen Lagerung gebundene Kapital können vernachlässigt werden.

5.2.7.3 Diskussion von Heiß- und Kaltlagerkosten

Beim Vergleich der jährlichen Gesamtkostenfunktionen von Heiß- und Kaltlagern zeigen sich einige charakteristische Unterschiede. Beide Kostenfunktionen können je nach Betrachtungsweise – anders als hier – nicht kontinuierlich sein. Denn je nach Größe einer Kapazitätserweiterung mittels zusätzlicher Lagertanks oder Lagerhallen fallen investitionsabhängige Kostenarten an. Hierbei sind die für die Kaltlagerung benötigten Zelthallen allerdings weitaus flexibler (vgl. Abschnitt 4.1.3) als Tanklagerinstallationen. Zelthallen können jederzeit modular in alle Richtungen erweitert und lediglich für die Lagerzeiträume angemietet werden. Der lineare Ansatz sei hier dadurch gerechtfertigt, da davon ausgegangen wird, dass auch die (zukünftigen) Tanklagerkapazitäten in Abhängigkeit der Lagermenge dimensioniert werden.

Der Anstieg der Heißlagerkostenfunktion ist mehr als doppelt so groß wie die der Kosten überdachter Kaltlager.

Relevant werden die Ergebnisse im Zuge der Integration der neuen Technologien in die Asphaltbindemittellogistik mittels eines mathematischen Modells, das die Lagerzeiten, -kapazitäten und -standorte optimiert. Dies erfolgt im nachfolgenden Kapitel 6.

5.3 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Im Rahmen der ökonomischen Bewertung von neuen Technologien der Bitumenkaltlogistik werden vier repräsentative Anlagentypen der Bitumenkalt-

handhabung und zwei Bitumenverpackungsformen hinsichtlich Investitionen und Kosten untersucht. Die Technologien und mögliche Technologiekombinationen werden nun einander anhand der Ergebnisse dieses Kapitels gegenübergestellt (Abschnitt 5.3.1), relevante Einflussparameter im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 5.3.2) bestimmt und ihr Einfluss quantifiziert.

5.3.1 Kombination von Technologien der Asphaltbindemittellogistik

Wie bereits im letzten Abschnitt dargelegt, gibt es eine Vielzahl von möglichen Technologiekombinationen im Bereich der Bitumenkaltlogistik, von denen einige hier herausgegriffen werden. Hierbei werden die Kosten für die Abfüllanlage, die nur bei Kunststoffverpackungen in der hier betrachteten Form notwendig ist, zu den Gesamtkosten der jeweiligen Technologiekombinationen, die sich der Kunststoffverpackungen bedienen, addiert. Alle in diesem Abschnitt dargestellten spezifischen Kosten gehen von den in Tabelle 5-22 dargestellten Eingangsparametern aus.

Tabelle 5-22: Annahmen für die Abschätzung der Stückkosten (€/t) in der jeweiligen Technologiekombination

Parameter	Wert	Einheit	Erläuterung
Jahresproduktion	15.000	t	beispielhafte Annahme
Kalkulatorischer Zinssatz	6	%	praxisüblicher Satz (Annahme)
Personalkosten pro Person	40.000	€	durchschnittliche Lohnkosten inklusive Lohnnebenkosten auf Asphaltmischanlage
Anz. jährl. Produktionstage	100	d	Erklärung siehe Text (Unterabschnitt 5.2.4)
Anz. Arbeitsstunden p.d.	10	h/d	durchschnittliche Betriebszeiten zur Hauptbausaison; kein Schichtbetrieb
Abschreibungszeitraum	15	a	praxisüblicher Satz (Annahme)
Heißtransportstrecke			Die Transportkosten einer spezifischen Versorgungskette werden in Kapitel 6 mittels eines mathematischen Modells bestimmt.
Kalttransportstrecke			wie Heißtransport
Elektrizitätskosten	0,126	€/kWh	gemittelt aus Angeboten (2011)
Heizölkosten	0,76	€/l	gemittelt aus Angeboten (2011)
Lagerzeit			Die Lagerkosten einer spezifischen Versorgungskette werden mittels eines mathematischen Modells bestimmt (Kapitel 6).

Die Transportstrecken und Lagerzeiträume sind zunächst gleich null und damit bleiben Transport- und Lagerkosten unberücksichtigt, da diese Größen in Kapitel 6 mittels eines mathematischen Optimierungsmodells im Zuge einer optimalen Technologieintegration bestimmt werden. Die Stückkosten ohne Transport- und Lagerkosten, bezogen auf oben genannte Parameter, sind in Tabelle 5-23 dargestellt.

Tabelle 5-23: Stückkosten (ohne Transport- und Lagerkosten) in den jeweiligen Technologiekombinationen in Euro pro Tonne Bitumen

Kombination	Fassschmelzer	Schmelztopf	Mikrowellen-Ofen
Fass	192,26 €/t	nicht möglich	nicht möglich
Kunststoffverpackung	68,20 €/t	72,18 €/t	keine Aussage
Kartonverpackung	51,47 €/t	55,45 €/t	58,54 €/t

Die Transportkosten werden hierbei nicht berücksichtigt. Gemäß der errechneten Transportkostensparnis von zirka 5 €/t auf 100 km bei Kalttransport (vgl. Unterabschnitt 5.2.6) gilt, dass – abhängig von der angewendeten Technologiekombination – erst ab einer Transportdistanz von 1000 bis 1500 km die Transportkostensparnis die restlichen Kalthandhabungskosten kompensieren kann.

Der Einfluss der Kaltlagerkosten ist hingegen größer. Sie betragen zusätzlich 16,65 €/t bei Außenlagerung (Fässer, Kunststoffgebände) und 31,08 €/t bei Innenlagerung (Kartongebände) (vgl. Tabelle 5-19). Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer Optimierung der Lagerzeiten und Transportstrecken, wie sie in Kapitel 6 erfolgen wird.

Es zeigt sich, dass mit den Parametern der Tabelle 5-22 die Kombination von Kartonverpackung mit einem Fassschmelzer die niedrigsten Kosten pro durchgesetzter Tonne Bitumen verursacht. Erwartungsgemäß ist das Beschicken dieser Anlage mit Fassgebänden hingegen mit verhältnismäßig großen Kosten verbunden. Für diese Technologiekombination werden die spezifischen Kosten mit den durchsatzspezifischen Aufwendungen des Fassschmelzers und einer Annahme von 175 €/t Verpackungskosten für Fässer berechnet. Selbst unter der Annahme sehr niedriger Kosten für Fässer von beispielsweise 10,- € pro 200-Liter-Fass hat diese Technologiekombination allerdings weiterhin die höchsten Stückkosten. Sie wird daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Die Stückkosten setzen sich auf Grundlage der in Tabelle 5-22 genannten Parameter wie in Tabelle 5-24 dargestellt zusammen. Investitionsabhängige und betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten sind dabei jeweils Bestandteil der einzeln gezeigten Handhabungskosten.

Tabelle 5-24: Zusammensetzung der spezifischen Kosten anhand der Verfahrensschritte

Technologie- kombination	Kunststoff- gebinde mit Fass- schmelzer	Kunst- stoffge- binde mit Schmelz- topf	Karton- gebinde mit Fass- schmelzer	Karton- gebinde mit Schmelz- topf	Karton- gebinde mit Mikrowellen- ofen
Kosten in der Raffinerie			1,81 €/t	1,81 €/t	1,81 €/t
Befüllung der Kunststoffgebinde	21,62 €/t	21,62 €/t			
Befüllung der Kartongebinde			0,17 €/t	0,17 €/t	0,17 €/t
Verpackungsmaterial der Kunststoffgebinde	30,00 €/t	30,00 €/t			
Verpackungsmaterial der Kartongebinde			31,33 €/t	31,33 €/t	31,33 €/t
Lagerung in Zelt-halle			31,08 €/t	31,08 €/t	31,08 €/t
Lagerung in Außenlager	16,65 €/t	16,65 €/t			
Fassschmelzer	15,44 €/t		15,44 €/t		
Schmelztopf		19,42 €/t		19,42 €/t	
Mikrowellenofen					22,51 €/t
Verwertung der Kunststoffverpackung	1,13 €/t	1,13 €/t			
Verwertung der Kartonverpackung			2,72 €/t	2,72 €/t	2,72 €/t
Summe	84,84 €/t	88,82 €/t	82,55 €/t	86,53 €/t	89,62 €/t

Bei der Verwendung eines Mikrowellenofens (der in diesem Kapitel vorgestellten Spezifikation) zur Verflüssigung reicht dessen Kapazität für eine Jahresver-

flüssigungsleistung von beispielsweise 15.000 Tonnen alleine zumeist¹⁵ aus. Generell ist das Verteilen der Kapazitäten auf mehrere Anlagenstandorte bei allen Verflüssigungsanlagentypen möglich, da auch bei der Mikrowellenverflüssigungsanlage kleinere Anlagenleistungskonfigurationen lieferbar sind. Eine solche Verteilung der Kapazität wirkt sich wiederum mindernd auf die Transportkosten aus. Die höheren Personalkosten können somit bis zu einem noch zu bestimmenden Maß kompensiert werden. Nicht zuletzt deshalb wird in Kapitel 6, im Zuge der modellhaften Technologieintegration in eine existierende Versorgungskette, mittels der Formulierung eines mathematischen Optimierungsproblems die optimale Standortwahl beispielhaft durchgeführt.

5.3.2 Analyse der Sensitivität der Technologiekombinationen auf relevante Parameter

Mittels Sensitivitätsanalysen wird die Beeinflussbarkeit von Ergebnisgrößen durch Berechnungsparameter ermittelt [Ha93]. Es wird dabei zunächst weiterhin davon ausgegangen, dass sich alle Anlagen einer Technologiekombination am gleichen Standort befinden. Unter anderem sind Transportkosten und eventuelle zusätzliche Personalkosten dadurch hier noch unberücksichtigt. Hier wird daher der Einfluss auf die spezifischen Gesamtkosten (ohne Transportkosten) durch die im Folgenden ausgewählten Parameter bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen analysiert werden.

- *Investitionssumme*: Die Investitionssumme aller benötigter Anlagentypen wird variiert.
- *Jahresproduktionsmenge*: Hier wird die Menge variiert, die mittels der neuen Technologien der Bitumenkalthandhabung distribuiert werden. Bei den bisherigen Berechnungen im letzten Abschnitt wird von 15.000 Tonnen Jahresdurchsatz ausgegangen.
- *Personalkosten*: Bisher wird von 40.000 €/a ausgegangen, der Einfluss dieser Größe wird nun untersucht.
- *Energiekosten*: Die Kosten für Elektrizität und Kraftstoff werden gemeinsam zu gleichem Anteil variiert.
- *Abschreibungszeitraum*: In der Regel wird hier von einem 15-jährigen Abschreibungszeitraum ausgegangen da dies der durchschnittlichen Nut-

¹⁵ Die in einem Monat oder einer Woche benötigte Verflüssigungsmenge kann hier ebenso ausschlaggebend sein.

zungsdauer entspricht. Trotzdem wird hier untersucht, wie stark sich kürzere und längere Zeiträume auf die Kosten auswirken.

In den Sensitivitätsanalysen wird jeweils eine Parametervariation im Bereich von -100 % bis +100 % vorgenommen. Die Kostenstrukturen in den fünf in Tabelle 5-23 dargestellten Technologiekombinationen, in denen moderne Bitumenverpackungen (Kunststoff, Karton) zum Einsatz kommen, werden mittels Parametervariation analysiert und die Ergebnisse in Abbildung 22 a) bis Abbildung 22 f) dargestellt.

Sie zeigen die überproportionale Abhängigkeit der Stückkosten (bezogen auf Tonnen) von der Wahl des Abschreibungszeitraums und in noch größerem Maße von der jährlich durchgesetzten Menge (Jahresproduktionsmenge). Größere Produktionsmengen in der Bindemittelkaltlogistik verursachen demzufolge in den meisten Fällen eine Senkung der Gesamtkosten. Je nach Gesamtjahreskapazität der Verflüssigungsanlage schwankt der Einfluss der Jahresproduktionsmenge auf die Stückkosten. Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten in den Technologiekombinationen mit Schmelztöpfen und mit Mikrowellenverflüssigungsanlagen, wobei beim Überschreiten der jeweiligen Gesamtmaximalkapazitäten ein Kostensprung aufgrund der Aufstockung des Anlagenbestands entsteht. Diese Kapazitätsgrenzen liegen in dem Berechnungsmodell bei Technologiekombinationen mit Schmelztöpfen (Abbildung 22 a, b, d) bei 5.000 Tonnen pro Jahr und Vielfachen davon, bei Technologiekombinationen mit Fassschmelzern (Abbildung 22 c, e) bei 2.000 Tonnen pro Jahr und Vielfachen davon und bei der Kombination mit einem oder mehreren Mikrowellenöfen bei 15.000 Tonnen pro Jahr. Die Abbildungen zeigen auch einen geringen, bisweilen linearen Einfluss der anderen untersuchten Parameter wie Investitionssumme, Personalkosten und Energiekosten.

Da sich investitionsabhängige, betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten, wie in Tabelle 5-3 dargestellt, von unterschiedlichen Mengen (Maximalmenge in einer Periode an einem Standort, gesamte Produktionsmenge) beziehen, wird hier zunächst vereinfachend davon ausgegangen, dass die Kalthandhabung nur an einem Standort stattfindet und die (in einer Periode, z.B. Monat) maximal erreichte Verflüssigungs- und Lagerleistung der gesamten Verflüssigungs- und Lagerleistung im Betrachtungszeitraum (z.B. Jahr) entspricht. Eine Differenzierung wird in Kapitel 6 im Zuge der Erstellung des Optimierungsmodells vorgenommen.

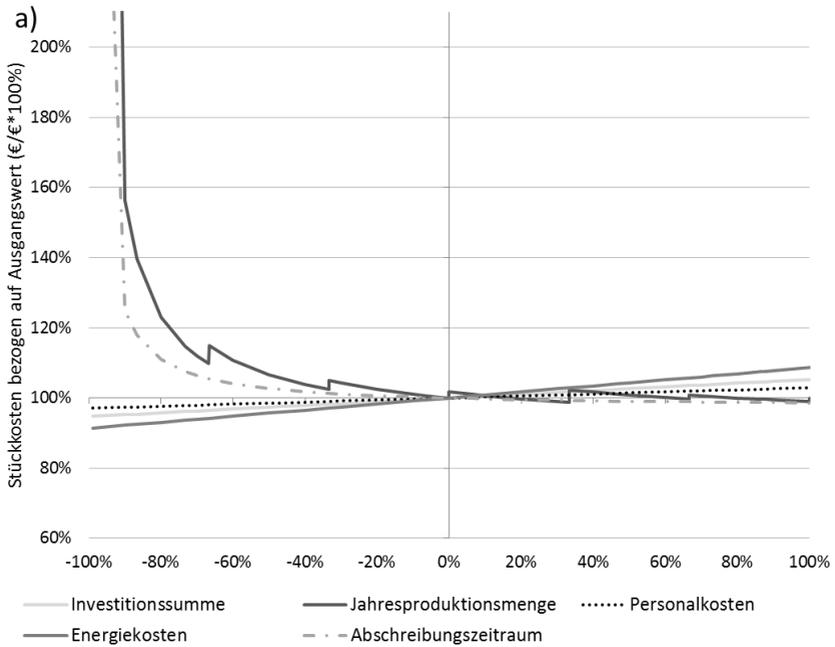


Abbildung 17: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Fässer und Verflüssigen im Fassschmelzer

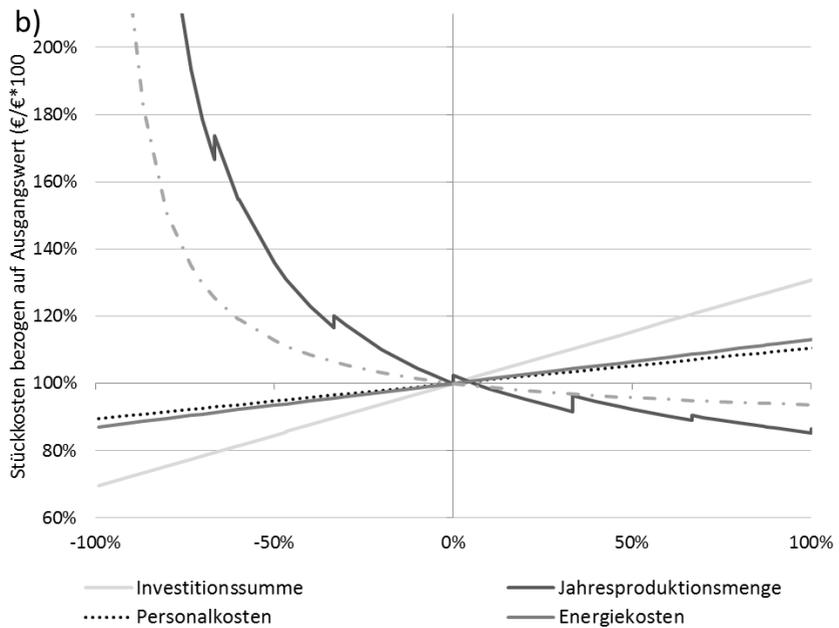


Abbildung 18: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kunststoff und Verflüssigen im Fassschmelzer

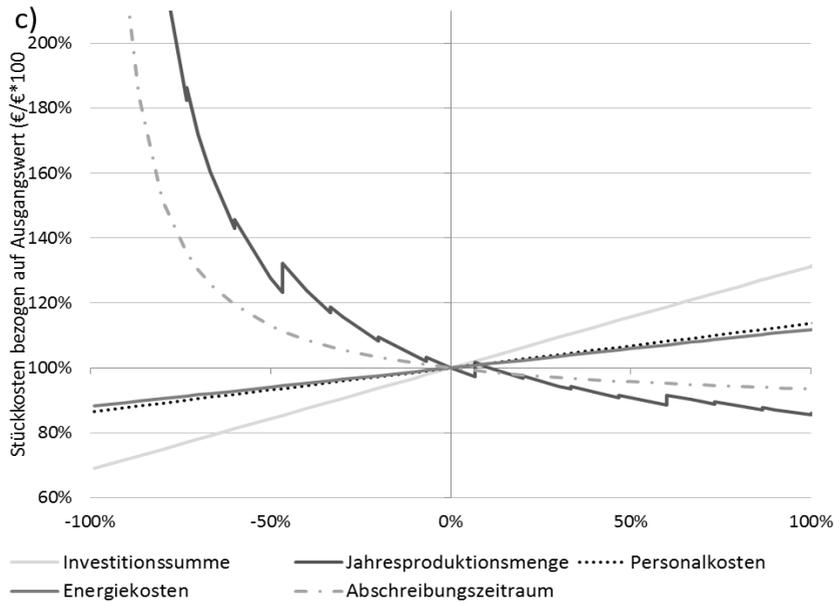


Abbildung 19: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kunststoffgebinde und Verflüssigen im Schmelztopf

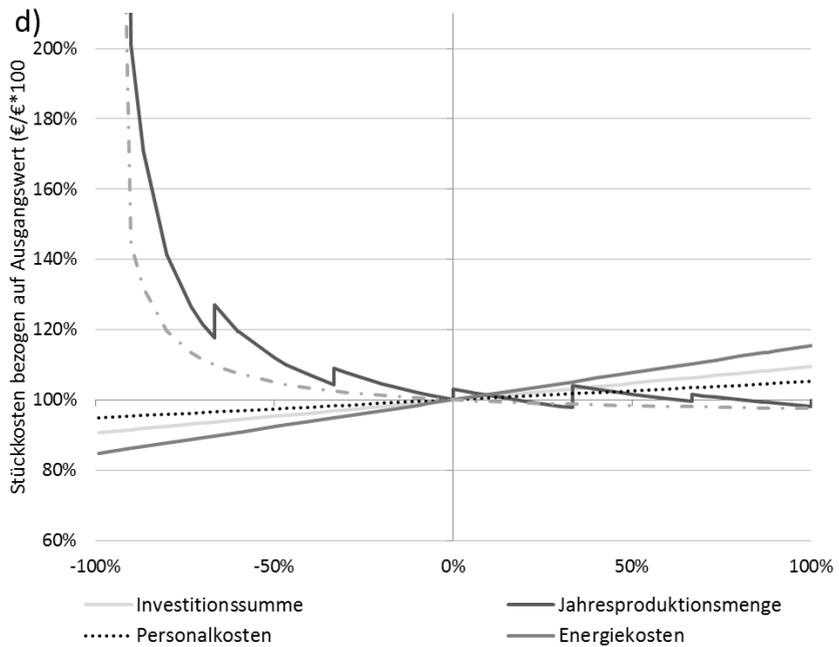


Abbildung 20: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kartongebinde und Verflüssigen im Fassschmelzer

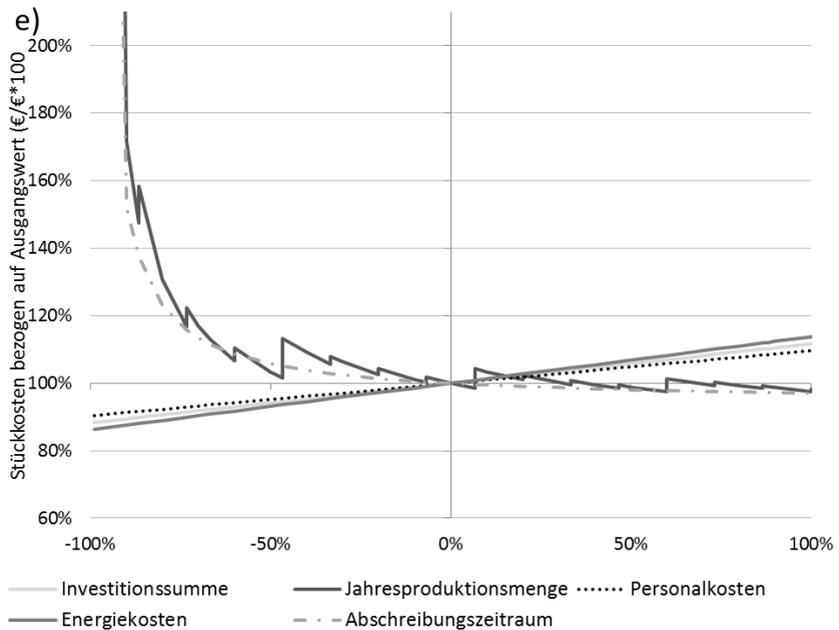


Abbildung 21: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kartongebinde und Verflüssigen im Schmelztopf

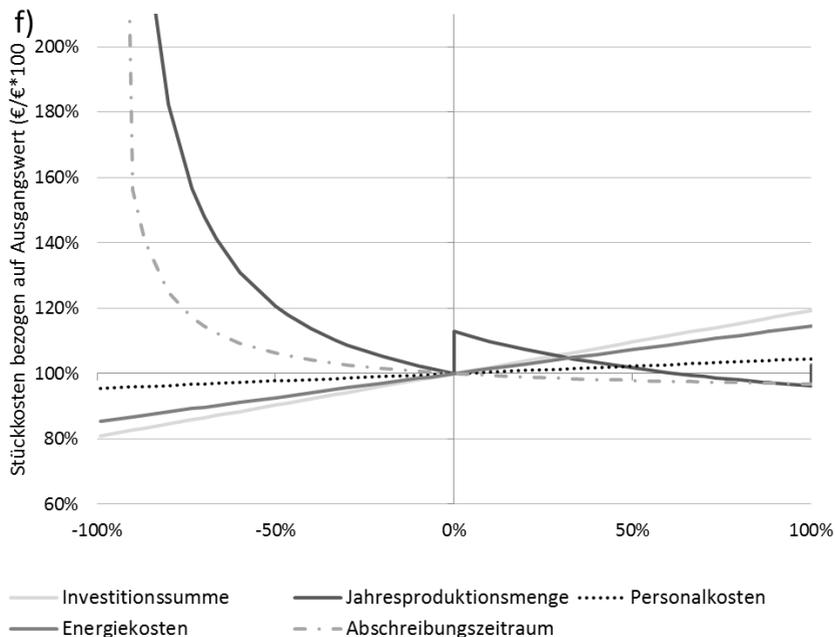


Abbildung 22: Sensitivität der Stückkosten (pro Tonne) bezogen auf den Ausgangswert (Stückkosten aus Tabelle 5-23) nach Parameteränderung bei der Technologiekombination für das Verpacken in Kartons und Verflüssigen im Mikrowellenofen

Beim Einsatz von Kunststoffgebinden (Abbildung 22 b, c) haben, bedingt durch den Bedarf einer Abfüllanlage, die investitionsabhängigen Kostenarten von den zuletzt genannten Parametern den größten Einfluss. Wie in Abbildung 22 b) und c) dargestellt, ist der Einfluss der Jahresdurchsatzmenge bei Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden und zugehörigen Abfülltechnologien verhältnismäßig größer als die Wahl der Abschreibungsdauer. Dies ist auf die geringe Flexibilität bei der Wahl von Abfüllanlagenkapazitäten zurückzuführen. Bei einer Kombination von Kartonhandling mit konventionellen Verflüssigungstechnologien (Abbildung 22 d, e) haben die Energiekosten einen stärkeren Einfluss auf die Stückkosten als bei anderen Technologiekombinationen. Abbildung 22 e) zeigt die Stückkostensensitivität der Technologiekombination von Kartonverpackung kombiniert mit Wiederverflüssigung im Schmelztopf. Abschreibungszeitraum und Jahresproduktionsmenge üben aber auch hierbei einen starken, annähernd gleichen Einfluss aus. Die Sensitivitätsanalyse der Technologiekombination mit Mikrowellenverflüssigungsanlage zeigt eine hohe

Abhängigkeit von der Jahresproduktionsmenge insbesondere dann, wenn – wie hier bei mehr als 15.000 Tonnen der Fall (vgl. Tabelle 5-5) – die maximale Jahreskapazität einer Verflüssigungsanlage überschritten wird. Um die resultierenden Kostensprünge durch eine optimale Anlagenauslastung zu vermeiden, wird in Kapitel 6 ein Modell entwickelt, das es ermöglicht, die benötigte Produktionsmenge unabhängig von den Kapazitätsgrenzen der existierenden Anlagentypen zu berechnen. Anschließend können dann Anlagen gebaut werden, die der benötigten Kapazität entsprechen. Um diese Berechnungen zu ermöglichen, werden im nächsten Abschnitt die Kostenfunktionen dahingehend vereinfacht, dass die Kostenfunktionen mit kapazitätsbedingten Kostensprüngen in lineare Gesamtkostenfunktionen überführt werden.

5.4 Überführung der Kostendaten in Kostenfunktionen

In diesem Kapitel wird zunächst wie in Abschnitt 5.1 gemäß Rentz [Re79] eine Unterteilung der Gesamtkosten in

- investitionsabhängige Kostenarten,
- verbrauchsabhängige bzw. betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten,
- Personalkosten,
- sonstige Kosten

vorgenommen. Lager- und Transportkosten werden gesondert mittels dieser Unterteilung aufgeführt, da sie hier erst in Kapitel 6 im Zuge der Optimierung der gesamten Versorgungskette bestimmt werden. Die Personalkosten an Lager- und Verflüssigungsstandorten stellen sich als investitions- bzw. betriebsmittelverbrauchsabhängig dar. Das heißt, sie fallen zum Teil fix für jeden Standort (Wachpersonal) an oder sind von der Produktionsmenge abhängig. Hieraus resultiert laut der in Abschnitt 5.2 getroffenen Definition für Lager- und Verflüssigungsstandorte eine Unterteilung der Kosten in (vgl. auch [Fi95][Ko09][Ke08])

- investitionsabhängige Kostenarten (Bsp.: Abschreibung, Reparatur, Versicherung)
- betriebsmittelverbrauchsabhängige Kostenarten (Bsp.: Energie, Verpackungsmaterial)

Am Abfüllstandort (Raffinerie) fallen sonstige Kosten an (vgl. Unterabschnitt 5.2.5).

In diesem Abschnitt werden, entsprechend dieser Unterteilung die Kostenfunktionen in Abhängigkeit von ihrer jeweiligen mengenmäßigen Bezugsgröße (Bitumenmenge, vgl. Tabelle 5-3) generiert, um dann die Gradengleichungen in das Optimierungsmodell in Kapitel 6 integrieren zu können. Die Unterteilung erfolgt dabei in Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden (Unterabschnitt 5.4.1) und Technologiekombinationen mit Kartongebinden (Unterabschnitt 0). Die Technologiekombination mit Fässern wird bereits in Unterabschnitt 5.3.1 aufgrund ihrer hohen Stückkosten (zirka 190 €/t) von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Die Kostenfunktionen dieses Abschnitts¹⁶ werden über eventuelle Kapazitäts-sprünge hinweg mittels Excel in lineare Gesamtkostenfunktionen überführt. Das heißt, es wird jeweils eine lineare Geradengleichung der Form

$$y = mx + t \qquad 5-21$$

y Jährliche Gesamtkosten in Euro

m Steigung der Kostenfunktion

x Bitumenmenge in Tonnen

t Verschiebung der Kostenfunktion auf der Kostenachse

generiert. Mit den Berechnungsergebnissen des Modells in Kapitel 6, in das die linearen Gesamtkostenfunktionen einfließen, ist es möglich, die Anlagen in der Größenordnung zu bestellen, in der sie für die in Kapitel 6 zu bestimmende optimale Handhabungskette benötigt werden. Die investitionsabhängigen fixen Kosten hängen damit auch von der Produktionsmenge ab, was die Überführung der Kostenfunktionen mit kapazitätsbedingten Kostensprüngen in lineare Kostenfunktionen rechtfertigt. Eine differenzierte Betrachtung der existierenden Anlagenkapazitäten wird in diesem Kapitel (und in der Auswertung der Modell-ergebnisse in Kapitel 6) trotzdem vorgenommen, um abschätzen zu können, inwieweit die vorhandenen Technologien bereits eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wird auch die Größendegression vernachlässigt. Da die Bitumenkalthandhabung durch die hohen Verpackungsmaterial- (zirka 30 €/t) und Verflüssigungsenergiekosten (zirka 10 €/t), welche zusammen über 50 %

¹⁶ In diesem Kapitel wurde mit Gesamtkosten- und Stückkostenfunktionen gearbeitet. Der Begriff der „linearen Kostenfunktionen“ steht im Folgenden für „lineare Gesamtkostenfunktion“.

der gesamten Stückkosten verursachen (vgl. Tabelle 5-24), eine große variable Komponente haben, stellt sich die Größendegression naturgemäß ohnehin verhältnismäßig gering dar. Durch die Linearisierung der Kostenfunktionen ist es nicht mehr möglich, zwischen den tatsächlichen fixen und variablen Anteilen der Kostenfunktionen zu unterscheiden. Diese können allerdings nach der Anwendung des Modells in Kapitel 6 wieder entsprechend der berechneten Kapazitäten bestimmt werden. Die Geradengleichungen werden über Bitumenmengen von 0 bis 20.000 Tonnen generiert, da keine größere Handhabungsmenge erwartet wird.

5.4.1 Kostenfunktionen von Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden

Die investitionsabhängigen Kosten in Abhängigkeit der erwarteten maximalen Kapazität in einer Periode des Betrachtungszeitraums sind in

Tabelle 5-25 dargestellt.

Tabelle 5-25: Investitionsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden

	Geradengleichung	Erläuterung
Abfüllung	$y = 24.250 \text{ €}$	Abschreibungs-, Reparatur-, Kapital- und Versicherungskosten der Abfüllanlagen. Die Geradengleichung ist konstant, da eine Anlage bis zu 50.000 Tonnen ¹⁷ (vgl. Tabelle 5-5) abfüllen kann.
Schmelztopf	$y = 5,47 \text{ €/t x}$ $+ 11.851 \text{ €}$	Abschreibungs-, Reparatur-, Kapital- und Versicherungskosten der Verflüssigungsanlagen. Mit steigender Produktionsmenge werden zusätzliche oder größere Anlagen benötigt (vgl. 5.2.2).
Fassschmelzer	$y = 3,65 \text{ €/t x}$ $+ 24.068 \text{ €}$	Wie Schmelztopf
Lager	$y = 1,50 \text{ €/t x}$ $+ 4.850 \text{ €}$	Vgl. Tabelle 5-19

¹⁷ Die Geradengleichungen werden über Bitumenmengen von 0 bis 20.000 Tonnen generiert, da keine größere Handhabungsmenge erwartet wird.

Die Geradengleichungen der betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten in Abhängigkeit der Produktionsmenge werden in Tabelle 5-26 dargestellt und erläutert.

Tabelle 5-26: Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden

	Geradengleichung	Erläuterung
Abfüllung	$y = 32,08 \text{ €/t } x$	Verpackungsmaterial, Verpackungsentsorgung, Energiekosten der Abfüllanlage (vgl. 5.2.3)
Schmelztopf	$y = 7,93 \text{ €/t } x$	Energiekosten (vgl. 5.2.3)
Fassschmelzer	$y = 7,62 \text{ €/t } x$	Energiekosten (vgl. 5.2.3)
Lager	$y = 13,50 \text{ €/t } x$	Vgl. Tabelle 5-19

Die Geradengleichungen der betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten in Abhängigkeit der Produktionsmenge werden in Tabelle 5-27 dargestellt und erläutert.

Tabelle 5-27: Personalkostenfunktionen in Technologiekombinationen mit Kunststoffgebinden

	Geradengleichung	Erläuterung
Verpackung	$y = 0,63 \text{ €/t } x$ $+ 58.332 \text{ €}$	Personalkosten an der Abfüllanlage (vgl. 5.2.4). Die Gleichung gilt für jeden neuen Standort und wird daher hier zugeordnet.
Schmelztopf	$y = 4,01 \text{ €/t } x$ $+ 39.799 \text{ €}$	Personalkosten am Schmelztopf (vgl. 5.2.4). Die Gleichung gilt für jeden neuen Standort, und wird daher hier zugeordnet.
Fassschmelzer	$y = 40.000 \text{ €}$	Personalkosten sind bis zu einer Produktionsmenge von 20.000 Tonnen ¹⁷ konstant (vgl. 5.2.4). Die Gleichung gilt für jeden neuen Standort und wird daher hier zugeordnet.
Lager	$y = 20.000 \text{ €}$	Vgl. Tabelle 5-19

5.4.2 Kostenfunktionen von Technologiekombinationen mit Kartongebinden

Die investitionsabhängigen Kosten in Abhängigkeit der erwarteten maximalen Kapazität in einer Periode des Betrachtungszeitraums sind in Tabelle 5-28 dargestellt.

Tabelle 5-28: Investitionsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kartongebinden

Technologie	Geraden-gleichung	Erläuterung
Schmelztopf	$y = 5,47 \text{ €/t } x + 11.851 \text{ €}$	Abschreibungs-, Reparatur-, Kapital- und Versicherungskosten der Verflüssigungsanlagen. Mit steigender Produktionsmenge werden zusätzliche oder größere Anlagen benötigt (vgl. 5.2.2).
Fassschmelzer	$y = 3,65 \text{ €/t } x + 24.068 \text{ €}$	Wie Schmelztopf
Mikrowellenofen	$y = 9,41 \text{ €/t } x + 112.883 \text{ €}$	Abschreibungs-, Reparatur-, Kapital- und Versicherungskosten der Abfüllanlagen
Lager	$y = 12,36 \text{ €/t } x + 4.850 \text{ €}$	Für Zäune, Beleuchtung, Infrastruktur, Grundstück und Zelt an jedem Standort. Die Zeltkapazitäten sind flexibel (vgl. 4.1.3).

Die Geradengleichungen der betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten in Abhängigkeit der Produktionsmenge werden in Tabelle 5-29 dargestellt und erläutert.

Tabelle 5-29: Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten in Technologiekombinationen mit Kartongebinden

Technologie	Geradengleichung	Erläuterung
Abfüllung	$y = 36,03 \text{ €/t } x$	Verpackungsmaterial, Verpackungsent-sorgung, (vgl. 5.2.3)
Schmelztopf	$y = 7,93 \text{ €/t } x$	Energiekosten (vgl. 5.2.3)
Fassschmelzer	$y = 7,62 \text{ €/t } x$	Energiekosten (vgl. 5.2.3)
Mikrowellenofen	$y = 8,57 \text{ €/t } x$	Energiekosten (vgl. 5.2.3)
Lager	$y = 13,50 \text{ €/t } x$	Vgl. Tabelle 5-19

Die Geradengleichungen der personalkosten Kosten in Abhängigkeit der Produktionsmenge werden in Tabelle 5-30 dargestellt und erläutert.

Tabelle 5-30: Personalkostenfunktionen in Technologiekombinationen mit Kartongebinden

Technologie	Geradengleichung	Erläuterung
Schmelztopf	$y = 4,01 \text{ €/t } x + 39.799 \text{ €}$	Personalkosten am Schmelztopf (vgl. 5.2.4). Der fixe Anteil fällt für jeden neuen Standort an. Der variable Anteil hängt von der Größe der Anlage ab.
Fassschmelzer	$y = 40.000 \text{ €}$	Personalkosten sind bis zu einer Produktionsmenge von 20.000 Tonnen ¹⁷ konstant (vgl. 5.2.4). Die Gleichung gilt daher für jeden neuen Standort.
Mikrowellenofen	$y = 40.000 \text{ €}$	Wie Fassschmelzer
Lager	$y = 20.000 \text{ €}$	Vgl. Tabelle 5-19

5.5 Zusammenfassung der ökonomischen Bewertung von Bitumenkaltlogistikketten

Zur ökonomischen Bewertung von Technologien und Technologiekombinationen in der Bitumenkalthandhabung werden in diesem Abschnitt Methoden der Investitions- und Kostenschätzung sowie Sensitivitätsanalysen herangezogen. Hierzu werden zunächst die theoretischen Grundlagen erarbeitet und dargestellt. Anschließend wird mit Hilfe ausgewählter Methoden eine Kostenschätzung für ausgewählte Technologiekombinationen durchgeführt.

Es stellt sich heraus, dass die Bitumenkalthandhabung in Kartonverpackungen aufgrund des geringen Aufwands bei der Gebindebefüllung die niedrigsten Stückkosten (pro Tonne) verursacht. Die niedrigsten Stückkosten fallen hierbei wiederum bei einer Verflüssigung mittels Fassschmelzer an, gefolgt von einer Verflüssigung im Schmelztopf. Die räumliche Anordnung der verhältnismäßig leistungsschwachen konventionellen Schmelzer hat allerdings eine große Auswirkung auf den Personalbedarf der Technologiekombinationen. Weitere technische Aspekte werden hier nicht berücksichtigt.

Eine Sensitivitätsanalyse ergibt schließlich, dass bei allen Technologiekombinationen die Abschreibungsdauer und die Jahresproduktionsmenge den stärksten Einfluss auf die Stückkosten haben. Während sich die Abschreibungsdauer nicht verändern lässt, kann aber die Produktionsmenge der jeweiligen Technologiekombination und an verschiedenen Standorten mittels eines mathemati-

schen Optimierungsmodells so gewählt werden, dass die Gesamtkosten unter Deckung der Nachfrage minimal sind. Um dieses Verfahren in Kapitel 6 zu ermöglichen, werden hier Kostenfunktionen in Abhängigkeit der Bitumenmengen generiert.

Die Möglichkeiten der zusätzlichen Gesamtkostenreduzierung durch Kalttransporte gegenüber Heißtransporten und die Mehrkosten für eventuelle Transporte an die Lager- und Verflüssigungsstandorte sowie die Lagerkostensparnis durch Kaltlagerung werden nicht berücksichtigt. Diese entscheidungsrelevanten ökonomischen Größen werden im Rahmen des Optimierungsmodells im nachfolgenden Kapitel 6 untersucht.

6 Technologieintegration in die Asphaltbindemittellogistik

Die Technologien der Bitumenkalthandhabung finden derzeit in Logistikketten des Straßenbaus in Deutschland keine Anwendung.¹⁸ Dabei lassen es die starken saisonalen Schwankungen des Bitumenpreises in jüngerer Zeit durchaus als sinnvoll erscheinen, größere Mengen des Asphaltbindemittels zu lagern, um diese in Phasen hoher Einkaufspreise (vgl. Abschnitt 2.5) in der Produktion einzusetzen. Im vorhergehenden Unterabschnitt 5.2.7.3 wird gezeigt, dass sich dabei die Kaltlagerung mit Wiederverflüssigung als wirtschaftlicher erweisen kann als die Tanklagerung im heißflüssigen Zustand.

Inwieweit die Kalthandhabung und damit die Anwendung der hierfür erforderlichen Technologien sinnvoll sind, lässt sich quantifizieren, indem die tatsächlichen Versorgungsketten eines Unternehmens herangezogen werden. In diesem Kapitel werden die Optionen der Heiß- und Kaltlagerung modellhaft in die Logistikkette eines der größten Bauunternehmen Europas integriert werden. Hierdurch wird es möglich, die wirtschaftlichen Vorteile des potentiellen technologischen Wandels im Bereich der Bitumenlogistik und Bitumenversorgungsicherung greifbar zu machen.

Wirtschaftlich optimieren lässt sich dabei nicht nur die Dauer und Art der Lagerung, sondern darüber hinaus die Anzahl und Lage zukünftiger Lagerstandorte, ihre jeweilige Kapazität und die gesamten Bitumenstoffströme der Versorgungskette, die durch den Einsatz von Kalthandhabungstechnologien stark beeinflusst werden [KI01]. Zur Durchführung dieser Integrationsaufgabe wird folgendermaßen vorgegangen:

In Abschnitt 6.1 werden die theoretischen Grundlagen von Problemen im Bereich der Standort- und Kapazitäten-Planung erörtert. In Abschnitt 6.2 wird eine abstrahierte graphische Darstellung der Bitumenversorgungskette erarbeitet, die einen anschaulichen Überblick über mögliche Stoffströme der Asphaltproduktionsversorgung gibt. Anschließend werden in Abschnitt 6.3.1 die Anforderungen an ein Planungsmodell der Bitumenlogistik für die Asphaltproduktion eines Unternehmens beschrieben. Im Abschnitt 6.3.2 wird das mathemati-

¹⁸ Eine Ausnahme stellen die Lieferformen des Trinidad Epurè dar, bei denen ein bitumenhaltiges Spezialbindemittel in granulierter Form und mit viel Trennmittel in Kunststoffsäcken geliefert wird.

sche Optimierungsmodell auf Basis der Minimierung der jährlichen Gesamtkosten unter Deckung der Nachfrage für die unternehmensinterne Bitumenversorgung in Deutschland formuliert. Außerdem werden die Preisszenarien aufgezeigt, deren Auswirkungen auf die Modellergebnisse ausgewertet werden. In Abschnitt 6.5 wird die Implementierung des mathematischen Modells in „General Algebraic Modelling System“ (GAMS) beschrieben. Die vergleichende Modellauswertung verschiedener Logistikkonzepte wie beispielsweise Just-in-time-Lieferung mit Heiß- oder Kaltlageroption und die Auswertung hinsichtlich Anlagenkapazität, Anlagenkonfiguration, Standortanzahl und -lage werden in Abschnitt 6.6 durchgeführt. Dabei werden auch Stoffströme und Lagerzeiträume analysiert. Die Ergebnisse werden abschließend in 6.7 nochmals zusammengefasst dargestellt.

6.1 Methoden zur Standort- und Kapazitätsplanung

In der Standortplanung geht es um die Frage, inwieweit die Lokalisierung von Betrieben oder Betriebsmitteln Einfluss auf den Unternehmenserfolg hat [MaTö01]. Dabei werden auch die Auswirkungen der Standortentscheidungen auf das betriebliche und gegebenenfalls überbetriebliche Umfeld und den Betrieb selbst untersucht [MaTö01]. Dieser Einfluss ist aufgrund der Tatsache, dass Standortentscheidungen nur schwer reversibel sind, vergleichsweise hoch [En02][Sch94]. Die Standortentscheidung beeinflusst größtenteils -und beinhaltet damit oft- eine Entscheidung über Kapazitäten, Mengen, Zeiträume und Stoffströme. Günther und Tempelmaier sprechen daher auch von einer Verbindung zwischen Kapazitäts- und Einzugsbereichsfragen mit Standortfragen [Güte94]. Im Zuge der Standortplanung von Technologien der Bitumenkalthandhabung wird auch hier die Planung der Kapazitäten durchgeführt. Die theoretischen Grundlagen werden zunächst in diesem Abschnitt erläutert. Hierzu wird in Abschnitt 6.1.1 zunächst auf verschiedene Ansätze der Standortplanung aus der Literatur eingegangen. In Abschnitt 6.1.2 werden die Kriterien der Standortanalyse, die sogenannten „Standortfaktoren“ kategorisiert und erläutert. In Abschnitt 6.1.3 werden verschiedene Typen von Standortproblemen erläutert. Zuletzt wird in Abschnitt 6.1.4 auf den Stand der Standortplanung bei Abfüll-, Lager- und Verflüssigungsstandorten eingegangen.

6.1.1 Ansätze der Standortplanung

Es gibt unterschiedliche Ansätze der Standortplanung. Eine Einteilung von Ansätzen der Standortplanung in der Literatur ist die Unterscheidung in innerbetriebliche, betriebliche sowie volkswirtschaftliche Standortplanung [DoDr96].

Der innerbetriebliche Ansatz befasst sich mit der optimalen Anordnung von Betriebsmitteln auf einem Betriebsgelände. Der betriebliche Ansatz dient der Findung neuer Standorte von Produktionsstätten eines Betriebes in Abhängigkeit von den bisherigen Betriebsstandorten. Die volkswirtschaftliche Standortplanung versucht die Ansiedlung der Unternehmen ganzer Wirtschaftssektoren zu analysieren, optimieren und koordinieren.

In der Literatur lässt sich daneben auch eine Unterteilung in die folgenden drei Ansätze ausmachen: normativ-neoklassizistische Ansätze, behavioristische Ansätze und strukturelle Ansätze [MaTö01].

Normativ-neoklassizistische Ansätze geben entsprechend einem Unternehmensziel vor, wie sich ein Unternehmen verhalten soll. Sie gehen dabei von Annahmen wie vollkommenen Märkten aus. Sie unterscheiden sich damit von den behavioristischen Ansätzen, die das tatsächliche Standortplanungsverhalten von Unternehmen in der Vergangenheit einbeziehen und damit andere unternehmensspezifische Ziele berücksichtigten [Pr72][Sch82]. Strukturelle Ansätze wählen einen überbetrieblichen Ansatz bei der Standortwahl. Das heißt einerseits, dass gesamtgesellschaftliche und gesamtwirtschaftliche Prozesse in die Standortentscheidung eingebunden werden [MaTö01][Sc82], dass aber andererseits die Freiheit der einzelnen Unternehmen im Kontext der Standortwahl als zu groß eingeschätzt wird [StWa83].

Die Einwände, aufgrund derer die normativ-neoklassizistischen Ansätze in der Kritik stehen, sind für diese Arbeit nicht gerechtfertigt. So führen Maier und Tödtling [MaTö01] an, es gäbe in der Praxis „einen starken Zusammenhang“ zwischen der Standortwahl und dem geographischen Aktionsraum („Wohnortentscheidung“, bisherige Standorte) des Unternehmers. Darüber hinaus stünden nicht alle Standortinformationen zur Verfügung oder müssten zunächst aufwändig beschafft werden. Da aber hier die Technologien der Bitumenkaltbehandlung an optimalen Standorten als Erweiterungen vorhandener Produktionsanlagen – oder anderer umfassend analysierter Netzknospunkte – installiert werden, ist diese Problemstellung bereits im Vorhinein hinsichtlich dieser Kritikpunkte eingeschränkt. Es kann daher ein Ansatz gewählt werden, der sich ausschließlich an einer Zielfunktion, der Minimierung der jährlichen Gesamtkosten, orientiert. Die Einschränkung des Lösungsraums unter den Einflüssen eventueller behavioristischer oder struktureller Ansätze erfolgt im Vorfeld.

Damit lässt sich die hier durchgeführte Standortwahl methodisch als betriebliche Standortwahl unter normativ-neoklassizistischen Ansätzen verstehen.

6.1.2 Kriterien der Standortentscheidung

Die Kriterien, die zur Standortwahl herangezogen werden, werden als „Standortfaktoren“ bezeichnet [En02]. Die Standortfaktoren werden in quantitative und qualitative Faktoren unterteilt [Be71][Zä89]. Sie unterscheiden sich jeweils in der Quantifizierbarkeit ihrer Auswirkung auf die Zielgrößen der Standortwahl und werden je nach Verfahren zur Unterstützung der Standortentscheidung eingesetzt. So werden bei „deskriptiven Ansätzen“ Listen mit allen Standortfaktoren und deren Ausprägungen aufgestellt, die von Interesse sind, und diese dann anschließend beispielsweise im Rahmen einer Nutzwertanalyse gemäß Hofmeister [Ho07] für die jeweiligen Standortoptionen ausgewertet [DoDr96]. Dabei können sowohl quantitative als auch qualitative Standortfaktoren herangezogen werden. Die Lösung ist dementsprechend nicht als optimale Lösung quantifizierbar. Als normative Ansätze der Standortwahl werden Methoden bezeichnet, bei denen eine Auswahl quantifizierbarer Standortfaktoren wie Grundstückskosten, Energiekosten und -steuern berücksichtigt werden [En02]. Unterschiedliche Arten von Modellen werden in diesem Abschnitt unter anderem vorgestellt. Hier seien zunächst einige Standortfaktoren in Anlehnung an Hansmann [Ha06] dargelegt.

6.1.2.1 Quantitative Standortfaktoren

Quantitative Standortfaktoren sind Eigenschaften eines möglichen Betriebsstandorts, deren Auswirkung auf den Unternehmenserfolg genau angegeben werden kann. Hierzu zählen laut Hansmann [Ha06] die

1. Transportkosten der Produkte vom Standort zu den Absatzmärkten,
2. Grundstückskosten,
3. Kosten der Errichtung der Gebäude,
4. Personalkosten,
5. Beschaffungskosten der Materialien,
6. standortabhängige Finanzierungskosten,
7. regionale Förderungsmaßnahmen der öffentlichen Hand, (Investitionszuschüsse, Sonderabschreibungen, Finanzierungshilfen)
8. Grund- und Gewerbesteuern (Hebelsätze!),
9. Gewinnsteuern (bei internationaler Betrachtung),
10. regionale Differenzierung der Absatzpreise.

Bei gründlicher Standortanalyse müssen alle diese Faktoren herangezogen werden, um eine wirtschaftlich sinnvolle Entscheidung zu treffen.

6.1.2.2 Qualitative Standortfaktoren

Alleine aufgrund quantitativer Standortfaktoren ist in der Praxis oft keine zufriedenstellende Standortentscheidung möglich, „weil die wirtschaftliche und gesellschaftliche Gesamtsituation des Unternehmens auch von nicht-quantifizierbaren Einflussgrößen abhängt“ [Ha06]. Es werden daher unter anderem bei Zäpfel [Zä89] weitere Faktoren aufgeführt. Hierzu zählen

1. das Grundstück (Lage, Form, Bebauungsvorschriften, Erweiterungsmöglichkeiten, Umweltauflagen etc.),
2. die Verkehrslage des Grundstücks (Verbindungen zum Personen- und Güterverkehrsnetz),
3. die Arbeitskräftebeschaffung (Bevölkerungsstruktur und Ausbildung, Arbeitskraftreserven, Konkurrenz auf dem Arbeitsmarkt),
4. der Absatzbereich (Kaufkraft der Region, Konkurrenzverhältnisse),
5. die allgemeine Infrastruktur des Standorts (Bahnverbindungen, Wohnraum, Bildungs- und Kultureinrichtungen, landschaftliche Lage, ärztliche Versorgung etc.).

Solche „weichen Standortfaktoren“ sind beispielsweise mittels heuristischer Verfahren in den Entscheidungsprozess integrierbar. Diese Vorgehensweise wird später in Abschnitt 6.3.2 am Beispiel der Vorauswahl von Standorten der Kalthandhabungstechnologien vorgestellt.

6.1.3 Typen von Standortproblemen

Die Unterscheidungsmöglichkeiten von Standortplanungsproblemen des OR seien gemäß Engels [En02] oder Klose [Kl01] kurz aufgeführt. So ist es möglich, die Standortplanungsprobleme, wie bei Hummeltenberg [Hu81] beziehungsweise Drezner und Hamacher [DrHa02], gemäß Form beziehungsweise Topographie möglicher Standorte in drei Gruppen zu unterteilen:

- Standortplanung in der Ebene
- Standortplanung in Netzen
- Warehouse-Location-Probleme (WLP)

Diese Modelltypen werden in den Unterabschnitten dieses Abschnitts näher dargestellt. Daneben ist die Art der Zielfunktion als mögliches Unterscheidungsmerkmal anwendbar. So gibt es beispielsweise Minisum-Probleme, bei denen die Summe der Distanzen minimiert wird, und Minimax-Probleme, bei denen die größten (maximalen) Distanzen minimiert werden. Daneben ist eine Unterteilung entsprechend der Kapazitätsausstattung der Standorte, also Standortprobleme mit unkapazitierten und kapazitierten Standorten, möglich. Es kann auch nach der Stufigkeit des Güterflusses als Merkmal von Standortproblemen unterschieden werden. Darüber hinaus ist eine Einteilung in Ein- oder Mehrproduktmodelle, in Probleme mit elastischer oder unelastischer Nachfrage, statischer oder dynamischer Periodizität oder deterministischer oder probabilistischer Datensicherheit möglich. Letztlich besteht noch die Möglichkeit, Standortprobleme nach der Relation zwischen Nachfrage und Angebotspunkt zu unterscheiden. So gibt es Probleme mit isolierter und Probleme mit kombinierter Standort- und Tourenplanung. Denn naturgemäß werden Lagerstandorte, Lagerkapazitäten und Lagerzeiträume oft mit den Stoffströmen optimiert. Nähere Erläuterungen zu den zuletzt genannten Unterscheidungsmöglichkeiten finden sich bei Klose (vgl. [KI01]).

6.1.3.1 Standortbestimmung in der Ebene

Bei der Standortbestimmung in der Ebene wird jeder Punkt auf der Landkarte als möglicher Standort betrachtet. Das heißt, dass das gesamte Gebiet, für das die Standortplanung durchgeführt wird, als homogene Ebene betrachtet wird, in der es gilt, eine optimale Standortlösung zu finden. Durch diese Abstraktion ist es beispielsweise möglich, ein kartesisches Koordinatensystem über die Ebene zu legen und dann, mittels verschiedener Berechnungsmethoden und Bezugnahme auf die Koordinaten bekannter Kunden- oder Lieferantenstandorte, den optimalen Standort zu finden [Ne94]. Dabei können je nach Aufgabenstellung die Summe der Transportstrecken oder die maximalen Transportstrecken minimiert werden. Hierzu können graphische oder geometrische (Satz des Pythagoras u.a.) Methoden oder analytische Iterationsverfahren sowie mechanische Analogmodelle eingesetzt werden, auf die hier nicht näher eingegangen wird und die bei Domschke und Drexel (vgl. [DoDr96]) vorgestellt werden.

Die Methoden der Standortplanung in der Ebene stehen dahingehend in der Kritik, dass sie von einem homogenen Lösungsraum ausgehen, also die Annahme getroffen wird, dass die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen jedes möglichen Betriebsstandorts gleich sind. In der Praxis gleicht – unabhängig von den Abständen zu den Bezugsstandorten – selten ein möglicher Standort dem anderen. Daher ist die Standortwahl ausschließlich auf

Grundlage von Transportwegen ohnehin unzureichend. Deshalb wird hier ein anderer Ansatz gewählt.

6.1.3.2 Standortbestimmung in Netzen

Bei der Standortbestimmung in Netzen wird der Lösungsraum auf festgelegte Punkte und deren Verbindungen diskretisiert. In einer abstrahierten Darstellung mit gerichteten (und gegebenenfalls auch ungerichteten) Graphen werden die Transportwege als deren direkte Verbindungsstrecken mit einer Bewertung versehen, die die jeweilige Entfernung oder die jeweiligen Kosten abbildet. In derselben Darstellung wird der Bedarf der Kunden durch eine Knotenbewertung repräsentiert. Das gewählte Lösungsverfahren hängt dann von der jeweiligen Problemstellung ab, auf deren Ausgestaltungsformen hier nicht näher eingegangen wird, da sie bei Domschke (vgl. [Do75][Do85]) und Fischer (vgl. [Fi97]) dargelegt werden.

In diesen Modellen muss die genaue Anzahl der zu ermittelnden Standorte vorher festgelegt werden, was die Findung einer optimalen Lösung gegebenenfalls stark einschränken kann. Aus diesem Grund kommen die Verfahren hier nicht zur Anwendung. Stattdessen kommt im Rahmen dieser Arbeit das im nächsten Unterabschnitt vorgestellte Bestimmungsverfahren mittels diskreter Standortwahl zum Einsatz.

6.1.3.3 Diskrete Standortwahl

Bei der diskreten Standortwahl können Standort-, Lager- und Transportoptimierungen simultan durchgeführt werden. Insbesondere können Kostenfunktionen und damit unter anderem Größendegressionseffekte berücksichtigt werden. Dadurch haben die Lösungsmodelle und damit die berechneten Ergebnisse eine höhere Realitätsnähe [En02].

Probleme, bei denen mehrere Größen zugleich optimiert werden, sind Warehouse-Location-, Plant-Location- oder Facility-Location-Probleme. Beim Warehouse-Location-Problem (WLP) findet eine Optimierung in mehreren Schritten hinsichtlich der oben genannten Teilprobleme statt, indem nach Lagerstandorten gesucht wird, die eine bestimmte Nachfrage unter minimalen Transportkosten decken. Die Formulierung eines WLP als Ausprägungsform der Probleme diskreter Standortwahl eignet sich daher für eine Integration neuer Lagertechnologien in die Logistikkette der Bitumenkalthandhabung. Es wird dabei ein sogenanntes mehrstufiges unkapazitiertes WLP formuliert. Mehrstufig ist das WLP, da für die gelagerten Mengen mindestens zwei Transportstufen

notwendig sind, unkapazitiert ist das WLP aufgrund der Tatsache, dass keine Kapazitätsgrenzen bei Abfüllung, Lagerung und Verflüssigung definiert werden. Im Abschnitt 6.3.2 dieser Arbeit wird das mehrstufige unkapazitierte WLP für die Integration von Technologien der Bitumenkalthandhabung als gemischt-ganzzahliges lineares Modell formuliert und in Abschnitt 6.5 implementiert und gelöst.

6.1.4 Stand der Standort- und Kapazitätsplanung von Technologien der Bitumenkalthandhabung

Im Bereich der neuen Technologien der Bitumenkalthandhabung sind bisher in Wissenschaft und Literatur in Deutschland nur wenige Veröffentlichungen lokalisierbar. Hierzu zählt [Wu11], in dem die Technologien einander gegenübergestellt werden. Es erfolgt eine Weiterentwicklung von Technologien der Kartonverpackung und der Mikrowellenverflüssigung sowie die thermodynamische Simulation konvektiver und konduktiver Verflüssigungsprozesse. In [SiWuZa11] werden die Eigenschaften von internationalen Bitumenversorgungsketten zur Technologieauswahl herangezogen. Die Auswahl erfolgt dann mit Hilfe einer Nutzwertanalyse gemäß Hofmeister [Ho07] zur Berechnung einer unter technischen Gesichtspunkten geeigneten Verpackungsvariante. Zwei Forschungs- und Entwicklungsberichte eines großen deutschen Asphaltproduzenten, in denen auf allgemeine Vorteile einer möglichen Bitumenkalthandhabung eingegangen wird, beschreiben auch Ansätze, diese mit den Methoden, welche sich in den genannten Veröffentlichungen wiederfinden, zu quantifizieren [StZü11][StZü12]. Auch im internationalen Umfeld sind nur wenige Überlegungen hinter der jeweiligen Standort-, Kapazitäten- und Technologieauswahl für Technologien der Bitumenkalthandhabung öffentlich dargelegt worden. Hierzu zählt [WuHiStSch12]. Hier wird erstmals mittels eines einfachen Optimierungsmodells die Gesamtkostenreduktion einer Bitumenversorgungskette durch Bitumenkalthandhabung berechnet. In [WuSk13] werden in Anlehnung an [SiWuZa11] die Methoden der Technologieauswahl weiterentwickelt und zusammenfassend dargestellt.

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen, die sich mit der Standort- und Kapazitätsplanung anderer Technologien beschäftigen. So hat Koch die Standortwahl von Co-Vergärungsanlagen im Kontext ihrer ökologischen und ökonomischen Bewertung durchgeführt [Ko09]. Kerdoncuff führte Arbeiten zur Energie- und Stoffbilanzierung einer Prozesskette zur Pyrolyse von Biomasse mit anschließender Vergasung, Gasreinigung und -konditionierung durch sowie Fischer-Tropsch-Synthese zur Kraftstoffproduktion [Ke08]. In sei-

nem Modell zur kostenminimalen Standortwahl wird die Versorgungskette zweier Biomassearten eines Zwischen- und eines Endprodukts abgebildet. Hammerschmid beschäftigte sich mit der Standortplanung von Recyclinganlagen. Die Fixkosten der Anlage sind in den von der Anlagengröße abhängigen Kosten enthalten. Hierbei werden Kapazitätsklassen für jeden Kapazitätsbereich festgelegt [Ha90]. Ein ähnliches Vorgehen findet sich bei Püchert und Schultmann et. al. In beiden Arbeiten werden sowohl variable als auch fixe Kosten in Abhängigkeit zur Kapazität gesetzt [Pü95][Sch03]. Bei Püchert wird ein Modell zur Verwertung metallurgischer Kuppelprodukte als gemischt-ganzzahliges lineares Problem formuliert. Hierbei findet die Berechnung optimaler Standorte auf verschiedenen Distributionsstufen statt. Das Modell berücksichtigt dabei auch die Rohstoffe und wählt Technologien [Pü95]. Rausch berechnet mit seinem Modell Standorte für die Automobilindustrie. Er bedient sich ebenfalls kapazitätsabhängiger Kostenfunktionen, welche sowohl variable als auch fixe Kosten beinhalten. Minimalkapazitäten sind hierbei nicht vorgegeben [Ra06].

Schwaderer hat ebenso eine Berechnung von Technologien, Standorten und Kapazitäten mittels eines gemischt-ganzzahligen linearen Planungsmodells für Biomasse durchgeführt. Er erstellt ein zweistufiges Modell mit einstufiger Standortwahl und berücksichtigt hierbei – hinsichtlich ihrer Eigenschaften (Eigenfeuchte etc.) – mehrere Rohstoffe und Zwischenprodukte mit Stoffumwandlungsprozessen (Hydrolyse, chemische Umwandlung etc.). In dem Modell zur Minimierung der Kosten wird eine Maximal- sowie eine Minimalkapazität der Anlagen berücksichtigt. Mit Hilfe des Modells findet eine Auswahl von Technologien statt. Schwaderer hat eine umfassende Übersicht über die existierende Literatur zur Standort- und Kapazitätsplanung erstellt, welche in Tabelle 6-1 wiedergegeben wird (vgl. [Sch12]).

Tabelle 6-1: Charakteristika integrierter Standort- und Kapazitätsplanungsmodelle gemäß [Sch12]

Modell	Jahr	Referenz	Stufen gesamt	Stufen Standortwahl	Mehrere (R)ohstoffe, (Z)wischen-/ (P)rodukte	Stoffumwandlung	Maximalkapazität	Minimalkapazität	Ziel-funktion	Technologieplanung
Kuehn und Hamburger	1963	[KuHa63]	2	1			✓		Kosten	
Feldmann et al.	1966	[Fe66]	1	1					Kosten	
Efroymson und Ray	1966	[EfrY66]	1	1			✓		Kosten	
Soland	1974	[So74]	1	1			✓	✓	Kosten	
Geoffrion und Graves	1974	[GeGr74]	2	1	P		✓		Kosten	
Kelly und Khumawala	1982	[KeKh82]	1	1					Kosten	
Whitaker	1985	[Wh85]	1	1			✓	✓	Kosten	
Brown et al.	1987	[Br87]	2	1	P		✓	✓	Kosten	✓
Moon	1989	[Mo89]	2	1	P		✓		Kosten	
Eppen et al.	1989	[Ep89]	1	1	P		✓	✓	Gewinn	
Hammerschmid	1990	[Ha90]	2	1	Z	✓ ²	✓		Kosten	✓
Cohen und Moon	1991	[CoMo91]	2	0	P		✓		Kosten	
Lee	1991	[Le91]	1	1	P		✓		Kosten	✓
Schulmann	1991	[Sh91]	1	1			✓		Ausz.	
Narasimhan und Pirkul	1992	[NaPi92]	2	2			✓		Kosten	
Verter und Dincer	1995	[VeDi95]	1	1			✓	✓	Kosten	
Püchert	1995	[Pü95]	n	n	RZP	✓	✓	✓	Kosten	✓
Sankaran und Raghavan	1997	[SaRa97]	1	1			✓		Kosten	
Dogan und Goetschalckx	1999	[DoGo99]	3	2	P		✓		Kosten	✓
Mazzola und Neebe	1999	[MaNe99]	1	1	P		✓		Kosten	
Melachrinoudis und Min	2000	[MeMi00]	1	1			✓		Gewinn	
Verter und Dasci	2002	[VeDa02]	1	1	P				Kosten	✓
Schultmann et al.	2003	[Sch03]	2	1	Z		✓	✓	Kosten	
Paquet et al.	2004	[Pa04]	n	n	RZP	✓ ³	✓		Kosten	✓
Melo et al.	2005	[Me05]	n	n	P		✓	✓	Kosten	
Aghezzaf	2005	[Ag05]	2	2			✓		Kosten	
Martel	2005	[Ma05]	n	n	RZP	✓ ³	✓	✓	Kosten	✓
Guillén et al.	2005	[Gu05]	2	2	P		✓	✓	NPV	
Hugo und Pistikopoulos	2005	[HuPi05]	2	1	RP	✓	✓	✓	NPV	✓
Shen	2005	[Sh05]	2	1	P				Kosten	
Jacob	2005	[Ja05]	n	n	ZP	✓ ³			NPV	✓
Amiri	2006	[Am06]	2	2			✓		Kosten	
Ulstein et al.	2006	[UI06]	1	1	P				Kosten	
Vila et al.	2006	[Vi06]	n	n	RZP	✓ ³	✓		Kosten	✓
Rausch	2006	[Ra06]	2	1			✓		Kosten	
Ko und Evans	2007	[KoEv07]	2	1	P		✓		Kosten	
Lieckens und Vandaele	2007	[LiVa07]	2	1			✓		Kosten	
Hübner	2007	[Hü07]	n	n	RZP	✓	✓	✓	Kosten	✓
Dupont	2008	[Du08]	1	1	P		✓	✓	Kosten	
Wollenweber	2008	[Wo08]	n	n			✓		Kosten	
Guillén-Gosálbez et al.	2009	[Gu09]	2	2	P		(✓) ⁵	✓ ⁵	NPV	✓

In Tabelle 6-1 haben die Indices die folgende Bedeutung:

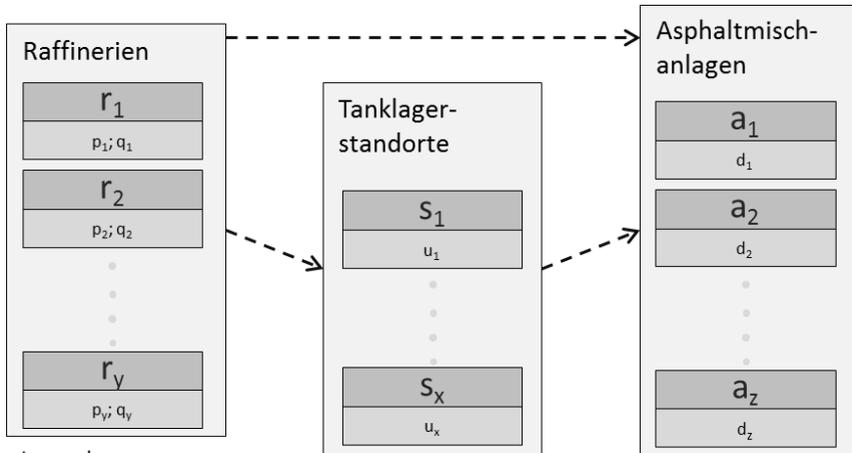
- 1: Nur vorgeschlagen
- 2: Bei Lösung nicht berücksichtigt
- 3: Modell der Fertigungsindustrie, Abbildung von Stoffumwandlung möglich
- 4: Keine Minimalkapazität, d.h. keine unteren Grenzen der Kapazitätssegmente
- 5: Nur die Erweiterung der Kapazitäten in jeder Periode ist beschränkt. Keine minimale Auslastung gefordert

6.2 Graphische Darstellung der Bitumenversorgungsketten

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden die theoretischen Grundlagen zur Entwicklung eines Optimierungsmodells hinsichtlich der Technologieintegration in die bestehende Bitumenversorgungskette dargelegt. Hier wird damit begonnen, den prinzipiellen Aufbau des Modells grundlegend zu beschreiben. Zur strukturierten formalen Darstellung der derzeitigen und der geplanten Bitumenversorgungsketten bietet sich die Graphentheorie an [En02], denn aus graphentheoretischen Darstellungen von Standortproblemen lassen sich effiziente Lösungsverfahren ableiten [Hu81]. Eine solche Möglichkeit ist die Darstellung als Digraph. Dieser Digraph kann gemäß der Definition von Hummeltenberg auch als Netzwerk bezeichnet werden [Hu81] und bildet die Bitumenversorgungskette schematisch ab. Die Knoten repräsentieren verschiedene Anlagentypen, die Kanten repräsentieren die jeweiligen Stoffströme, wobei die Kantenbewertungen die distribuierten Bitumenmengen einer Periode angeben. Im Folgenden sind die Graphen, die sich aus der gewählten Darstellungsform für die Bitumenlogistik ergeben, kurz dargestellt.

6.2.1 Derzeitige Bitumenversorgungskette

Derzeit wird das Bitumen für die Asphaltproduktion aus verschiedenen Raffinerien entweder zu einem großen Teil direkt in die Asphaltmischanlagen geliefert oder zu einem geringeren Anteil zur Zwischenlagerung in Tanklager gebracht. Von den Tanklagern aus werden dann unter bestimmten Voraussetzungen die Asphaltmischanlagen beliefert.



Legende:

- r_i Raffinerie ohne Abkühlager $i; i \in \{1, 2, \dots, y\}$
- s_j Tanklager/Heißlager $j; j \in \{1, 2, \dots, x\}$
- a_k Asphaltmischanlage ohne Wiederverflüssigung $k; k \in \{1, 2, \dots, z\}$
- p_{r_i} Bitumenpreis in r_i in Euro
- q_{r_i} Angebotsmenge in r_i in Tonnen
- u_{s_j} Lagerkapazität in s_j in Tonnen
- d_{z_k} Nachfragemenge in a_k in Tonnen
- $--- \rightarrow$ Heißbitumen

Abbildung 23: Derzeitige Bitumenlogistik für die Asphaltproduktion in einer Periode als Digraph

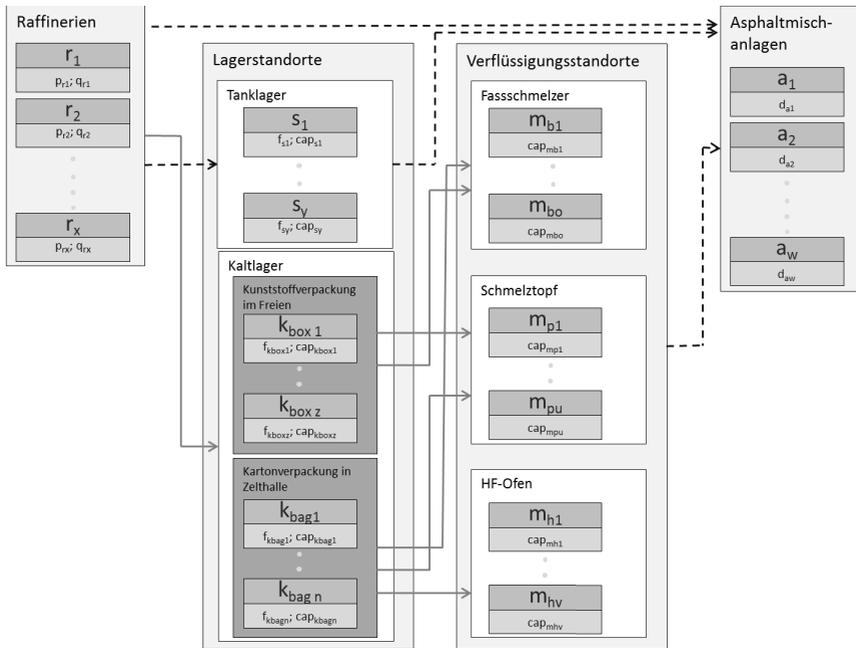
Alle Transporte sind, wie in Abbildung 23 als gestrichelte Linien dargestellt, Heißtransporte. Es gibt keine Technologien der Kaltlagerung oder Wiederverflüssigung. Die Eigenschaften der Standorte wie Preis $p_{r_i} i \in \{1, 2, \dots, y\}$ und Angebot $q_{r_i} i \in \{1, 2, \dots, y\}$, Lagerkapazität $u_{s_j} j \in \{1, 2\}$ und Nachfrage $d_{z_k} k \in \{1, 2, \dots, z\}$ sind hier zusätzlich dargestellt.

Die Menge der europaweit verteilten Raffinerien, die den deutschen Markt mit Bitumen beliefern, kann sich in der jeweiligen Periode verändern. Jede Raffinerie r_i hat eine beschränkte Lieferkapazität $q_{r_i} i \in \{1, 2, \dots, y\}$.

Jedes der Tanklager s_j hat eine maximale Lagerkapazität $u_{s_j} j \in \{1, 2, \dots, x\}$. Jede der Asphaltmischanlagen a_k hat einen bestimmten Bedarf $d_{z_k} k \in \{1, 2, \dots, z\}$.

6.2.2 Die zu implementierende Versorgungskette

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, ob die Gesamtkosten reduziert werden können, indem man sich Technologien der Kaltlagerung und Wiederverflüssigung bedient. Der in Abbildung 24 dargestellte Digraph zeigt, wie hierfür zunächst weitere Transport- und Lageroptionen geschaffen werden. Hierauf aufbauend kann untersucht werden, inwieweit durch die niedrigeren Lager- und Transportkosten der Bitumenkalthandhabung eine Reduktion der periodischen Gesamtkosten möglich wird.



- p_r Preis in Raffinerie r in Euro $r \in \{r_1, \dots, r_x\}$
 q_r Angebot in Raffinerie r in Tonnen $r \in \{r_1, \dots, r_x\}$
 f_s Lagermenge im Tanklager s $s \in \{s_1, \dots, s_y\}$
 $f_{k_{box}}$ Lagermenge im Kaltlager k_{box} in Tonnen $k_{box} \in \{k_{box 1}, \dots, k_{box z}\}$
 $f_{k_{bag}}$ Lagermenge im Kaltlager k_{bag} in Tonnen $k_{bag} \in \{k_{bag 1}, \dots, k_{bag n}\}$
 cap_s Lagerkapazität im Tanklager $s \in \{s_1, \dots, s_y\}$
 $cap_{k_{box}}$ Lagerkapazität im Kaltlager k_{box} in Tonnen $k_{box} \in \{k_{box 1}, \dots, k_{box z}\}$
 $cap_{k_{bag}}$ Lagerkapazität im Kaltlager k_{bag} in Tonnen $k_{bag} \in \{k_{bag 1}, \dots, k_{bag n}\}$
 d_a Bedarf in Asphaltmischanlage a in Tonnen $a \in \{a_1, \dots, a_w\}$
 $cap_{m_{b1}}$ Verflüssigungskapazität am Standort m_b in Tonnen $m_b \in \{m_{b1}, \dots, m_{bo}\}$
 $cap_{m_{p1}}$ Verflüssigungskapazität am Standort m_p in Tonnen $m_p \in \{m_{p1}, \dots, m_{pu}\}$
 $cap_{m_{h1}}$ Verflüssigungskapazität am Standort m_h in Tonnen $m_h \in \{m_{h1}, \dots, m_{hv}\}$
 - - -> Heißbitumen
 —> Kaltbitumen

Abbildung 24: Potentielle Bitumenlogistik für die Asphaltproduktion als Digraph

$q_{r_i} \ i \in \{1, 2, \dots, x\}$ bezeichnet die Angebotsmenge, $f_{s_j} \ j \in \{1, 2, \dots, y\}$, $f_{k_{box_l}} \ l \in \{1, 2, \dots, z\}$,
 $f_{k_{bag_t}} \ t \in \{1, 2, \dots, n\}$ bezeichnen die Lagermengen, $cap_{s_j} \ j \in \{1, 2, \dots, y\}$,

$cap_{k_{boxl}} l \in \{1, 2, \dots, z\}$, $cap_{k_{bagt}} t \in \{1, 2, \dots, n\}$ die Lagerkapazitäten der jeweiligen Lager, $cap_{m_{bc}} c \in \{1, 2, \dots, o\}$, $cap_{m_{pe}} e \in \{1, 2, \dots, u\}$, $cap_{m_{hn}} n \in \{1, 2, \dots, v\}$ die Verflüssigungskapazität, $p_{fi} i \in \{1, 2, \dots, x\}$ den Bitumenpreis in der jeweiligen Raffinerie und $d_{ok} k \in \{1, 2, \dots, w\}$ die Nachfrage der jeweiligen Asphaltproduktionsstätte.

6.3 Beschreibung des Modells

Zur Entwicklung des formalen Planungsmodells zur optimalen Integration neuer Technologien in die vorhandene Bitumenlogistik eines Unternehmens müssen zunächst Modellanforderungen formuliert und Lösungsräume beschrieben werden. Im Folgenden werden daher in Abschnitt 6.3.1 Ziele, Anforderungen und Datensätze für das zu erstellende Planungsmodell festgelegt. Daraufhin wird in Abschnitt 6.3.2 die Vorgehensweise beschrieben, um die möglichen Standorte für die Standortbestimmung festzulegen.

6.3.1 Anforderungsprofil des Planungsmodells

Im Bereich der Standortplanung ist die Ausgestaltung des Modells von der untersuchten Fragestellung abhängig [En02]. Die Fragestellung wird hier beschrieben, indem in Unterabschnitt 6.3.1.1 eine Liste von Modellanforderungen aufgestellt wird. Anschließend wird hieraus das konkrete Anforderungsprofil zur Lösung der Problemstellung in Unterabschnitt 6.3.1.2 erzeugt.

6.3.1.1 Anforderungen an das Modell

Die Anforderungen an das Modell sind im Folgenden genannt.

- 1) Das Modell soll Logistikkonzepte identifizieren, die zur Minimierung der zukünftigen jährlichen Gesamtkosten in der Bitumenlogistik eines Unternehmens unter Deckung der Nachfrage dienen.
- 2) Mit dem Modell soll die optimale Standortwahl von neuen Technologien der Bitumenkalthandhabung wie Abfüll-, Lager- und Verflüssigungsanlagen durchgeführt werden.
- 3) Im Zuge dieser Standortplanung gemäß 2) sollen die Konfiguration, die Anzahl und die Kapazität von Lagern und Verflüssigungsanlagen bestimmt werden.

- 4) Die mit der Bitumenlogistik einhergehenden Transportwege und Lagerkosten sollen mit dem Modell nach Minimierung der Gesamtkosten gemäß 1) reduziert werden.
- 5) Mit dem Modell soll die optimale Auswahl von Technologien der Lagerung und Wiederverflüssigung von Bitumen, bezogen auf die jeweils zugrunde liegenden Modelldaten und Randbedingungen eines Unternehmens, möglich werden.
- 6) Im Zuge der Auswahl einzelner Technologien gemäß 5) soll die optimale Technologiekombination für die Versorgungskette eines Unternehmens ermittelt werden.
- 7) Das Modell soll es ermöglichen, die potentielle Kostenreduktion, die durch die Anwendung neuer Technologien ermöglicht wird, vorab abzuschätzen.
- 8) Die Berechnungsergebnisse des Modells sollen die wirtschaftlichen und technischen Gegebenheiten eines Referenzunternehmens widerspiegeln, das Modell selbst hingegen eine den Anforderungen 1) bis 8) gemäße Allgemeingültigkeit und damit Übertragbarkeit auf andere Unternehmen besitzen.

6.3.1.2 Anforderungen bei der Modellformulierung

Unter anderem aus den im letzten Abschnitt genannten Zielen bei der Modellentwicklung ergeben sich die im Folgenden genannten Anforderungen an das Planungsmodell.

- 1) Die Nachfrage der modellierten Asphaltmischanlagen muss gedeckt werden.
- 2) Die modellierten Bitumenlieferungen aus den Raffinerien dürfen deren tatsächliche Produktionsmenge nicht übersteigen.
- 3) Die berechneten periodischen Lagermengen jedes Lagers bestimmen sich aus den Ein- und Ausgängen sowie den Anfangsbeständen der Vorperiode.
- 4) Es müssen sowohl historische als auch fiktive Bitumenpreisszenarien heranziehbar sein, die auch die räumliche Inhomogenität der Bitumenpreise mitberücksichtigen.
- 5) Es müssen jeweils Jahreszeiträume mit einer realitätsnahen zeitlichen Auflösung der Produktionsmengen und Bitumenpreise modelliert werden.
- 6) Es muss die Option bestehen, die Gesamtkosten sowohl durch den Neubau von Heiß- als auch Kaltlagern im Modell zu senken, da größere Lager-

kapazitäten auch in der Praxis den Kauf größerer Bitumenmengen in Niedrigpreisphasen ermöglichen.

- 7) Die investitionsabhängigen Kostenarten werden auf den jeweiligen Jahreszeitraum bezogen, um sie mit den jeweiligen Jahrespreisschwankungen vergleichbar zu machen.
- 8) Die Kostenfunktionen beider Lagerarten müssen verursachungsgerecht (pro Tonne, pro Tonne und Monat, pro Standort oder pro Kapazitätseinheit, vgl. Tabelle 5-3) in das Modell integriert werden.
- 9) Berechnete Transport- und Lagermengen dürfen nicht negativ sein.
- 10) Heißbitumen für die Lagerung kann nur in Heißlager und kaltes Bitumen nur in Kaltlager transportiert werden.
- 11) Die Belieferung der Asphaltmischanlagen im Berechnungsergebnis erfolgt nur dann aus den modellierten Lagern, wenn entweder die Bitumenpreise in dem modellierten Jahr ausreichend stark gestiegen sind oder die modellierten Raffinerien die Nachfrage in der jeweiligen Periode nicht decken können oder die Lager zur Reduzierung der Lagerkosten geleert werden müssen.
- 12) Die Lagerkapazität (in Tonnen) bestimmt sich anhand der Lagermenge der Lagerperiode (Monat) mit maximalem Lagerbestand (in Tonnen) eines modellierten Jahrs.
- 13) Das Modell soll auch auf verschiedene Unternehmen und Bitumenversorgungsketten anwendbar sein, wenn die Datengrundlage verändert wird.
- 14) Das Modell soll die allgemein gültigen Kombinierbarkeiten der Technologien der Bitumenkalthandhabung gemäß Tabelle 4-2 berücksichtigen.

6.3.1.3 Berücksichtigte Datensätze

Es werden folgende Daten benötigt und berücksichtigt:

- 1) Die derzeitigen und potentiellen Standorte aller Anlagentypen (Raffinerien, Heiß- und Kaltlager, Asphaltmischanlagen).
- 2) Alle Transportdistanzen zwischen den bisherigen und potentiellen Standorten aller betroffenen Anlagentypen (Raffinerien, Heiß- und Kaltlager, Asphaltmischanlagen).
- 3) Durchschnittlicher periodischer (hier monatlicher¹⁹) Bitumenbedarf jeder Asphaltmischanlage.
- 4) Maximale Bitumenproduktionsmenge der Raffinerien.

- 5) Die jeweiligen periodischen (hier monatlichen¹⁹) Raffineriepreise für Bitumen der Jahre 2007 bis 2010.
- 6) Mittlere Transportkosten.
- 7) Kostenfunktionen der Lagerkosten in Euro in Abhängigkeit der Bitumenmengen in Tonnen.
- 8) Alle Kosten, die bei der Verwendung der betriebenen technischen Vorrichtungen anfallen.

Da sich die Anzahl der Asphaltmischanlagen ständig ändert, wird unabhängig von den Daten aus historisch basierten Preisszenarien immer der aktuelle Bedarf der derzeit existierenden Asphaltmischanlagen (2011) zugrunde gelegt. Die genannten Datensätze werden – abgesehen von den Bezeichnungen der Standorte – anonymisiert.

6.3.2 Der diskrete Lösungsraum

Im Modell gibt es zwei Kaltlagerarten. Es ist möglich, Bitumen in Kartons in Zelthallen oder in Kunststoffgebinden unter Witterungseinflüssen zu lagern. Wie bereits in Tabelle 4-2 dargestellt, ist es aufgrund unzureichender Erfahrungswerte nicht möglich, einen Mikrowellenofen mit Kunststoffgebinden zu beschicken. Fässer werden aufgrund ihrer hohen Kosten für Verpackungsmaterial nicht betrachtet (vgl. Unterabschnitt 5.3.1). In Unterabschnitt 6.3.2.1 wird zunächst beschrieben, wie mittels heuristischer Verfahren eine Vorauswahl potentieller Standorte erfolgt. In Unterabschnitt 6.3.2.2 werden weitere Einschränkungen beschrieben.

6.3.2.1 Analyse der Standorte

Die Ermittlung einer Menge potentieller Standorte für das Modell ist schwierig, da nicht alle betrachteten Standortinformationen verfügbar sind. Es handelt sich damit um ein klassisches Problem, das mittels heuristischer Verfahren²⁰

¹⁹ Es wird eine zeitliche Auflösung in Monatsschritten gewählt, da dies der höchsten Auflösung der verfügbaren Daten entspricht. Dies ist insofern gerechtfertigt, als dass sich die Bitumenpreise zumeist während eines Monats nicht ändern.

²⁰ Heuristische Verfahren werden hier gemäß Gigerenzer und Todd als Verfahren definiert, mit deren Hilfe man mit begrenztem Wissen zu guten Lösungen kommt (vgl. [GiTo99]).

untersucht werden kann, indem versucht wird, trotz unzureichender Informationsgrundlage eine befriedigende – nicht zwangsläufig optimale [HiKu70] – Lösung zu finden. Nach Beier (vgl. [Be73]) wird mittels heuristischer Entscheidungsmethoden unter anderem versucht, die Komplexität des zu lösenden Problems zu vermindern, mit dem Ziel, mit der bestehenden Rechenkapazität in einem vorgegebenen Zeitraum zu einer Lösung zu kommen. Hansmann (vgl. [Ha06]) schlägt für die Standortplanung zwei heuristische Verfahren vor, von denen eines hier angewendet wird. Dabei wird von n potentiellen Standorten S_i ($i = 1, \dots, n$) und m Standortfaktoren SF_j ($j = 1, \dots, m$) ausgegangen [Ha06]. Die Standortfaktoren sind unterschiedlich, gemäß ihrer Bedeutung für den Planungsfall, mit g_j gewichtet. Jeder Standort wird dann auf einer Punkteskala von 1 (schlecht) bis 10 (sehr gut) hinsichtlich der Standortfaktoren bewertet [Ha06]. r_{ij} ist die Bewertung des Standorts S_i hinsichtlich des Standortfaktors SF_j . Die Bewertung erfolgt bei qualitativen Standortfaktoren subjektiv und bei quantitativen Standortfaktoren mittels einer Skalierung zwischen dem „schlechtesten“ und dem „besten“ Fall. Anschließend wird für jeden Standort und Standortfaktor das Gewicht g_j mit dem Punktwert multipliziert [Ha06].

$$R_{ij} = r_{ij} \cdot g_j \quad 6-1$$

Werden die R_{ij} eines Standortes aufsummiert, so erhält man die Standortbewertungsziffer Z_i .

$$Z_i = \sum_j R_{ij} \quad 6-2$$

Ein Sonderfall liegt vor, wenn ein Standort gemäß einem Standortfaktor nicht bewertet werden kann, da keine entsprechenden Daten verfügbar sind [Ha06] oder wenn ein qualitatives Kriterium nicht erfüllt ist (Bsp.: kein ausreichender Platz auf der Anlage vorhanden). In diesem Fall wird der Standort aus der Menge potentieller Standorte herausgenommen. In den so begrenzten Lösungsraum kommen nur die Standorte, bei denen alle betrachteten Daten bekannt sind und die eine ausreichend hohe Standortbewertungsziffer erreichen.

Die berücksichtigten Standortinformationen mit der jeweiligen Gewichtung, die im Vorfeld der Erzeugung des hier verwendeten Modells (Abschnitt 6.4) zur Anwendung kommen, sind in Tabelle 6-2 dargestellt.

Tabelle 6-2: Standortfaktoren mit ihren jeweiligen Gewichtungen für die Standortanalyse zur Bestimmung des Lösungsraums hinsichtlich Kaltlagerstandorten und Schmelzanlagenstandorten

	Standortfaktoren	Gewichtung g_j Lager	Gewichtung g_j Schmelze
Quantitativ	Energiepreis	0,1	0,3
	Grundstückspreis	0,3	0,1
Qualitativ	Verkehrsanbindung	0,2	0,2
	Platz auf der Anlage	0,2	0,1
	Platz neben der Anlage	0,1	0,1
	Räumliche Integrierbarkeit	0,1	0,2

Den beiden quantitativen Standortfaktoren wird, da ihnen objektiv ermittelte Daten zugrunde liegen, eine leicht überdurchschnittliche Gewichtung von insgesamt 0,4 zugeordnet. Hierbei ist bei der platzintensiven Lagerung der Grundstückspreis und bei der energieintensiven Verflüssigung der Energiepreis jeweils überdurchschnittlich mit 0,3 gewichtet. Die Verkehrsanbindung hat zentrale Bedeutung für das geplante Modell, dessen Zielfunktion unter anderem die Verringerung der Transportkosten (unter Deckung der Nachfrage und Ausnutzung von räumlichen und zeitlichen Bitumenpreisschwankungen) beinhaltet. Daher wird dieser Standortfaktor jeweils mit 0,2 verhältnismäßig stark gewichtet. Die „räumlichen“ Standortfaktoren werden zumeist mit 0,1 gewichtet, bei Kaltlagern wird allerdings der „Platz auf der Anlage“ und bei Verflüssigungsstandorten die „räumliche Integrierbarkeit“ mit jeweils 0,2 gewichtet.

6.3.2.2 Weitere Eingrenzung der Problemstellung

Es wird außerdem davon ausgegangen, dass die Abfüllung aus Kostengründen direkt an den Raffineriestandorten stattfindet, wodurch in diesem Teil der Versorgungsketten nur Kalttransporte zu den Lagern anfallen. Obwohl keine separate Standortoptimierung für die Abfüllanlagen stattfindet, da diese sich direkt an den Raffinerien befinden, werden die Kosten, die im Kontext dieser Technologieanwendung anfallen können, mitberücksichtigt.

Abbildung 24 nimmt keinen Bezug auf eine bestimmte Vorauswahl an Raffinerien und Asphaltmischanlagen, die für die Optimierung herangezogen werden können. Hier wird die Anzahl der Raffinerien im In- und Ausland für das Modell auf zwölf Anlagen beschränkt. Diese Vorauswahl erfolgt bei der Anwendung des Modells auf den deutschen Markt. Die maximalen jährlichen Liefermengen q_j dieser Anlagen sind bekannt und variieren kaum.

Auf Bedarfsseite werden die Asphaltmischanlagen betrachtet, die sich zu 100 % im Unternehmensbesitz befinden. Die voraussichtlich geringere tatsächliche Anzahl der Lagerstandorte und ihre Kapazitäten zu bestimmen, ist ebenso wie die Bestimmung der Anzahl, Lage und Kapazitäten der Verflüssigungsstandorte eine Teilaufgabe des Planungsmodells. Die periodischen Bedarfsmengen d_a der gewählten Asphaltmischanlagen müssen bekannt sein. Als mögliche Heißlagerstandorte werden Standorte eines Tanklagerbetreibers zu den bestehenden Tanklagerstandorten hinzugefügt.

6.4 Formulierung des Modells

Auf Basis der Anforderungen, die im vorhergehenden Abschnitt formuliert werden, und der Beschreibung als Digraph (Abbildung 24) wird in diesem Abschnitt die formale Modellentwicklung vorgenommen. Ein Planungsmodell zur Integration neuer Technologien der Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette eines Unternehmens wird hierfür als unkapazitiertes Warehouse Location Problem mit unelastischer²¹ Nachfrage formuliert. Das Modell dient gemäß seiner Zielfunktion der Minimierung der jährlichen Gesamtkosten unter Deckung der Nachfrage. Optimierungspotentiale liegen teilweise in der Ausnutzung von räumlichen und zeitlichen Inhomogenitäten im Bitumenpreis und der Reduzierung der Lagerkosten (gegenüber Heißlagerung), aber auch in der Reduktion der Transportkosten. In Unterabschnitt 6.4.1 werden die benötigten Modellkonventionen vorgestellt. Anschließend wird in Unterabschnitt 6.4.2 die ökonomische Zielfunktion des Modells formuliert. Schließlich werden in 6.4.3 die Nebenbedingungen des Modells beschrieben.

6.4.1 Modellkonventionen

Zur Beschreibung des Modells wird vorab definiert: $a \in A$, $r \in R$, $r_{bag} \in R$, $r_{box} \in R$, $s \in S$, $t \in T$, $k_{box} \in K_{box}$, $k_{bag} \in K_{bag}$, $m_b \in M_b$, $m_p \in M_p$, $m_h \in M_h$.

6.4.1.1 Indexmengen

Es ergeben sich die folgenden Indexmengen, die teilweise untereinander Beziehungen in Form von Teilmengen haben können.

²¹ Das Problem wird als unelastisch bezeichnet, da die Nachfrage nicht abhängig von den berechneten Standorten, Kapazitäten, Technologien oder Kosten ist.

R	Indexmenge der Raffinerien (existierende Standorte mit vorgegebenem Bitumenpreis s.u.) und damit auch der Abfüllstandorte
A	Indexmenge der Asphaltmischanlagen (existierende Standorte mit vorgegebenem Bedarf s.u.)
S	Indexmenge der Tanklager (Lösungsraum der Standortwahl)
T	Indexmenge der Perioden (Monate)

Die folgenden Indexmengen repräsentieren Lösungsräume der Standortwahl. Sie sind damit Teilmengen von A .

K_{bag}	Indexmenge möglicher Standorte von Kaltlagern für Kunststoffgebinde
K_{box}	Indexmenge möglicher Standorte von Kaltlagern für Kartongebinde
M_b	Indexmenge möglicher Standorte von Verflüssigungsanlagen in Form von Fassschmelzern
M_p	Indexmenge möglicher Standorte von Verflüssigungsanlagen in Form von Schmelztöpfen
M_h	Indexmenge möglicher Standorte von Verflüssigungsanlagen in Form von Mikrowellenöfen

Die Unterscheidung der Mengen K_{bag} und K_{box} und die Mengen M_b , M_p und M_h ermöglicht es, die Standorte hinsichtlich ihrer Eignung für einzelne Technologien weiter zu differenzieren. Es bleibt dem Anwender des Modells überlassen, durch unterschiedliche Gewichtung der Standortfaktoren (beispielsweise eine höhere Gewichtung der Stromkosten bei potentiellen Standorten für Mikrowellenöfen) auch innerhalb der Lösungsräume für Lager und Verflüssigungsstandorte zu unterscheiden.

6.4.1.2 Entscheidungsvariablen

Die Entscheidungsvariablen lauten

- X_{rat} Bitumenmenge, die heißflüssig von Raffinerie r zur Asphaltmischanlage a in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{rat} \in \mathbb{R}^+$).
- X_{rst} Bitumenmenge, die heißflüssig von Raffinerie r zum Tanklager s in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{rst} \in \mathbb{R}^+$).
- X_{sat} Bitumenmenge, die heißflüssig vom Tanklager s zur Asphaltmischanlage a in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{sat} \in \mathbb{R}^+$).
- $X_{r\ k_{bag}t}$ Bitumenmenge, die kalt vom Abfüllstandort r zum Kaltlager für Kunststoffgebände k_{bag} in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{rk_{bag}t} \in \mathbb{R}^+$).
- $X_{r\ k_{box}t}$ Bitumenmenge, die kalt von der Raffinerie mit Abfüllvorrichtung r zum Kaltlager für Kartongebände k_{box} in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{rk_{box}t} \in \mathbb{R}^+$).
- $X_{k_{bag}m_b t}$ Bitumenmenge, die kalt vom Kaltlager für Kunststoffgebände k_{bag} zum Verflüssigungsstandort mit Fassschmelzer m_b in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{k_{bag}m_b t} \in \mathbb{R}^+$).
- $X_{k_{bag}m_p t}$ Bitumenmenge, die kalt vom Kaltlager für Kunststoffgebände k_{bag} zum Verflüssigungsstandort mit Schmelztopf m_p in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{k_{bag}m_p t} \in \mathbb{R}^+$).
- $X_{k_{box}m_b t}$ Bitumenmenge, die kalt vom Kaltlager für Kartongebände k_{box} zum Verflüssigungsstandort mit Fassschmelzer m_b in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{k_{box}m_b t} \in \mathbb{R}^+$).
- $X_{k_{box}m_p t}$ Bitumenmenge, die kalt vom Kaltlager für Kartongebände k_{box} zum Verflüssigungsstandort mit Schmelztopf m_p in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{k_{box}m_p t} \in \mathbb{R}^+$).
- $X_{k_{box}m_h t}$ Bitumenmenge, die kalt vom Kaltlager für Kartongebände k_{box} zum Verflüssigungsstandort mit Mikrowellenofen m_h in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{k_{box}m_h t} \in \mathbb{R}^+$).

- $x_{m_b at}$ Bitumenmenge, die heiß vom Verflüssigungsstandort mit Fassschmelzer m_b zur Asphaltmischanlage a in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{m_b at} \in \mathbb{R}_0^+$).
- $x_{m_p at}$ Bitumenmenge, die heiß vom Verflüssigungsstandort mit Schmelztopf m_p zur Asphaltmischanlage a in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{m_p at} \in \mathbb{R}_0^+$).
- $x_{m_h at}$ Bitumenmenge, die heiß vom Verflüssigungsstandort mit Mikrowellenofen m_h zur Asphaltmischanlage a in Periode t transportiert wird in Tonnen ($x_{m_h at} \in \mathbb{R}_0^+$).
- I_r Binärvariable der Standortentscheidung für den Abfüllstandort an einer Raffinerie r .
- I_s Binärvariable für die Standortentscheidung für den Heißlagerstandort s .
- $I_{k_{bag}}$ Binärvariable der Standortentscheidung für den Kaltlagerstandort für Kunststoffgebände k_{bag} .
- $I_{k_{box}}$ Binärvariable der Standortentscheidung für den Kaltlagerstandort für Kartongebände k_{box} .
- I_{m_b} Binärvariable der Standortentscheidung für den Fassschmelzstandort m_b .
- I_{m_p} Binärvariable der Standortentscheidung für den Schmelztopfstandort m_p .
- I_{m_h} Binärvariable der Standortentscheidung für den Mikrowellenofenstandort m_h .
- smh_{st} Lagerbestand im Heißlager s am Anfang der Periode t in Tonnen ($smh_{st} \in \mathbb{R}_0^+$).
- $smc_{k_{bag}t}$ Lagerbestand im Kaltlager k_{bag} am Anfang der Periode t in Tonnen ($smc_{k_{bag}t} \in \mathbb{R}_0^+$).
- $smc_{k_{box}t}$ Lagerbestand im Kaltlager k_{box} am Anfang der Periode t in Tonnen ($smc_{k_{box}t} \in \mathbb{R}_0^+$).

- cap_s Über den Betrachtungszeitraum maximal benötigte Lagerkapazität im Heißlager s in Tonnen ($cap_s \in \mathbb{R}_0^+$).
- $cap_{k_{bag}}$ Über den Betrachtungszeitraum maximal benötigte Lagerkapazität im Kaltlagerstandort für Kunststoffgebände k_{bag} in Tonnen ($cap_{k_{bag}} \in \mathbb{R}_0^+$).
- $cap_{k_{box}}$ Über den Betrachtungszeitraum maximal benötigte Lagerkapazität im Kaltlagerstandort für Kartongebinde k_{box} in Tonnen ($cap_{k_{box}} \in \mathbb{R}_0^+$).
- cap_{m_b} Über den Betrachtungszeitraum maximal benötigte Schmelzkapazität im Fassschmelzstandort m_b in Tonnen ($cap_{m_b} \in \mathbb{R}_0^+$).
- cap_{m_p} Über den Betrachtungszeitraum maximal benötigte Schmelzkapazität im Schmelztopfstandort m_p in Tonnen ($cap_{m_p} \in \mathbb{R}_0^+$).
- cap_{m_h} Über den Betrachtungszeitraum maximal benötigte Schmelzkapazität im Mikrowellenofenstandort m_h in Tonnen ($cap_{m_h} \in \mathbb{R}_0^+$).

6.4.1.3 Parameter der Zielfunktion und der Nebenbedingungen

Die Parameter der Zielfunktion lauten

p_{rt}	Bitumenpreis in der Raffinerie r in Periode t in Euro pro Tonne.
h_{ra}	Kosten für den Heißtransport von Raffinerie r zur Asphaltmischanlage a in Euro pro Tonne. ²²
h_{rs}	Kosten für den Heißtransport von Raffinerie r zum Tanklager s in Euro pro Tonne.
h_{sa}	Kosten für den Heißtransport vom Tanklager s zur Asphaltmischanlage a in Euro pro Tonne.
$h_{m_b a}$	Kosten für den Heißtransport vom Verflüssigungsstandort mit Fassschmelzer m_b zur Asphaltmischanlage a in Euro pro Tonne.
$h_{m_p a}$	Kosten für den Heißtransport vom Verflüssigungsstandort mit Schmelztopf m_p zur Asphaltmischanlage a in Euro pro Tonne.
$h_{m_h a}$	Kosten für den Heißtransport vom Verflüssigungsstandort mit Mikrowellenofen m_h zur Asphaltmischanlage a in Euro pro Tonne.
$c_{r k_{bag}}$	Kosten für den Kalttransport von der Raffinerie r zum Kaltlager für Kunststoffgebände k_{bag} in Euro pro Tonne.
$c_{r k_{box}}$	Kosten für den Kalttransport von der Raffinerie r zum Kaltlager für Kartongebände k_{box} in Euro pro Tonne.
$c_{k_{bag} m_b}$	Kosten für den Kalttransport vom Kaltlager für Kunststoffgebände k_{bag} zum Verflüssigungsstandort mit Fassschmelzer m_b in Euro pro Tonne.
$c_{k_{bag} m_p}$	Kosten für den Kalttransport vom Kaltlager für Kunststoffgebände k_{bag} zum Verflüssigungsstandort mit Schmelztopf m_p in Euro pro Tonne.

²² Alle Heiß- und Kalttransportkosten pro Tonne werden zuvor errechnet, indem die Kostensätze pro Tonnenkilometer mit den jeweiligen Straßen-Distanzen (beispielsweise hier zwischen Raffinerie r und Asphaltmischanlage a) multipliziert werden.

$c_{k_{box}m_b}$	Kosten für den Kalttransport vom Kaltlager für Kartongebinde k_{box} zum Verflüssigungsstandort mit Fassschmelzer m_b in Euro pro Tonne.
$c_{k_{box}m_p}$	Kosten für den Kalttransport vom Kaltlager für Kartongebinde k_{box} zum Verflüssigungsstandort mit Schmelztopf m_p in Euro pro Tonne.
$c_{k_{box}m_h}$	Kosten für den Kalttransport vom Kaltlager für Kartongebinde k_{box} zum Verflüssigungsstandort mit Mikrowellenofen m_h in Euro pro Tonne.
F_r	Fixe Kosten pro Jahr am Abfüllstandort bei der Raffinerie r in Euro.
F_s	Fixe Kosten pro Jahr am Heißlagerstandort s in Euro.
$F_{K_{bag}}$	Fixe Kosten pro Jahr am Kaltlagerstandort für Kunststoffgebinde k_{bag} in Euro.
$F_{K_{box}}$	Fixe Kosten pro Jahr am Heißlagerstandort für Kartongebinde k_{box} in Euro.
F_{m_b}	Fixe Kosten pro Jahr am Fassschmelzstandort m_b in Euro.
F_{m_p}	Fixe Kosten pro Jahr am Schmelztopfstandort m_p in Euro.
F_{m_h}	Fixe Kosten pro Jahr am Mikrowellenofenstandort m_h in Euro.
$V_{r_{bag}}$	Variable Stückkosten ²³ (Verpackungsmaterial und Energie zum Abfüllen) am Abfüllstandort bei Raffinerie r_{bag} in Euro pro Tonne in Kunststoffgebinden ²⁴ .

²³ Variable Stückkosten ist der auf eine einzelne Ausbringungseinheit entfallende variable Anteil der Kosten [ObGa08]. Beispiel: Man erhält die variable Stückkosten k , indem man die gesamten variablen Kosten K durch die Ausbringungsmenge x dividiert.

²⁴ Für Kartongebinde wird keine Abfüllanlage benötigt, daher fallen hier nur betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten (bsp. Verpackungsmaterial) an.

$V_{r_{box}}$	Variable Stückkosten (Verpackungsmaterial) am Abfüllstandort bei Raffinerie r_{box} in Euro pro Tonne in Kartongebinden ²⁴ .
V_{st}	Variable Stückkosten am Heißlagerstandort s in Euro pro Lagermenge in Tonnen und Lagerzeitraum in Monaten.
V_s^{cap}	Kapazitätsspezifische Kosten am Heißlagerstandort s in Euro pro Speicherkapazität in Tonnen.
$V_{K_{bag}}^{cap}$	Kapazitätsspezifische Kosten in Euro pro Lagerkapazität in Tonne im Kunststoffgebilde.
$V_{K_{box}}^{cap}$	Kapazitätsspezifische Kosten in Euro pro Lagerkapazität in Tonnen im Kartongebinde.
V_{m_b}	Variable Stückkosten in Euro pro Durchsatzmenge in Tonnen am Fassschmelzstandort m_b .
$V_{m_b}^{cap}$	Kapazitätsspezifische Kosten in Euro pro Verflüssigungskapazität in Tonnen am Fassschmelzstandort m_b .
V_{m_p}	Variable Stückkosten in Euro pro Durchsatzmenge in Tonnen am Schmelztopfstandort m_p .
$V_{m_p}^{cap}$	Kapazitätsspezifische Kosten in Euro pro Verflüssigungskapazität in Tonnen am Schmelztopfstandort m_p .
V_{m_h}	Variable Stückkosten in Euro pro Durchsatzmenge in Tonnen am Mikrowellenofenstandort m_h .
$V_{m_h}^{cap}$	Kapazitätsspezifische Kosten in Euro pro Verflüssigungskapazität in Tonnen am Mikrowellenofenstandort m_h .

Zur Bestimmung der Parameter werden Daten, Abschätzungen (Kapitel 5) und Annahmen bzw. Werte aus Tabelle 5-22 zugrunde gelegt. Damit spiegeln die Gesamtkostenfunktionen stets die jährlichen Gesamtkosten neuer und noch nicht vorhandener technischer Komponenten wider. Dies ist insbesondere bei dem Vergleich von Heiß- und Kaltlagerung von Bedeutung.

Die Nebenbedingungen verfügen zusätzlich über folgende Parameter, die nicht Teil der Zielfunktion sind:

q_{rt}	Bitumenangebot in der Raffinerie r in Periode t in Tonnen.
d_{at}	Bitumenbedarf in der Asphaltmischanlage a in Periode t in Tonnen.
y	Maximaler prozentualer Mengenanteil der Jahresgesamtlagermengen ²⁵ eines Lagers, der aus einer Raffinerie kommen darf.
G	Hinreichend großer positiver Parameter.

6.4.2 Zielfunktion

Gemäß den in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen Anforderungen erfasst die Zielfunktion alle kostenrelevanten Vorgänge der möglichen Versorgungsketten. In der Bitumenversorgung werden Kosten größtenteils durch Material, Lagerung und Transporte verursacht. Transportkosten berechnen sich aus einer Pauschale pro Tonne und Kilometer multipliziert mit der Transportstrecke und multipliziert mit der Menge an heißem oder kaltem Transportbitumen. Je nachdem, ob heißes oder kaltes Bitumen distribuiert wird, fallen andere Transportkosten an. Die Kosten für den Transport von heißflüssigem Bitumen sind in der Regel höher, da unter anderem eine zusätzliche Leerfahrt mit dem Tanklastkraftwagen (vgl. Abschnitt 2.3.3) anfällt. Daher ist es denkbar, dass durch eine dezentrale Anordnung der Verflüssigungsanlagen, beispielsweise an den Asphaltmischanlagen, zusätzliche Kalt- statt Heißtransporte durchgeführt werden können und somit jeweils weitere Transportkostenreduktionen möglich sind. Zugleich verursachen zusätzliche Anlagen zusätzliche Kosten, wodurch ein Trade-off entsteht. Die Möglichkeit einer dezentralen Anordnung von Technologiestandorten findet im Modell daher Berücksichtigung und die Zielfunktion des Modells ergibt sich aus der Summe der kostenrelevanten Vorgänge der Versorgungskette. Die jährlichen Gesamtkosten Z in Euro werden mit folgender Gleichung berechnet:

$$Z = Z_{\text{Stoff / Transport}} + Z_{\text{Lagerung / Verpackung}} + Z_{\text{Verflüssigung}}$$

6-3

$Z_{\text{Stoff/Transport}}$ sind die Stoff- (Bitumen-) und Transportkosten in allen Versorgungsketten. Sie werden in Unterabschnitt 6.4.2.1 beschrieben. Auf die Lager- und Verpackungskosten wird in Unterabschnitt 6.4.2.2 eingegangen. Die Kosten

²⁵ Um nicht zu abhängig von einem Lieferanten zu werden, kann es sinnvoll sein, nicht mehr als beispielsweise 40 % der jährlichen Gesamtlager- oder Produktionsmenge von einem Lieferanten oder einer Raffinerie zu beziehen [Hö10].

in den Verflüssigungsstandorten werden schließlich in 6.4.2.3 dargestellt. Als Kapazität einer Anlage wird dabei die Anlagenleistung oder bei Lagern das gesamte Speichervermögen verstanden, das immer, auch ohne ausgelastet zu sein, vorgehalten werden muss, um einen oft nur einmaligen Kapazitätsbedarf decken zu können.

6.4.2.1 Material- und Transportkosten

Materialkosten fallen an, wenn Bitumen aus den Raffinerien entnommen wird. Transportkosten können entweder durch Heißtransporte oder durch den Kalttransport von abgepacktem Bitumen zwischen allen Standorten entstehen. Eine Ausnahme stellt der Kalttransport von der Raffinerie in einen Verflüssigungsstandort dar. Diese Form des Transports findet in der Praxis nicht statt, da die spezifische Transportkostensparnis (zirka 5 €/t auf 100 km, Abschnitt 5.2.6) eines Kalttransports innerhalb Deutschlands die betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kalthandhabungskosten nicht kompensieren kann. Die Preisvolatilität gemäß Abschnitt 2.5 ist der eigentliche Grund, weshalb Kalttransporte kombiniert mit Kaltlagerung in Betracht gezogen werden. Daher existieren auch im Modell keine direkten Kalttransporte von der Raffinerie in die Verflüssigungsanlagen.

Die einzelnen Bestandteile, aus denen die Stoff- und Transportkosten gemäß der Gleichung

$$Z_{\text{Stoff / Transport}} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5$$

6-4

aufsummiert werden können, bestimmen sich jeweils durch Multiplikation der jeweiligen Massenströme mit den spezifischen Transportkosten (€/t) und gegebenenfalls den Bitumenpreisen (€/t) an den Bezugsstandorten.

Es handelt sich somit hierbei ausschließlich um betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten.

z_1 beschreibt die Kosten für den Einkauf und den Heißtransport des Bitumens von den Raffinerien in die Asphaltmischanlagen und die Tanklager.

$$z_1 = \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} [(h_{ra} + p_{rt}) \cdot x_{rat}] + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} [(h_{rs} + p_{rt}) \cdot x_{rst}]$$

6-5

z_2 beschreibt die Kosten für den Einkauf und den Kalttransport des Bitumens von den Raffinerien in die Kaltlager für Kunststoff- und Kartongebinde.

$$z_2 = \sum_{r \in R} \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} \sum_{t \in T} [(c_{rk_{bag}} + p_{rt}) \cdot x_{rk_{bag}t}] + \sum_{r \in R} \sum_{k_{box} \in K_{box}} \sum_{t \in T} [(c_{rk_{box}} + p_{rt}) \cdot x_{rk_{box}t}]$$

6-6

z_3 beschreibt die Kosten für den heißflüssigen Transport des Bitumens von den Tanklagern in die Asphaltmischanlagen.

$$z_3 = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} (h_{sa} \cdot x_{sat})$$

6-7

z_4 beschreibt die Kosten für den Kalttransport von den zwei Kaltlagertypen in die drei Verflüssigungsstandorttypen, wobei Kunststoffgebände nicht in die Mikrowellenofenstandorte transportiert werden, da diese Technologiekombination bisher nicht möglich ist.

$$\begin{aligned} z_4 = & \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} \sum_{m_b \in M_b} \sum_{t \in T} (c_{k_{bag}m_b} \cdot x_{k_{bag}m_b t}) + \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} \sum_{m_p \in M_p} \sum_{t \in T} (c_{k_{bag}m_p} \cdot x_{k_{bag}m_p t}) \\ & + \sum_{k_{box} \in K_{box}} \sum_{m_b \in M_b} \sum_{t \in T} (c_{k_{box}m_b} \cdot x_{k_{box}m_b t}) + \sum_{k_{box} \in K_{box}} \sum_{m_p \in M_p} \sum_{t \in T} (c_{k_{box}m_p} \cdot x_{k_{box}m_p t}) \\ & + \sum_{k_{box} \in K_{box}} \sum_{m_h \in M_h} \sum_{t \in T} (c_{k_{box}m_h} \cdot x_{k_{box}m_h t}) \end{aligned}$$

6-8

z_5 beschreibt die Kosten für den Heißtransport von den Verflüssigungsstandorten in die Asphaltmischanlagen.

$$z_5 = \sum_{m_b \in M_b} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} (h_{m_b a} \cdot x_{m_b a t}) + \sum_{m_p \in M_p} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} (h_{m_p a} \cdot x_{m_p a t}) + \sum_{m_h \in M_h} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} (h_{m_h a} \cdot x_{m_h a t})$$

6-9

6.4.2.2 Lager- und Verpackungskosten

In diesem und im folgenden Abschnitt werden die Kosten der Technologien im Bereich der Bitumenlagerung und -verpackung für die Zielfunktion des Modells erfasst. Hierzu werden die Kostenfunktionen (vgl.

Tabelle 5-25 bis Tabelle 5-30) der investitions- und betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kostenarten verursachungsgerecht in drei Kategorien unterteilt. Der fixe Anteil (t in Gleichung 5-11) der investitionsabhängigen Kostenfunktionen entsteht mit jedem neuen Technologiestandort (beispielsweise für Wachpersonal) unabhängig von der Lagergröße.

Der variable Teil ($m \cdot x$ in Gleichung 5-11) der investitionsabhängigen Kostenarten an einem Technologiestandort richtet sich an der Kapazität der Lager, also der über den Betrachtungszeitraum maximal erwarteten Bitumenmenge aus. Daneben ist der variable Teil der betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten von der Menge – im Heißlager zusätzlich von der Menge und dem Zeitraum – an Bitumen insgesamt abhängig.

Diese Kosten lassen sich durch Multiplikation mit der jeweiligen Bezugsgröße (pro Standort, pro vorgehaltene Kapazität, pro Durchsatzmenge oder Lagerbestand) für jede Technologie berechnen. Die Lager- und Verpackungskosten werden im Folgenden für die jeweilige Technologie unter Einbeziehung dieser Bezugsgrößen beschrieben, um abschließend zu $Z_{\text{Lager/Verpackung}}$ aufsummiert zu werden.

$$Z_{\text{Lager/Verpackung}} = Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9 + Z_{10}$$

6-10

z_6 beschreibt die Kosten in allen Heißlagerstandorten s mit der (in mindestens einer Periode/einem Monat– erreichten) Lagerkapazität cap_s (vgl. Gleichung 6-40) und der Lagermenge f_{st}^{smh} in Tonnen. Es handelt sich somit – in dieser Reihenfolge – sowohl um investitions- als auch betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten.

$$z_6 = \sum_{s \in S} \left[(F_s \cdot I_s) + (V_s^{cap} \cdot cap_s) + \sum_{t \in T} (V_{st} \cdot f_{st}^{smh}) \right]$$

6-11

z_6 beschreibt die Kosten in allen Kaltlagerstandorten für Kunststoffgebände mit der maximalen Lagerkapazität $cap_{k_{bag}}$ im Betrachtungszeitraum. Es fallen investitionsabhängige Kosten an (vgl.3.2.3).

$$z_7 = \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} \left[(F_{k_{bag}} \cdot I_{k_{bag}}) + (V_{k_{bag}}^{cap} \cdot cap_{k_{bag}}) \right]$$

6-12

z_8 beschreibt die Kosten in allen Kaltlagerstandorten für Kunststoffgebäude mit der maximalen Auslastung $cap_{k_{box}}$ im Betrachtungszeitraum. Auch hier fallen investitionsabhängige Kosten an.

$$z_8 = \sum_{k_{box} \in K_{box}} \left[(F_{k_{box}} \cdot I_{k_{box}}) + (V_{k_{box}}^{cap} \cdot cap_{k_{box}}) \right]$$

6-13

z_9 beschreibt die Kosten des Abfüllungsprozesses und des Verpackungsmaterials für Kunststoffgebäude in Abhängigkeit der behandelten Bitumenmenge. Es fallen investitions- und betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten an.

$$z_9 = \sum_{r \in R} (F_r \cdot I_r) + \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} \sum_{t \in T} (V_{r_{bag}} \cdot x_{rk_{bag}t})$$

6-14

z_{10} beschreibt die Kosten des Abfüllungsprozesses und des Verpackungsmaterials für Kartongebäude in Abhängigkeit der behandelten Bitumenmenge. Zur Befüllung von Kartongebäuden wird keine spezielle Abfüllanlage benötigt. Eine Standortentscheidung für eine Abfüllanlage mit beachtenswerten Fixkosten wäre daher nicht problemadäquat. Es fallen daher nur betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten an.

$$z_{10} = \sum_{r \in R} \sum_{k_{box} \in K_{box}} \sum_{t \in T} (v_{r_{box}} \cdot x_{rk_{box}t})$$

6-15

6.4.2.3 Verflüssigungskosten

Auch an den Verflüssigungsstandorten können investitions- und betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten anfallen. Sie werden hier für die jeweilige Verflüssigungstechnologie aufgeführt, um anschließend gemäß der Gleichung

$$Z_{\text{Verflüssigung}} = Z_{11} + Z_{12} + Z_{13}$$

6-16

aufsummiert werden zu können.

Die Methodik zur Berechnung der Kosten in den jeweiligen Verflüssigungsstandorten ist für die drei Verflüssigungstechnologien ähnlich. Es fallen investitionsabhängige Fixkosten an jedem Standort an, die in F_{mb} , F_{mp} und F_{mh} zusammengefasst und mit der jeweiligen binären Standortentscheidungsvariablen multipliziert werden. Daneben fallen Kosten in Abhängigkeit von der Anlagenkapazität an, die nach der maximalen Verflüssigungsleistung im gesamten Betrachtungszeitraum bemessen wird. Diese Kosten werden durch Multiplikation der kapazitätsspezifischen Kosten mit der Anlagenkapazität berechnet. In jeder Produktionsperiode fallen außerdem, beispielsweise für die Verflüssigungsenergie, variable Kosten für das gesamte Bitumen an, das aus den Kaltlagern für Karton- und gegebenenfalls Kunststoffgebände in die Verflüssigungsanlage transportiert wird. Diese Kosten werden durch Multiplikation der variablen Stückkosten mit den Summen der jeweiligen Massenströme bestimmt. Die Gleichungen spiegeln somit – in dieser Reihenfolge – die Addition der investitions- und betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten wider.

$$z_{11} = \sum_{m_b \in M_b} \left\{ (F_{m_b} \cdot I_{m_b}) + (V_{m_b}^{cap} \cdot cap_{m_b}) + \sum_{t \in T} \left[V_{m_b} \cdot \left(\sum_{k_{bag} \in K_{bag}} x_{k_{bag} m_b t} + \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box} m_b t} \right) \right] \right\}$$

6-17

$$z_{12} = \sum_{m_p \in M_p} \left\{ (F_{m_p} \cdot I_{m_p}) + (V_{m_p}^{cap} \cdot cap_{m_p}) + \sum_{t \in T} \left[V_{m_p} \cdot \left(\sum_{k_{bag} \in K_{bag}} x_{k_{bag} m_p t} + \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box} m_p t} \right) \right] \right\}$$

6-18

$$z_{13} = \sum_{m_h \in M_h} \left[(F_{m_h} \cdot I_{m_h}) + (V_{m_h}^{cap} \cdot cap_{m_h}) + \sum_{t \in T} \left(V_{m_h} \cdot \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box} m_h t} \right) \right]$$

6-19

6.4.3 Nebenbedingungen

Folgende Nebenbedingungen sind einzuhalten:

Die angebotenen Bitumenmengen in den Raffinerien müssen jeweils größer oder gleich der abgehenden Bitumenmenge sein.

$$q_{rt} \geq \sum_{a \in A} x_{rat} + \sum_{s \in S} x_{rst} + \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} x_{rk_{bag}t} + \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{rk_{box}t} \quad \forall r \in R, \forall t \in T$$

6-20

Der Bitumenbedarf in den Asphaltmischanlagen muss gedeckt werden.

$$d_{at} \leq \sum_{r \in R} x_{rat} + \sum_{s \in S} x_{sat} + \sum_{m_b \in M_b} x_{m_b at} + \sum_{m_p \in M_p} x_{m_p at} + \sum_{m_h \in M_h} x_{m_h at} \quad \forall a \in A, \forall t \in T$$

6-21

Die Summe aller Stoffströme in ein Lager entspricht der Summe aller Stoffströme, die das Lager verlassen.

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{rst} = \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} x_{sat} \quad \forall s \in S$$

6-22

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{rk_{bag}t} = \sum_{m_b \in M_b} \sum_{t \in T} x_{k_{bag}m_bt} + \sum_{m_p \in M_p} \sum_{t \in T} x_{k_{bag}m_pt} \quad \forall k_{bag} \in K_{bag}$$

6-23

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{rk_{box}t} = \sum_{m_b \in M_b} \sum_{t \in T} x_{k_{box}m_bt} + \sum_{m_p \in M_p} \sum_{t \in T} x_{k_{box}m_pt} + \sum_{m_h \in M_h} \sum_{t \in T} x_{k_{box}m_ht} \quad \forall k_{box} \in K_{box}$$

6-24

Wie in Kapitel 4 dargelegt, werden keine Kunststoffgebilde in Mikrowellenverflüssigungsanlagen gebracht.

$$x_{k_{bag}m_ht} = 0 \quad \forall k_{bag} \in K_{bag}, \forall m_h \in M_h, \forall t \in T$$

6-25

Es gibt keine direkten Stoffströme von den Kaltlagern in die Asphaltmischanlagen.

$$x_{k_{bag}at} = 0 \quad \forall k_{bag} \in K_{bag}, \forall a \in A, \forall t \in T$$

6-26

$$x_{k_{box}at} = 0 \quad \forall k_{box} \in K_{box}, \forall a \in A, \forall t \in T$$

6-27

Es gibt keine direkten Stoffströme von kaltem Bitumen von den Raffinerien in die Verflüssigungsanlagen. Auch hier (vgl. Unterabschnitt 6.4.2.1) gilt als Begründung, dass die betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten der Kalthandhabung durch die Transportkostenreduktion (durch Kalttransport gegenüber Heißtransport) nicht überkompensiert werden können.

$$x_{rm_{bt}} = 0 \quad \forall r \in R, \forall m_b \in M_b, \forall t \in T$$

6-28

$$x_{rm_{pt}} = 0 \quad \forall r \in R, \forall m_p \in M_p, \forall t \in T$$

6-29

$$x_{rm_{ht}} = 0 \quad \forall r \in R, \forall m_h \in M_h, \forall t \in T$$

6-30

Tanklager werden nicht aus Kaltlagern beliefert und beliefern keine Verflüssigungsanlagen.

$$x_{k_{bagst}} = 0 \quad \forall k_{bag} \in K_{bag}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

6-31

$$x_{k_{boxst}} = 0 \quad \forall k_{box} \in K_{box}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

6-32

$$x_{sm_{bt}} = 0 \quad \forall s \in S, \forall m_b \in M_b, \forall t \in T$$

6-33

$$x_{sm_{pt}} = 0 \quad \forall s \in S, \forall m_p \in M_p, \forall t \in T$$

6-34

$$x_{sm_{ht}} = 0 \quad \forall s \in S, \forall m_h \in M_h, \forall t \in T$$

6-35

Die Summe aller Stoffströme in eine Verflüssigungsanlage in einer Periode entspricht der Summe aller Stoffströme, die die jeweilige Anlage in diesem Monat wieder verlassen.

$$\sum_{k_{bag} \in K_{bag}} x_{k_{bag} m_b t} + \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box} m_b t} = \sum_{a \in A} x_{m_b a t} \quad \forall m_b \in M_b, \forall t \in T$$

6-36

$$\sum_{k_{bag} \in K_{bag}} x_{k_{bag} m_p t} + \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box} m_p t} = \sum_{a \in A} x_{m_p a t} \quad \forall m_p \in M_p, \forall t \in T$$

6-37

$$\sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box} m_h t} = \sum_{a \in A} x_{m_h a t} \quad \forall m_h \in M_h, \forall t \in T$$

6-38

Die Lagermenge im Heißlager s am Ende der Periode t entspricht der Lagermenge am Ende der Periode $t-1$ zuzüglich der zugehenden Stoffströme und abzüglich der abgehenden Stoffströme der Periode t des Heißlagers s .

$$smh_{st} = \left\{ \begin{array}{l} smh_{s,t-1} + \sum_{r \in R} x_{rst} - \sum_{a \in A} x_{sat} \quad \text{für } t \geq 1 \\ 0 \quad \text{für } t = 0 \end{array} \right\} \quad \forall s \in S$$

6-39

Die Kapazität, also das Speichervolumen des Lagers, das über den gesamten Betrachtungszeitraum vorgehalten werden muss, entspricht mindestens der maximalen benötigten Lagerkapazität in mindestens einer Periode des Betrachtungszeitraums.

$$cap_s \geq smh_{st} \quad \forall s \in S, \forall t \in T$$

6-40

Ebenso verhält es sich mit den vorzuhaltenden Lagerkapazitäten der Kaltlager, wobei keine Stoffströme von Kunststoffgebindelagern zu Mikrowellenöfen vorgesehen sind (vgl. Unterabschnitt 5.3.1).

$$smc_{k_{bag} t} = \left\{ \begin{array}{l} smc_{k_{bag} t-1} + \sum_{r \in R} x_{rk_{bag} t} - \sum_{m_b \in M_b} x_{k_{bag} m_b t} - \sum_{m_p \in M_p} x_{k_{bag} m_p t} \quad \text{für } t \geq 1 \\ 0 \quad \text{für } t = 0 \end{array} \right\} \quad \forall k_{bag} \in K_{bag}$$

6-41

$$cap_{k_{bag}} \geq smc_{k_{bag}t} \quad \forall k_{bag} \in K_{bag}, \forall t \in T \quad 6-42$$

$$smc_{k_{box}t} = \begin{cases} smc_{k_{box}t-1} + \sum_{r \in R} x_{rk_{box}t} - \sum_{m_b \in M_b} x_{k_{box}m_b t} - \sum_{m_p \in M_p} x_{k_{box}m_p t} - \sum_{m_h \in M_h} x_{k_{box}m_h t} & \text{für } t \geq 1 \\ 0 & \text{für } t = 0 \end{cases} \quad \forall k_{box} \in K_{box} \quad 6-43$$

$$cap_{k_{box}} \geq smc_{k_{box}t} \quad \forall k_{box} \in K_{box}, \forall t \in T \quad 6-44$$

Auch die Verflüssigungskapazitäten, die in den Verflüssigungsanlagen installiert werden müssen, bestimmen sich aus den Stoffströmen in die Verflüssigungsstandorte im Betrachtungszeitraum. Sie müssen größer oder gleich der maximal in einem oder mehreren Perioden erforderlichen Verarbeitungsmengen sein.

$$cap_{m_b} \geq \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box}m_b t} + \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} x_{k_{bag}m_b t} \quad \forall m_b \in M_b, \forall t \in T \quad 6-45$$

$$cap_{m_p} \geq \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box}m_p t} + \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} x_{k_{bag}m_p t} \quad \forall m_p \in M_p, \forall t \in T \quad 6-46$$

$$cap_{m_h} \geq \sum_{k_{box} \in K_{box}} x_{k_{box}m_h t} \quad \forall m_h \in M_h, \forall t \in T \quad 6-47$$

Um sicherzustellen, dass die Binärvariable, welche eine Standortentscheidung repräsentiert, modellkonform gewählt wird, werden die folgenden Gleichungen verwendet, die sich eines hinreichend großen Parameters g bedienen, welcher zunächst als ein Wert definiert werden muss, der größer als das Gesamtjahresangebot ist.

$$G \geq \sum_{t \in T} q_{rt} \quad \forall r \in R$$

6-48

Immer, wenn ein zu- oder abgehender Stoffstrom existiert, muss auch der betroffene Standort existieren, also die standortspezifische Entscheidungsvariable gleich eins sein.

$$I_r \cdot G \geq \sum_{k_{bag} \in K_{bag}} \sum_{t \in T} x_{rk_{bag}t} \quad \forall r \in R$$

6-49

$$I_s \cdot G \geq \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} x_{sat} \quad \forall s \in S$$

6-50

$$I_{k_{bag}} \cdot G \geq \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{rk_{bag}t} \quad \forall k_{bag} \in K_{bag}$$

6-51

$$I_{k_{box}} \cdot G \geq \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{rk_{box}t} \quad \forall k_{box} \in K_{box}$$

6-52

$$I_{m_b} \cdot G \geq \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} x_{m_bat} \quad \forall m_b \in M_b$$

6-53

$$I_{m_p} \cdot G \geq \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} x_{m_pat} \quad \forall m_p \in M_p$$

6-54

$$I_{m_h} \cdot G \geq \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} x_{m_hat} \quad \forall m_h \in M_h$$

6-55

Abschließend sind noch Gleichungen zu beschreiben, die für ein spezifisches Unternehmen relevant sein können, wenn es zu einem bestimmten Grad die Unabhängigkeit von einzelnen Lieferanten sichern will. Das Maß an Lieferantenumabhängigkeit findet Ausdruck im Wert y ($y \in \{0; \dots; 1\}$). Je kleiner y , desto

kleiner ist der Prozentsatz der Bitumenmenge, den ein Lagerstandort s oder k im gesamten Betrachtungszeitraum aus einer Raffinerie r beziehen darf.

$$\sum_{t \in T} x_{rst} \leq y \cdot \sum_{\delta \in R} \sum_{t \in T} x_{\delta st} \quad \forall r \in R, \forall s \in S, y \in [0,1]$$

6-56

$$\sum_{t \in T} x_{rk_{bag}t} \leq y \cdot \sum_{\delta \in R} \sum_{t \in T} x_{\delta k_{bag}t} \quad \forall r \in R, \forall k_{bag} \in K_{bag}, y \in [0,1]$$

6-57

$$\sum_{t \in T} x_{rk_{box}t} \leq y \cdot \sum_{\delta \in R} \sum_{t \in T} x_{\delta k_{box}t} \quad \forall r \in R, \forall k_{box} \in K_{box}, y \in [0,1]$$

6-58

Auf eine derartige Restriktion der direkten Heißbitumen-Stoffströme von der Raffinerie in die Asphaltmischanlagen kann hier verzichtet werden, da die Unabhängigkeit hier für jede Lieferung ohnehin gegeben ist und keine so große Menge wie für die Lagerung eingekauft wird. Das heißt, es kann bei der Just-in-Time-Handhabung ohne Bedenken jeweils beim Anbieter mit dem niedrigsten Bitumenpreis eingekauft werden. Die Parameter, die für die Anwendung des Modells für ein Referenzunternehmen gewählt werden, werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

6.5 Implementierung des Kapazitäts- und Standortmodells in GAMS

Nach der Formulierung des Modells im vorhergehenden Abschnitt wird in diesem Abschnitt auf die spezifischen Besonderheiten bei der Implementierung des Modells in die Modellierungsumgebung eingegangen. Hierzu wird zunächst auf die softwarespezifischen (Unterabschnitt 6.5.1) und anschließend auf die unternehmensspezifischen (Unterabschnitt 6.5.2) Vorgaben eingegangen.

6.5.1 Allgemeine Implementierungsspezifika

Um das im Abschnitt 6.4 aufgezeigte Modell bei vertretbarem Aufwand nutzen zu können, ist es notwendig, eine adäquate Modellierungsumgebung heranzuziehen, um das Modell rechnerunterstützt lösen zu können. Hierzu wird die kommerzielle Programmieroberfläche GAMS (General Algebraic Modeling System) gewählt. Die Vorteile einer Umgebung wie GAMS werden unter anderem von

Sasse [Sa01], Engels [En02] und Brooke et al. [BrKeMeRaRo98] wie folgt benannt:

- Das Modell ist leicht zwischen Betriebssystemen unterschiedlicher Rechenkapazität übertragbar.
- Die Programmsprache ähnelt der mathematischen Modellformulierung.
- Die Modellformulierung ist unabhängig von der anschließenden Wahl des Lösungsalgorithmus oder der Lösungsalgorithmen.

Das hier entwickelte gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsproblem besitzt als GAMS-Modell je nach Datengrundlage einen Umfang von zirka 63.800 Gleichungen, 115.500 reellwertigen und 160 binären Variablen. Die Anzahl der von null verschiedenen Koeffizienten liegt etwa bei 471.800.

Zur Modelllösung kommt der GAMS-immanente CPLEX-Lösungsalgorithmus zum Einsatz. Er bedient sich des „Branch-and-Bound“-Verfahrens (vgl. [Ga01]). Im Zuge der Lösungsfindung mit diesem Verfahren werden die Gesamtkosten möglicher Verfahrensketten mit denen einer bereits berechneten Gesamtkostensumme verglichen. Liegt der Wert der gerade untersuchten möglichen Modelllösung über den Gesamtkosten der anderen Modelllösung, wird diese Lösungsoption mit allen ihren Ausgestaltungsformen nicht weiter verfolgt. Andernfalls werden die Parameter der Lösung so lange weiter variiert beziehungsweise nachgeordnete zu teure Verfahrensstränge in gleicher Art und Weise abgeschnitten, bis eine optimale Lösung gemäß der Anforderung der Zielfunktion gefunden wird [Sch98].

6.5.2 Modellspezifikation für ein Unternehmen

Zusätzlich zu den grundlegenden Daten hinsichtlich vorhandener Asphaltproduktionsstandorte und deren Bedarf, ihrer jeweiligen Distanzen zueinander und der Kosten einiger Verfahrensschritte (vgl. Unterabschnitt 6.3.1.3) sind noch weitere Parameter exogen von Seiten des Referenzunternehmens vorgegeben.

Zunächst ist hier der Parameter y zu nennen, der den Anteil am Gesamtaufkommen eines Lagerstandorts widerspiegelt, der maximal aus einer Bitumenraffinerie bezogen werden darf. Von Seiten des Referenzunternehmens ist es gewünscht, dass jeder Lagerstandort, unabhängig von der dort zur Anwendung kommenden Lagermethode, von mindestens drei Raffinerien beliefert wird. Dies ist durch das Ziel einer ausreichenden Lieferantenunabhängigkeit moti-

viert. Im Modell wird dies durch die Lieferantenunabhängigkeitsrestriktion gelöst, in der der Parameter y ($y \in [0,1]$) auf 0,4 festgesetzt wird. Da die zu erwartende Auswirkung dieser zusätzlichen Restriktion vergleichsweise stark ausfallen kann, wird im Zuge der Modellvariation einmal auf diese Randbedingung verzichtet, um das resultierende Ergebnis mit dem Ergebnis bei $y = 0,4$ zu vergleichen.

Die beiden vom Referenzunternehmen verwendeten Heißlager finden mit ihrer derzeitigen Kostenstruktur (abgeschrieben) keine Berücksichtigung, da mittelfristig eine Erneuerung der Standortausstattung ansteht.

Die Parameter $F_r, F_s, F_{K_{bag}}, F_{K_{box}}, F_{m_b}, F_{m_p}, F_{m_h}, V, V_r, V_{st}, V_s^{cap}, V_{K_{bag}}^{cap}, V_{K_{box}}^{cap}, V_{K_{box}}, V_{m_b}, V_{m_b}^{cap}, V_{m_p}, V_{m_p}^{cap}, V_{m_h}$ und $V_{m_h}^{cap}$, aus denen sich die Kostenfunktionen einzelner Technologiestandorte bestimmen, werden im Rahmen dieser Arbeit ermittelt und sind in

Tabelle 5-25 bis Tabelle 5-30 dargelegt.

Der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr, da somit für das Referenzunternehmen untersucht werden kann, inwieweit sich historische und fiktive saisonale (Sommer/Winter) Bitumenpreisunterschiede auf die Form der Bitumenhandhabung auswirken. Eine zeitliche Auflösung in 12 Monate ist durch die verfügbaren Bedarfs- und Preisdaten bedingt.

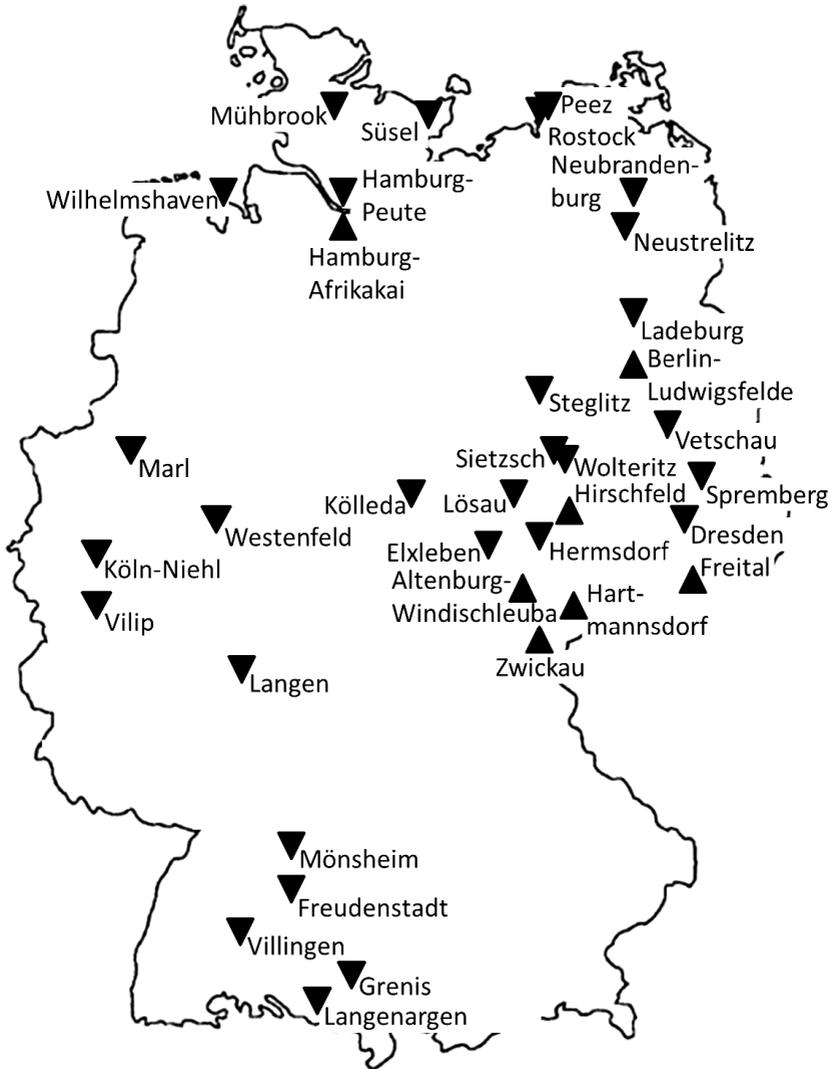


Abbildung 25: Alle Asphaltmischanlagenstandorte des Referenzunternehmens

Die qualitativen Standortinformationen werden aus Standortdaten von Asphaltmischanlagen des Referenzunternehmens ermittelt. Die Ermittlung und Beurteilung der qualitativen Standortdaten wird auf Grundlage von Luftbildanalysen der jeweiligen Anlagen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Bewertung der Standorte mittels der Gewichtung der Tabelle 6-2

Nr.	Asphaltmischanlage	Energiepreis (norm.)	Verkehrsbindung	Platz auf der Anlage	Platz neben der Anl.	Grundstückspreis	Raumaufstellung	Luftbild verfügbar	Summe	Gewichtete Summe Lager	Gew. Summe Verflüssigung	Lager möglich	Verflüssigung möglich
1	Altenburg	5	3	3	6	9	3	✓	29	4,4	4,5		
2	Berlin-Ludwigsfelde	10	9	1	1	7	1		29	4,9	5,1		
3	Dresden-Kaditz	6	7	5	8	6	4	✓	36	6,3	5,7	✓	✓
4	Elleben	9	7	6	6	9	7	✓	44	7	7,5	✓	✓
5	Freital	4	3	7	5	7	6	✓	32	5	5,3	✓	✓
6	Freudenstadt	n.V.	3	1	4	5	1	✓	14	-	-		
7	Grenis	n.V.	2	3	6	5	3	✓	19	-	-		
8	Hartmannsdorf	8	7	1	8	9	1		34	5,7	5,2	✓	✓
9	Hamburg Afrikakai	3	6	2	1	1	1	✓	14	2,9	2,3		
10	Hamburg Peute	7	7	2	1	1	1	✓	19	3,6	3,6		
11	Hermisdorfer Kreuz	8	9	2	6	8	4	✓	37	6,3	5,9	✓	✓
12	Hirschfeld	9	8	1	6	7	1		32	5,5	5,2	✓	✓
13	Kölleda	8	4	2	6	10	5	✓	35	5,1	5,8	✓	✓
14	Köln-Niehl	9	6	2	1	6	2	✓	26	4,1	4,8		
15	Ladeburg	7	3	3	9	6	7	✓	35	5,3	5,9	✓	✓
16	Langen	n.V.	8	5	7	4	5	✓	29	-	-		
17	Langentrog	n.V.	5	1	5	3	1	✓	15	-	-		
18	Lösau	8	8	4	7	10	3	✓	40	6,7	6,3	✓	✓
19	Marl	8	9	1	3	6	1		28	5	4,6	✓	
20	Mönsheim	n.V.	5	6	2	3	6	✓	22	-	-		
21	Mühbrook	9	6	1	1	n.V.	2	✓	19	-	-		
22	Neubrandenburg	n.V.	8	5	9	n.V.	6	✓	28	-	-		
23	Neustrelitz	9	4	6	4	9	5	✓	37	5,5	6,6	✓	✓
24	Peez	10	8	3	6	n.V.	2	✓	29	-	-		
25	Rostock	n.V.	8	8	7	n.V.	7	✓	30	-	-		
26	Sietzsch	7	8	2	7	7	1	✓	32	5,7	4,9	✓	
27	Spremberg	4	3	6	9	8	6	✓	36	5,7	5,6	✓	✓
28	Stegelitz	8	8	4	7	n.V.	6	✓	33	-	-		
29	Süsel	8	4	6	8	7	7	✓	40	6,2	6,9	✓	✓
30	Vetschau	1	4	1	4	8	1		19	3,2	2,3		
31	Villingen	10	4	3	3	2	3	✓	25	3,9	5,1		✓
32	Villip	10	5	5	6	4	8	✓	38	5,9	7,1	✓	✓
33	Westenfeld	10	3	1	2	8	1		25	3,4	4,7		
34	Wilhelmshaven	10	2	1	3	n.V.	1		17	-	-		
35	Wolteritz	6	6	4	7	8	5	✓	36	5,9	5,7	✓	✓
36	Zwickau	6	5	6	5	9	6	✓	37	5,8	6,1	✓	✓

Aus den 36 Anlagen, die sich vorher im Lösungsraum befanden, werden – mittels der Anwendung der hier dargestellten heuristischen Methode – insgesamt 17 geeignete Standorte für Lager und Verflüssigungsanlagen ermittelt. Es werden hierfür alle Anlagenstandorte in den Lösungsraum der Standort- und Kapazitätenplanung aufgenommen, die über eine gewichtete Bewertungspunktesumme größer als fünf verfügen und für die alle benötigten Daten vorliegen.

Dabei kann an den möglichen Kaltlagerstandorten sowohl Bitumen in Kunststoffgebinden als auch in Silikonkartonboxen gelagert werden. Ebenso können an den möglichen Verflüssigungsstandorten alle Verflüssigungstechnologien zum Einsatz kommen. Daher sind die Mengen K_{bag} und K_{box} und die Mengen M_b , M_p und M_h (vgl. Unterabschnitt 6.4.1.1) hier für die Anwendung auf das Referenzunternehmen gleich. Als mögliche Heißlagerstandorte werden alle 23 Standorte eines Tanklagerbetreibers zu den beiden bestehenden Tanklagerstandorten hinzugefügt.

6.6 Modellergebnisse

Das Modell dient gemäß seiner Zielfunktion dazu, die Kosten der Bitumenversorgungskette eines Unternehmens unter Einhaltung der Restriktionen und Integration neuer Technologien modellhaft zu minimieren. Dabei werden Lager- und Verflüssigungsstandorte, Lagerzeiträume, Produktionsmengen und Handhabungstechnologiespezifikationen unter anderem in Abhängigkeit von Szenarien (Daten) und Modellkonfigurationen (Parametern) bestimmt. Um untersuchen zu können, inwieweit sich einige Daten- und Parameteränderungen auf diese Ergebnisse auswirken, müssen zunächst sowohl Basisszenarien und Basiskonfigurationen als auch die Untersuchungsgrößen definiert werden.

Obwohl auch innerhalb eines Monats Bitumenpreisänderungen auftreten können, werden die Preise von den Herstellern in der Praxis zumeist jeweils gegen Monatsbeginn angepasst. Alle Lieferungen im jeweiligen Monat erfolgen zu diesem Preis. Dies rechtfertigt eine zeitliche Auflösung von jeweils 12 Monatstakten in jedem der Jahrespreisszenarien. Das Erheben von Daten von vor 2007 ist nicht möglich.

Als Basiskonfigurationen des Modells seien die vier Modellkonfigurationen definiert, denen die vier jährlichen historischen Bitumenpreisdatsätze der jeweiligen Jahre 2007 bis 2010 zugrunde liegen. Die vier Basispreisszenarien sind die historischen Bitumenpreise für Bitumen 70/100 dieser Jahre in monatlicher

Auflösung. Es ergeben sich in den Szenarien Berechnungen mit zirka 64.000 Gleichungen, zirka 115.000 reellwertigen Variablen und 160 ganzzahligen Variablen. Die Lösung erfolgt mittels Simplex Algorithmus. Das oben dargestellte mathematische Optimierungsproblem wird in seiner Basiskonfiguration mit dem Parameter $\gamma=0,4$ (maximaler Jahresgesamtmengenanteil, den ein Lager aus einer einzigen Raffinerie beziehen darf) implementiert. Der Einfachheit halber wird in diesem Abschnitt von den Modellen mit dieser Konfiguration und den Basispreisszenarien als „Basiskonfigurationen“ gesprochen. Mit den Ergebnissen dieser Konfiguration können die Ergebnisse der Modellvariationen bezüglich der Untersuchungsgrößen verglichen werden. Die Untersuchungsgrößen sind

- 1) die Gesamtkosten der Basiskonfiguration und Gesamtkostenenkung oder -zunahme bei Modellvariationen gegenüber der Basiskonfiguration,
- 2) die Lagermenge in heißflüssiger Form und in Kunststoff- und/oder Kartongebinden,
- 3) die Standorte und ihre Maximalkapazität, wobei vom Verflüssigungsstandort sowohl die Asphaltmischanlage vor Ort als auch weitere Anlagen beliefert werden.
- 4) die optimale Verflüssigungstechnologiespezifikationen beziehungsweise -kombinationen an den Standorten.

Auf das Zeigen der Lagermengen in den jeweiligen Lagermonaten wird verzichtet, da diese eine direkte Abhängigkeit von den Preisunterschieden innerhalb der Preisszenarien aufweisen. Hier wird nun die Auswirkungen auf alle genannten Untersuchungsgrößen aus Datenänderungen in den Unterabschnitten 6.6.1 (Preisdaten) und 6.6.2 (Bedarfsdaten) und Modellkonfigurationen im Unterabschnitt 6.6.3 untersucht. Eine tabellarische Übersicht über alle Gesamtkostensummen der Szenarien nach Daten- und Parameteränderungen erfolgt im nächsten Abschnitt 6.7 im Zuge einer abschließenden Zusammenfassung. Vorab seien hier in Tabelle 6-4 die jährlichen Gesamtkosten dargestellt, die sich mittels des Modells berechnen lassen, wenn unter sonst gleicher Problemformulierung die Möglichkeit der Lagerhaltung nicht gegeben ist. Das heißt, es finden nur Direkttransporte des heißflüssigen Bitumens von den Raffinerien in die Asphaltmischanlagen statt.

Tabelle 6-4: Ergebnisse in der Basiskonfiguration ohne Lagerhaltung

Jahre	2007	2008	2009	2010
Gesamtkosten zur Versorgung mit 70/100 ²⁶ in €/a	9.349.129	12.558.050	10.795.520	12.843.670

6.6.1 Technologie- und Standortwahl in Abhängigkeit der Preisdaten

Räumliche und zeitliche Preisunterschiede beim Bitumen in Deutschland folgen – abgesehen von wenigen Ausnahmen – keinem nachvollziehbaren Prinzip. Es ist daher notwendig, unterschiedliche Preisszenarien heranzuziehen, um die Auswirkungen dieser Größen auf die Technologie-, Standort-, Kapazitäten- und Stoffstromoptimierung mittels eines mathematischen Modells abschätzen zu können. Es werden hierfür in diesem Abschnitt historische und fiktive Preisszenarien herangezogen, um Aussagen darüber machen zu können, wie sich die Bitumenpreisstruktur auf die oben definierten Untersuchungsgrößen auswirkt. Die historischen Preisszenarien werden in Unterabschnitt 6.6.1.1 in das Modell integriert und die resultierenden Berechnungsergebnisse vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Implementierung fiktiver Preisszenarien ohne räumliche Preisschwankungen in Unterabschnitt 6.6.1.2. Durch die räumliche Homogenisierung wird verhindert, dass die Standortentscheidung von regionalen Niedrigpreisen einzelner Jahre beeinflusst wird.

6.6.1.1 Historische Preisdaten (Basiskonfigurationen)

Die zukünftige Entwicklung der Bitumenpreise ist unbekannt. Dies gilt naturgemäß auch für zukünftige saisonale Preisunterschiede. Das Heranziehen historischer Preisdaten ist dahingehend von Interesse, als dass es möglich wird, eine Aussage darüber zu treffen, inwieweit sich in der gegenwärtigen Situation neue Technologien der Bitumenkalthandhabung bei der Wiederholung bisheriger Jahrespreisschwankungen als wirkungsvoll zur Kostenreduzierung im Referenzunternehmen erweisen würden. Dies gilt insbesondere beim Vergleich der Modellergebnisse mit denen eines Modells ohne Kalthandhabungsoption. Dabei wird, wie in der Realität, sofern die historischen Preisunterschiede ausreichend groß sind, vor allem sowohl durch Transport- als auch durch Lagermengenop-

²⁶ Da Bitumen 70/100 die am häufigsten verwendete Bitumensorte ist, werden in dieser Arbeit die Preisdaten nur für diese Sorte erhoben.

timierung die zeitliche und räumliche Preishomogenität ausgenutzt, um den Bedarf der Asphaltmischanlagen zu decken. Tabelle 6-5 stellt die Ergebnisse der Untersuchungsgrößen in den vier Basiskonfigurationen dar.

Tabelle 6-5: Ergebnisse in der Basiskonfiguration

Jahre	2007	2008	2009	2010
Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in t€/a	9.349	12.264	10.742	12.844
Heißlagermengenanteil in t / am Gesamtbedarf in %	0	0	0	0
Kaltlagermengenanteil in t / am Gesamtbedarf in %	0	14.617/ 39	7.328/ 20	0
Heißlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	-	-	-
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Loessau (Kartongebinde/ 10.840) Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 3.777)	Hirschfeld (Kartongebinde/ 7.328)	-
Verflüssigungsstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Loessau (Schmelztopf/ 3.208) Hamburg-Mitte (Schmelztopf/ 1.060)	Hirschfeld (Schmelztopf/ 2.212)	-

Die Gesamtkosten werden stark von den jeweiligen jährlichen Preisniveaus bestimmt. Der Vergleich der Gesamtkosten mit denen der Versorgungsketten ohne Kaltlageroption unter Aufschlüsselung nach Material-, Lager- und Transportkosten erfolgt erst in Abschnitt 6.7. Hier ist zunächst die Technologiestrukturgestaltung von Interesse. Um Kosten zu reduzieren, wird entweder, wie in den Preisszenarien 2007 und 2010, kein Bitumen eingelagert oder es wird, wie in den Preisszenarien 2008 und 2009, zirka 20 bis 40 % des Gesamtjahresbedarfs gelagert. Beim Vergleich dieses Ergebnisses mit den maximalen saisonalen Preisdifferenzen, die insbesondere in 2008 mit zirka 102 €/t und 2009 mit zirka

85 €/t gegenüber 2007 mit zirka 58 €/t und 2010 mit zirka 34 €/t vergleichsweise groß waren, wird deutlich, dass hier eine saisonale Preisdifferenz überschritten wird, ab der die Kaltlagerung zur Gesamtkostenreduktion dienen kann. Ab welchem Preisunterschied dies der Fall ist, wird im nachfolgenden Unterabschnitt mit Hilfe von fiktiven Preisszenarien ermittelt.

Bemerkenswert ist auch, dass in der Praxis zwar stets große Mengen des Bitumens heißflüssig eingelagert werden, das Modell aber stets die Bitumenlagerung im erkalteten Zustand nutzt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Heißlagermengen in der Praxis durch strategische Überlegungen ausschließlich aus dem Bereich der Bitumenversorgungssicherung bestimmt werden. Dennoch müsste auch unter diesem Gesichtspunkt die Kaltlagerung wirtschaftlich günstiger als die Heißlagerung sein, insofern – wie hier angenommen – die Kosten neuer Tanklager anfallen und nicht die beiden vorhandenen Heißlager in ihrer bisherigen Kostenstruktur für einen begrenzten Zeitraum weitergenutzt werden.

Als Verpackungsart scheinen silikonierete Kartons (Strabox, vgl. Unterabschnitte 3.2.3 und 4.1.1.3) die wirtschaftlichste Technologievariante darzustellen. Sie werden in den Modelllösungen an keinem Standort und in keiner Versorgungskette mit einer Lagerung in Kunststoffgebinden kombiniert. Auch die zum Einsatz kommenden Verflüssigungstechnologien unterscheiden sich je nach Preisszenario nicht. Im Preisszenario mit der Datengrundlage aus 2008 werden an zwei Standorten ausschließlich Schmelztöpfe und im Preisszenario mit der Datengrundlage aus 2009 werden an einem Standort ebenso ausschließlich Schmelztöpfe eingesetzt. Um die benötigten Maximalmengen von 4.268 Tonnen pro Monat (2008) und 2.212 Tonnen pro Monat (2009) zu verflüssigen, würden zirka 11 Schmelztöpfe und zirka 6 Fassschmelzer an den jeweiligen Standorten benötigt. Lagerung und Verflüssigung finden am gleichen Standort statt.

2008, Bitumen 70/100

2009, Bitumen 70/100

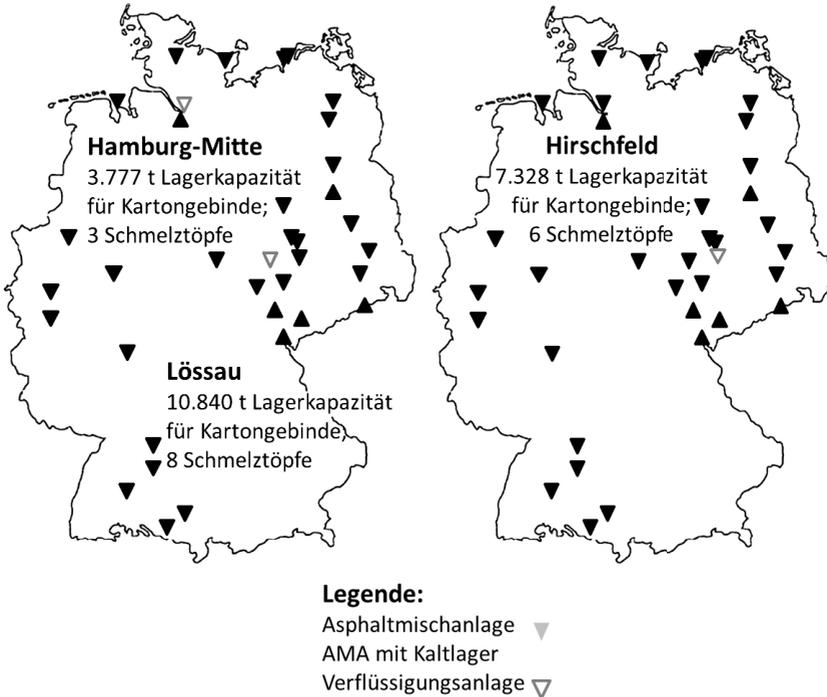


Abbildung 26: Technologiestandorte bei der Zugrundelegung von historischen Preisszenarien links aus 2008 und rechts aus 2009

6.6.1.2 Fiktive Preisdaten

Bei der Implementierung fiktiver Preisszenarien werden keine räumlichen Preisunterschiede modelliert. Die Betrachtung bleibt auf räumlich homogene fiktive zeitliche Preissteigerungen beschränkt. Für den Modelllösungsvorgang bedeutet dies, dass kein Optimierungspotential durch die Ausnutzung regionaler Preisunterschiede existiert. Die Modellergebnisse können dadurch zu zwei unterschiedlichen Zwecken herangezogen werden. Einerseits kann die Auswirkung von innerjährlichen Preissteigerungen (beispielsweise in Euro pro Tonne) auf die Gesamtlagermengen und die Auslastung und technische Gestaltung von Technologiestandorten untersucht werden. Andererseits ist es möglich, eine Standortempfehlung zu erhalten, die unabhängig von den räumlichen Preisschwankungen ist.

Zunächst wird hierzu die Basiskonfiguration des Modells mit konstanten Bitumenpreisen von 343,- €/t (Durchschnittspreis 2010) betrachtet. Bei konstanten Preisen wird zur Minimierung der Kosten auf die Ausstattung der Versorgungskette mit zusätzlichen Technologien verzichtet, da lediglich die Transportkosten minimiert werden können, welche wiederum, wie in Abschnitt 5.2.6 gezeigt, alleine nicht ausreichen, um innerhalb Deutschlands die Kalthandhabungskosten zu kompensieren.

Daher wird in einem nächsten Schritt zunächst die monatliche Preissteigerung pro Tonne und Monat zwischen Januar und Dezember schrittweise erhöht, um den Preisunterschied zu ermitteln, bei dem, an einem oder mehreren optimalen Standorten, neue Technologien angewendet werden. Abbildung 27 veranschaulicht das Vorgehen.

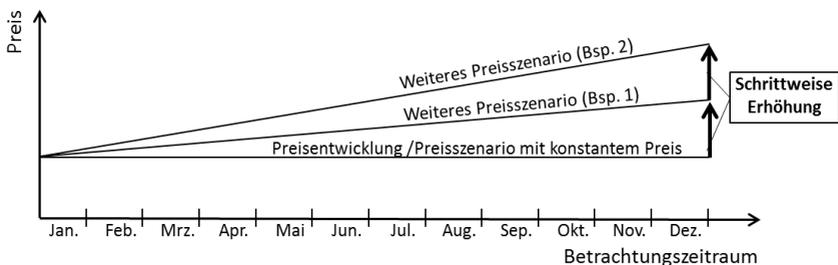


Abbildung 27: Erläuterung zur schrittweisen Erhöhung der Gesamtjahrespreissteigerung

Tabelle 6-6 stellt drei Ergebnisse dieser Untersuchung dar. Aus der Tabelle wird deutlich, dass bei einer zeitlichen Preisdifferenz ab zirka 80 € über das Gesamtjahr die Bitumenlagerung zur Kosteneinsparung dienen kann. Eine Kaltlagerung in Kartongebinden stellt in diesem Fall die günstigste Lagerungsvariante dar. Die minimale Menge der Kaltlagerhaltung, um an saisonalen Preisunterschieden zu partizipieren, beträgt demzufolge zirka 5.000 Tonnen.

Tabelle 6-6: Ergebnisse bei Variation der Gesamtjahrespreissteigerungen

Geänderte Daten gegenüber Basiskonfiguration	Konstante Preise (343,- €/t)	Preissteigerung von 78,- € jährlich (von 343,- €/t bis 421,- €/t)	Preissteigerung von 81,- € jährlich (von 343,- €/t bis 433,- €/t)
Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in €/a	13.144.790	14.824.190	14.884.990
Heißlagermengenanteil in t/ am Gesamtbedarf in %	0	0	0
Kaltlagermengenanteil in t/ am Gesamtbedarf in %	0	0	5.246/14
Heißlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	-	Hirschfeld (Kartongebinde/5.246)
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	-	Hirschfeld (Schmelztopf/2.314)
Verflüssigungsstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	-	

Weitere Untersuchungen zeigen, dass die beiden hier genannten Untergrenzen auch gelten, wenn die fiktiven Gesamtjahrespreissteigerungen sich nicht nur in monatlichen Preissprüngen entwickeln. Beliebige andere betragsmäßig und zeitlich unterschiedliche Einzelpreissprünge verdeutlichen den gleichen Zusammenhang zwischen Gesamtjahrespreissteigerung und Lagerstruktur und damit Gesamtkostenverlauf im Modell. Abbildung 28 stellt exemplarisch eine Gesamtkostenentwicklung (grau gestrichelt) mit den jeweiligen Kaltlagermengen (schwarz) in Abhängigkeit der Gesamtjahrespreisdifferenz dar, wie sie sich in den entsprechenden Untersuchungen zeigt. Die Gesamtjahrespreisdifferenz berechnet sich aus der Summe der Einzelpreissprünge.

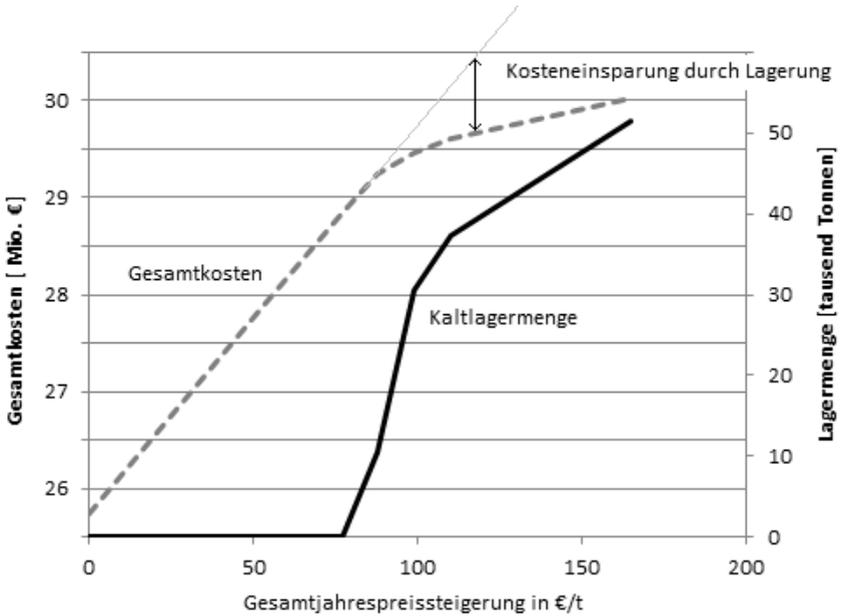


Abbildung 28: Jährliche Gesamtkosten und jährliche Gesamtlagermenge an Straßenbaubitumen im Modell in Abhängigkeit von fiktiven Gesamtjahrespreisdifferenzen

Mit zunehmender Gesamtjahrespreissteigerung nehmen die Gesamtkosten zunächst linear zu. Ab einer Gesamtjahrespreissteigerung von zirka 80 € kann mit Hilfe der Kaltlagerung eine Kosteneinsparung realisiert werden. Die Gesamtkostenfunktion knickt nach unten ab. Der weitere abgeknickte Verlauf (grau gestrichelt) der Gesamtkostenfunktion spiegelt die materialkostenbedingte Gesamtkostenzunahme bei optimaler Kaltlagerung wider.

Durch die Erhöhung der Gesamtjahrespreissteigerung und damit der Lagermengen im Modell wird berechnet, dass sich in dieser Reihenfolge die Standorte Hirschfeld, Köln-Niehl, Villingen und Hamburg-Mitte/Afrikakai, unabhängig von regionalen Preisschwankungen, am besten für die Lagerung und Wiederverflüssigung eignen. Auf die Untersuchung fiktiver *räumlicher* Preisdifferenzen wird verzichtet, da die so analysierbaren Kosteneinsparpotentiale durch Kalttransporte hierbei stark von der optimalen Standortkonfiguration abhängig sind.

6.6.2 Technologie- und Standortwahl bei unterschiedlichen Bedarfsdaten

Die Gesamtkostenstruktur in der Realität und im Modell ist stark von den Bedarfsmengen abhängig. Es gilt daher die Frage zu klären, ob alle oder nur einige ausgewählte Bitumensorten zukünftig mittels der Bitumenkaltlogistik gehandhabt werden. Deshalb werden drei unterschiedliche Bedarfsmengen im Modell berücksichtigt.

- 1) Bitumen 70/100
- 2) Straßenbaubitumen
- 3) Alle bitumenhaltigen Asphaltbindemittel

Bitumen 70/100 umfasst gemäß Unterabschnitt 6.6.2.1 lediglich das Straßenbaubitumen mit einer Nadeleindringtiefe zwischen 7,0 und 10,0 Millimetern im Penetrationsversuch nach DIN EN 1426 (2007). Hierfür liegen monatliche Mittel der jeweiligen Raffineriepreise der Jahre 2007 bis 2010 dem Modell zugrunde. Es werden pro Jahr zwischen 30.000 und 45.000 Tonnen 70/100 in den Asphaltmischstandorten des Modells benötigt.

Straßenbaubitumen umfasst Bitumen 70/100 und die Sorten Bitumen 30/45 und 50/70. Gemeinsam machen diese drei Sorten mit rund 70.000 Tonnen über die Hälfte des Bindemittelgesamtjahresbedarfs der Asphaltmischanlagen aus.

Die bitumenhaltigen Asphaltbindemittel, von denen jährlich über 120.000 Tonnen in den Asphaltmischanlagen des Referenzunternehmens Verwendung finden, beinhalten alle Straßenbaubitumen. Hinzu kommt eine Vielzahl modifizierter Bitumen, wie sie in Unterabschnitt 2.1.1.1 vorgestellt werden.

In dieser Modellvariation werden für die hinzugekommenen Bitumensorten keine neuen Produktindizes generiert, da diese Daten nicht verfügbar sind. Da es hierbei nur um die Untersuchung der Auswirkungen des Gesamtbedarfs auf das optimale Logistikkonzept geht, werden des Weiteren in allen Bedarfsszenarien die historischen Preise für 70/100 aus den Basisszenarien herangezogen. Zwar sind polymermodifizierte Bitumen größtenteils um rund 100 Euro pro Tonne teurer als die zur ihrer Herstellung benötigten Standardbitumen, doch verhalten sich die Preisschwankungen beider Stoffe betragsmäßig sehr ähnlich, da polymermodifiziertes Bitumen größtenteils aus Bitumen besteht (vgl. Unterabschnitt 2.1.1.1). Dies ermöglicht es, im Kontext des Modells, das in erster Linie Lagerkapazitäten aufgrund von Preisschwankungen bestimmt, beide Stoffe in dieser Weise zu vereinheitlichen. Die sich ergebenden Gesamtkosten sind

allerdings nicht mehr repräsentativ. Tabelle 6-7 stellt vorab die Berechnungsergebnisse aus einer Modellkonfiguration ohne Lagerungsoption dar.

Tabelle 6-7: Berechnung der jährlichen Gesamtkosten ohne Lagerhaltung

Jahre	2007	2008	2009	2010
Gesamtkosten zur Versorgung mit 70/100 in €/a	9.349.129	12.558.050	10.795.520	12.843.670
Gesamtkosten zur Versorgung mit Straßenbaubitumen in €/a	18.043.720	24.217.140	20.697.830	24.706.260
Gesamtkosten zur Versorgung mit allen bituminösen Bindemitteln in €/a	30.890.630	42.082.370	35.815.820	42.381.650

Die Gesamtkosten stellen das Ergebnis der Zielfunktion in der optimalen Versorgungskette ohne Lager dar. Sie können in den nachfolgenden Unterabschnitten mit den jeweiligen jährlichen Gesamtkosten der Versorgungskette mit Lagern verglichen werden.

6.6.2.1 Bitumen 70/100

Die Modellergebnisse für Bitumen 70/100 sind Tabelle 6-5 entnehmbar. Sie entsprechen den Ergebnissen der Basiskonfiguration des Modells. Lediglich in den Jahren 2008 und 2009 ist es möglich, die Gesamtkosten der Bitumenversorgungskette durch Bitumenlagerung zu reduzieren. Es sind zum Beispiel in 2008 Einsparungen von 2,1 % der jährlichen Gesamtkosten ohne Bitumenkalthandhabungsoption (12.558.050 €, dargestellt in Tabelle 6-7) mit einer Versorgungskette mit Lagerhaltung (12.263.980 € gemäß Tabelle 6-5) möglich. Hierfür kommen im Modell Kaltlager für Kartonagen (Tabelle 6-5 Zeile 6 Spalte 3 und Spalte 4) und Schmelztöpfe (Tabelle 6-5 Zeile 7 Spalte 3 und Spalte 4) zur Anwendung. Es werden maximal zwei Standorte pro Szenario für die Kalthandhabung identifiziert (Tabelle 6-5 Zeile 7 und Zeile 8 Spalte 3).

6.6.2.2 Straßenbaubitumen

Die Modellergebnisse für einen Bedarf, der dem des Straßenbaubitumens entspricht, können Tabelle 6-8 entnommen werden.

Tabelle 6-8: Ergebnisse unter Berücksichtigung aller Straßenbaubitumen

Jahre	2007	2008	2009	2010
Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in t€/a	18.044	23.455	20.486	24.706
Heißlagermengenanteil in t / am Gesamtbedarf in %	0	0	0	0
Kaltlagermengenanteil in t / am Gesamtbedarf in %	0	30.800/ 43	25.053/ 35	0
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Hirschfeld (Kartongebinde/ 14.651); Köln-Niehl (Kartongebinde/ 6.071); Villingen (Kartongebinde/ 4.585); Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 5.493)	Hirschfeld (Kartongebinde/ 11.652); Köln-Niehl (Kartongebinde/ 4.820); Villingen (Kartongebinde/ 4.139); Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 4.442)	-
Verflüssigungsstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Hirschfeld (Schmelztopf/ 3.919); Köln-Niehl (Schmelztopf/ 1.661); Villingen (Schmelztopf/ 1.388); Hamburg-Mitte (Schmelztopf/ 1.444)	Hirschfeld (Schmelztopf/ 3.582); Köln-Niehl (Schmelztopf/ 1.351); Villingen (Schmelztopf/ 1.311)	-

Es zeigt sich, dass wieder lediglich in den Jahren 2008 und 2009 Kosteneinsparungen durch die Kaltbehandlung von Bitumen erreichbar sind. Allerdings sind die Einsparpotentiale, auch in Bezug auf die erhöhten Gesamtkosten, größer. So können im Jahr 2008 3,1 Prozent und im Jahr 2009 1 Prozent der jährlichen Gesamtkosten mittels Kaltlagerung eingespart werden. Zum Einsatz kommen wiederholt Kartonagen für die Lagerung und Schmelztöpfe für die Bitumenverflüssigung. Es werden 2008 vier und 2009 drei Standorte ausgewählt, an denen, bis auf eine Ausnahme, sowohl die Lagerung als auch die Verflüssigung vorstattengehen. Hamburg dient in 2009 lediglich der Lagerung des Straßenbaubitumens.

6.6.2.3 Alle bituminösen Bindemittel

Die Umsetzung der Handhabung aller bituminösen Baustoffe in der Bitumenkaltlogistikkette ist praktisch mit großen technischen Schwierigkeiten verbunden. So gibt es bestimmte Vorschriften bezüglich der aufeinanderfolgenden Befüllung von Heißbehältern mit unterschiedlichen Bitumenspezifikationen [HuWö10]. Der Betrieb von Verflüssigungsanlagen, die naturgemäß an Bitumentanks angeschlossen sind, wäre damit zusätzlichen Restriktionen unterworfen, die im Modell nicht berücksichtigt sind. Andererseits werden zunehmend modifizierte Bitumen im Straßenbau eingesetzt. Die Vernachlässigung dieser bereits sehr großen Bedarfsmengen ist daher ebenso unangebracht. In der zukünftigen Handhabungspraxis müsste nach Bindemittelsorte differenziert werden und nur die Bitumensorten kalt gehandhabt werden, bei denen verhältnismäßig große Bedarfe an möglichst mehreren Standorten vorliegen. Die nachfolgenden Ergebnisse in Tabelle 6-9 sind daher unter dieser Einschränkung zu betrachten.

Tabelle 6-9: Ergebnisse unter Berücksichtigung aller bitumenhaltigen Bindemittel

Jahre	2007	2008	2009	2010
Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in t€/a	30.891	40.347	35.182	42.382
Heißlagermengenanteil in t/ am Gesamtbedarf in %	0	0	0	0
Kaltlagermengenanteil in t/ am Gesamtbedarf in %	0	58.216 / 43	48.804 / 35	0
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Loessau (Kartongebinde/ 22.463); Berlin-Ludwigsfelde (Kartongebinde/ 9.972); Köln-Niehl (Kartongebinde/ 7.352); Villingen (Kartongebinde/ 7.130); Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 11.299)	Loessau (Kartongebinde/ 18.346); Berlin-Ludwigsfelde (Kartongebinde/ 8.448); Köln-Niehl (Kartongebinde/ 7.585); Villingen (Kartongebinde/ 5.889); Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 8.536)	-
Verflüssigungsstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Berlin-Ludwigsfelde (Schmelztopf/ 2.937); Köln-Niehl (Schmelztopf/ 1.838); Villingen (Schmelztopf/ 2.249); Hamburg-Mitte (Schmelztopf/ 3.005)	Berlin-Ludwigsfelde (Schmelztopf/ 2.856); Köln-Niehl (Schmelztopf/ 2.387); Villingen (Schmelztopf/ 2.041); Hamburg-Mitte (Schmelztopf/ 2.799)	-

Die Tabelle zeigt, dass die größere Bedarfsmenge in der Modellvariante mit allen bituminösen Bindemitteln wie auch in der vorhergehenden Modellvariante

keinen Einfluss darauf hat, ob kaltes Bitumen teilweise gelagert oder ob die gesamte Bitumenmenge heißflüssig distribuiert wird. Wird allerdings, wie es bei Zugrundelegung der Preisdaten von 2008 und 2009 der Fall ist, Bitumen zur Gesamtkostenreduzierung eingelagert, so verstärkt sich der Trend (s.o.) zu erhöhten prozentualen Einsparungen. Im Jahr 2008 können 4,1 % der jährlichen Gesamtkosten eingespart werden. Die optimale Technologiekombination ist die Lagerung in Kartongebinden und die Verflüssigung in Schmelztöpfen. Sowohl für 2008 als auch für 2009 werden fünf Lagerstandorte berechnet, wovon vier auch als Verflüssigungsstandorte dienen. Der Asphaltmischanlagenstandort Loessau dient lediglich als vergleichsweise großes Lager, von dem aus die anderen Standorte beliefert werden.

6.6.3 Modellvariation

Bisher wurde davon ausgegangen, dass der Parameter γ im Modell 0,4 beträgt. Des Weiteren wurde keine Mindestlagermenge festgelegt. Beide Festlegungen haben Einfluss auf die Gestaltung der wirtschaftlich optimalen Logistikkette und werden daher in diesem Abschnitt verändert und die resultierenden Ergebnisse untersucht. Zunächst wird hierfür mit dem Parameter γ die Lieferantenrestriktion variiert (Unterabschnitt 6.6.3.1). Anschließend wird der Einfluss der Mindestlagermenge auf die Problemlösung untersucht (Unterabschnitt 6.6.3.2).

6.6.3.1 Variation der Lieferantenrestriktion

Bisher wird von der Standardkonfiguration des Parameters γ mit 0,4 ausgegangen. Mittels der Wahl dieses Parameters wird sichergestellt, dass jeder Lagerstandort aus mindestens drei Raffinerien beliefert wird. So wird die Unabhängigkeit von einzelnen Lieferanten sichergestellt. Wie in Tabelle 6-10 dargestellt, hat diese Restriktion die vergleichsweise stärkste Auswirkung auf die mittels der Bitumenkalthandhabung erreichbare Kostenreduktion.

Tabelle 6-10: Ergebnisse der Basiskonfiguration unter Weglassung der „Lieferantenrestriktion“

Jahre	2007	2008	2009	2010
Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in t€/a	9.350	11.950	10.561	12.844
Heißlagermengenanteil in t / am Gesamtbedarf in %	0	0	0	0
Kaltlagermengenanteil in t/ am Gesamtbedarf in %	0	16.690 / 45	15.532 / 42	0
Heißlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	-	-	-
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Dresden-Kaditz (Kartongebinde/ 6.752); Zwickau (Kartongebinde/ 9.938);	A.-Windischleuba (Kartongebinde/ 15.532)	-
Verflüssigungsstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Zwickau (Schmelztopf/2.726); Berlin-Ludwigsfelde (Schmelztopf/1.694)	A.-Windischleuba (Schmelztopf/ 3.869);	-

Die Tabelle zeigt, dass die jährlichen Gesamtkosten gegenüber den Berechnungsergebnissen der Basiskonfiguration (Tabelle 6-5) sinken. Dies liegt daran, dass es im Modell möglich wird, zu einem passenden Zeitpunkt in einer bestimmten Raffinerie beispielsweise den gesamten Jahresbedarf zu beschaffen. Durch Kaltlagerung wird es möglich, bis zu 4,8 % (2008) der jährlichen Gesamtkosten einzusparen. Die Gesamtlagermengen vergrößern sich vergleichsweise wenig. Es werden größtenteils andere Standorte als in den vorhergehenden Berechnungen bestimmt.

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit die berechneten Einsparpotentiale realistisch sind. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisdaten lässt sich feststellen, dass eine Raffinerie in dieser Modellvariante in einem Monat bis zu zirka 17.000 Tonnen Bitumen liefern muss (Tabelle 6-11 Zeile 4 Spalte 3 und Spalte 4). Dies ist in der Praxis eine verhältnismäßig große Menge, wie sie nicht immer

lieferbar ist [Hö10]. Auch eine Beeinflussung der Preise ist in einem solchen Fall nicht auszuschließen. Es wird daher versucht, mit Hilfe des Parameters γ lediglich sicherzustellen, dass jeder Lagerstandort von mehr als einer Raffinerie beliefert wird ($\gamma = 0,5$). Die Resultate der Berechnung stellt Tabelle 6-11 dar.

Tabelle 6-11: Ergebnisse der Basiskonfiguration für $\gamma = 0,5$ (mindestens zwei Lieferanten pro Lagerstandort)

Jahre	2007	2008	2009	2010
Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in €/a	9.349	12.191	10.716	12.844
Heißlagermengenanteil in t/ am Gesamtbedarf in %	0	0	0	0
Kaltlagermengenanteil in t/ am Gesamtbedarf in %	0	15.471/ 41	9.046/ 24	0
Heißlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	-	-	-
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Hermsdorfer Kreuz (Kartongebinde/ 11.823); Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 3.648);	Hirschfeld (Kartongebinde/ 9.038)	-
Verflüssigungsstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	-	Hermsdorfer Kreuz (Schmelztopf/3.462); Hamburg-Mitte (Schmelztopf/1.060)	Hirschfeld (Schmelztopf/ 2.488);	-

Es zeigt sich, dass Einsparungen von bis zu 3 % (2008) mittels der Kaltbehandlung von Bitumen 70/100 möglich sind, wenn die Mindestanzahl an Lieferanten auf 2 reduziert wird.

6.6.3.2 Variation der Mindestlagermenge

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Vorgabe einer Mindestlagermenge die Untersuchungsparameter beeinflusst. Die Mindestlagermenge wird auf 10.000, 20.000 und 30.000 gesetzt. Um den Aufwand dieser Variationen zu verringern, wird lediglich die Basiskonfiguration für 2010 untersucht, in der bisher Just-in-time-Handhabung immer als am wenigsten kostenintensiv identifiziert wurde.

Es sind durch die neue Restriktion daher zusätzliche Kosten zu erwarten. Tabelle 6-12 stellt die Ergebnisse dar.

Tabelle 6-12: Ergebnisse bei Variation der Mindestlagermenge in 2010

Geänderte Parameter gegenüber Basis-konfiguration (2010)	Mindestkaltlager-menge 10.000 t	Mindestkaltlager-menge 20.000 t	Mindestkaltlager-menge 30.000 t
Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in €/a	13.170.700	13.524.760	13.944.330
Kostenzuwachs gegenüber Basis-konfiguration in %	2,5	5,3	8,6
Kaltlagermengen-anteil in t/ am Gesamtbedarf in %	10.000/ 27	20.000/ 54	30.000/ 80
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 6.039);	Hirschfeld (Kartongebinde/ 4.453); Villingen (Kartongebinde/ 3.774); Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 4.467);	Hirschfeld (Kartongebinde/ 6.879); Villingen (Kartongebinde/ 4.391); Köln-Niehl (Kartongebinde/ 4.054); Hamburg-Mitte (Kartongebinde/ 4.443);
Verflüssigungs-standort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	Hamburg-Mitte (Schmelz- topf/1480);	Hirschfeld (Schmelztopf/ 1.577); Villingen (Schmelztopf/ 674); Hamburg-Mitte (Schmelztopf/ 1.060);	Hirschfeld (Schmelztopf/ 1.964); Villingen (Schmelztopf/ 762); Köln-Niehl (Schmelztopf/ 567); Hamburg-Mitte (Schmelztopf/ 1.273);

Die Tabelle verdeutlicht, dass gemäß den Berechnungsergebnissen des Modells die Vorgabe von Mindestlagermengen verhältnismäßig große Kosten verur-

sacht. So führt bereits die Vorgabe, mindestens 10.000 Tonnen Bitumen 70/100 während dem Betrachtungsjahr 2010 einzulagern, zu einem prozentualen Gesamtkostenzuwachs von 2,5 %. Es ist davon abzuraten, das Tagesgeschäft mit derartigen Vorgaben zu beeinflussen. Als einzige Ausnahme dürfte gelten, dass das Referenzunternehmen gezielt Mehrkosten in Kauf nimmt, um die Bitumenversorgung abzusichern.

6.6.4 Kombination von Parametervariationen

Nachdem in den vorhergehenden Unterabschnitten aufgezeigt werden konnte, inwieweit einzelne Daten- oder Parameteränderungen die Untersuchungsgrößen beeinflussen, wird nun anhand einiger repräsentativer Änderungskombinationen die wechselseitige Wirkung von Veränderungen auf die Berechnungsergebnisse untersucht. Da sich gezeigt hat, dass die Mindestanzahl an Lieferanten der Lagerstandorte den bisher größten Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse hat, wird wiederholt mit einer Anzahl von mindestens zwei Lieferanten ($y = 0,5$) gerechnet. Diesmal wird zusätzlich der Bitumenbedarf an Straßenbaubitumen und allen bituminösen Asphaltbindemitteln angesetzt. Es werden die Preisdaten der Basiskonfigurationen der Versorgungskette in 2008 und 2009 angesetzt. Die Anwendung der Kaltlagerung im Modell ist von den saisonalen Preisunterschieden (ab zirka 80 €/t s.o.) abhängig. Die Untersuchung der Jahre 2007 und 2010 ist folglich uninteressant. Tabelle 6-13 stellt die Ergebnisse der vier sich ergebenden Berechnungen dar.

Tabelle 6-13: Ergebnisse bei unterschiedlichen Bedarfsmengen für $y = 0,5$ (mindestens zwei Lieferanten pro Lagerstandort)

Geänderte Parameter gegenüber Basis-konfiguration	Bedarf an Stra- ßenbau- bitumen; Preise von 2008	Bedarf an Stra- ßenbau- bitumen; Preise von 2009	Bedarf an allen bitumen- haltigen Asphalt- bindemitteln; Preise von 2008	Bedarf an allen bitumen- haltigen Asphalt- bindemitteln; Preise von 2009
	Gesamtkosten gemäß Zielfunktion in €/a	23.327.440	20.421.620	40.107.840
Kostenreduzierung gegenüber gleichem Modell ohne Lageroption in %	3,7	1,3	4,7	2,1
Kaltlagermengen-anteil in t/ am Gesamt	31.482 / 44	27.805 / 39	60.041 / 49	52.288 / 43

Geänderte Parameter gegenüber Basis-konfiguration	Bedarf an Stra- ßenbau- bitumen; Preise von 2008		Bedarf an Stra- ßenbau- bitumen; Preise von 2009		Bedarf an allen bitumen- haltigen Asphalt- bindemitteln; Preise von 2008		Bedarf an allen bitumen- haltigen Asphalt- bindemitteln; Preise von 2009	
	bedarf in %							
Kaltlagerstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	Hirschfeld (Kartonagen /16.098); Köln-Niehl (Kartonagen /5.689); Villingen (Kartonagen /4.585); Hamburg-Mitte (Kartonagen /5.110);	Ladeburg (Kartonagen /8.671); Köln-Niehl (Kartonagen /5.502); Villingen (Kartonagen /4.216); Altenburg-Windischleuba (Kartonagen /9.416);	Berlin-Ludwigsfelde (Kartonagen /10.088); Köln-Niehl (Kartonagen /5.953); Villingen (Kartonagen /7.130); Hamburg-Mitte (Kartonagen /11.500); Hermesdorfer Kreuz (Kartonagen /25.370);	Berlin-Ludwigsfelde (Kartonagen /8.895); Köln-Niehl (Kartonagen /7.568); Villingen (Kartonagen /6.246); Hamburg-Mitte (Kartonagen /9.969); Lössau (Kartonagen /19.610);				
Verflüssigungsstandort (Art/Kapazität in t p. Mon.)	Hirschfeld (Schmelztopf /3.922); Köln-Niehl (Schmelztopf /1.470); Villingen (Schmelztopf /1.388); Hamburg-Mitte (Schmelztopf /1.444);	Ladeburg (Schmelztopf /2.740); Köln-Niehl (Schmelztopf /1.543); Villingen (Schmelztopf /1.388); Altenburg-Windischleuba (Schmelztopf /2.425);	Berlin-Ludwigsfelde (Schmelztopf /2.882); Köln-Niehl (Schmelztopf /1.838); Villingen (Schmelztopf /2.249); Hamburg-Mitte (Schmelztopf /3.206); Hermesdorfer Kreuz (Fassschmelzler /5.664);	Berlin-Ludwigsfelde (Schmelztopf /2.856); Köln-Niehl (Schmelztopf /2.370); Villingen (Schmelztopf /2.249); Hamburg-Mitte (Schmelztopf /2.799); Lössau (Fassschmelzler /5.664);				

Geänderte Parameter gegenüber Basis-konfiguration	Bedarf an Stra- ßenbau- bitumen; Preise von 2008	Bedarf an Stra- ßenbau- bitumen; Preise von 2009	Bedarf an allen bitumen- haltigen Asphalt- bindemitteln; Preise von 2008	Bedarf an allen bitumen- haltigen Asphalt- bindemitteln; Preise von 2009
			/6.751);	

Gemäß den dargestellten Berechnungsergebnissen wird deutlich, dass eine zusätzliche Erhöhung der Kaltlagermengen durch die Veränderung der beiden Ausgangsparameter Mindestlieferantenanzahl und Bedarfsmengen verursacht wird. Dies wiederum ermöglicht zusätzliche Kosteneinsparungen im Modell. So können bei der Anwendung der Kaltlagerung auf alle bituminösen Bindemittel im Jahr 2008 4,7 % der Gesamtkosten eingespart werden. Hierfür wird fast die Hälfte des Gesamtjahresbedarfs kalt gelagert. Heißlagerung würde nicht so stark zur Kostenreduktion beitragen und wird deshalb im Modell nicht angewendet. Deutlich wird auch, dass bei sehr großen Verflüssigungsmengen, wie sie am Hermsdorfer Kreuz und in Lössau anfallen, der Einsatz von Fassschmelzern günstiger ist.

Da der Einfluss der Mindestanzahl an Lieferanten auf die Kosteneinsparpotentiale eindeutig identifiziert werden konnte, stellt sich abschließend noch die Frage, ob in Kombination mit erhöhten Bedarfsmengen bereits die geringen Preisschwankungen in 2007 und 2010 ausreichen, um die Kalthandhabung zur Kostenreduktion einzusetzen. Hierzu wird das Problem abermals dahingehend umformuliert, dass die Restriktion hinsichtlich der Mindestanzahl an Lieferanten für einen Lagerstandort gänzlich weggelassen wird. Es wird außerdem der Bedarf aller bituminösen Asphaltbindemittel implementiert.

Nach Lösung der beiden Berechnungen mit den Preisdaten aus 2007 und 2010 lässt sich feststellen, dass trotz der extremen Umformulierung des Problems die Kaltlagerung nicht zur Kostenreduktion führt. Auch die Heißlagerung findet keine Anwendung. Letztendlich lässt sich daraus der Zusammenhang ableiten, dass zuerst der Preis und erst bei entsprechend großen Preisschwankungen der Bedarf die Lagerkapazitäten beeinflusst.

6.7 Abschließende Betrachtung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird modellhaft die Integration der Technologiekombinationen der Bitumenkalthandhabung in die Asphaltbindemittellogistik vorgenommen.

men. Hierzu werden zunächst verschiedene Methoden der Standort- und Kapazitätsplanung verglichen und ein Digraph der Bitumenversorgungskette erarbeitet. Daraufhin wird die Vorgehensweise bei der Datenwahl und der Modellkonfiguration erläutert, um anschließend das Planungsproblem formal vorzustellen. Sowohl Modelldaten als auch -parameter werden zuletzt variiert, um die möglichen Einflüsse der neuen Technologien auf die Bitumenversorgungskette abschätzen zu können. In diesem Abschnitt wird ein abschließender Überblick über die Analyseergebnisse gegeben (Unterabschnitt 6.7.1) und diese werden kritisch erörtert (Unterabschnitt 6.7.2). Abschließend wird ein Ausblick auf weiterführende Entwicklungsmöglichkeiten des Modells gegeben (Unterabschnitt 6.7.3).

6.7.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

An dieser Stelle wird ein zusammenfassender Gesamtüberblick über die Berechnungsergebnisse aus der Variation von Preis- und Bedarfsdaten und einzelner Modellparameter gegeben. Prinzipiell gilt, dass bei ausreichend großen Jahrespreisschwankungen die Bitumenkalthandhabung zur Kostenreduktion genutzt werden kann. Durch die Lagerung des Bitumens wird es, wie in Abbildung 29 dargestellt, möglich, Materialkosten einzusparen. Die anfallenden Lagerkosten werden dadurch überkompensiert.

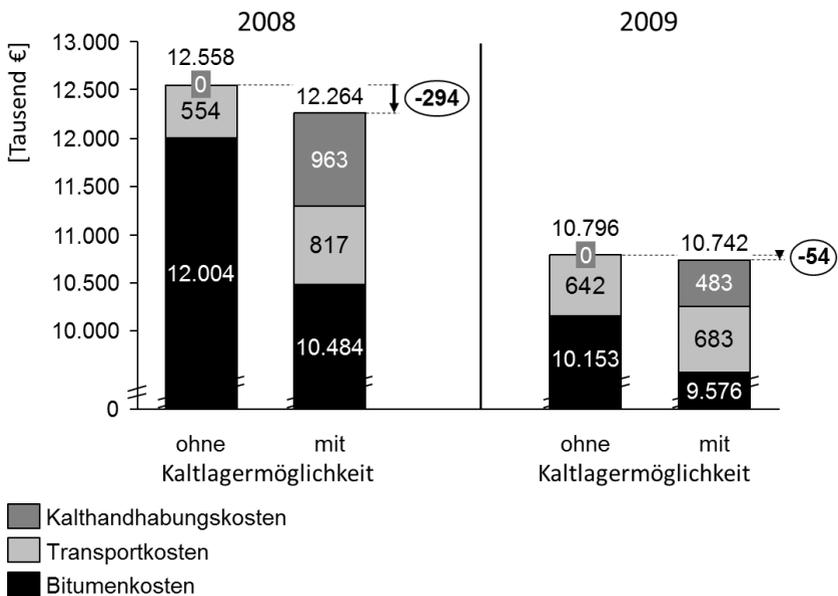


Abbildung 29: Gesamtkostenzusammensetzung mit und ohne Kaltlagermöglichkeit in tausend Euro in der Basiskonfiguration des Modells für (links) 2008 und (rechts) 2009

Abbildung 29 macht deutlich, dass nicht zwangsläufig eine Reduktion der Kosten bei Kalthandhabung eintreten muss, da zusätzliche Handhabungskosten entstehen und die Transporte zu und von den Lagerstandorten zusätzliche Transportkosten verursachen. Diese können aber durch die Materialkostenreduktion überkompensiert werden, wenn saisonale Preisunterschiede wie in den Jahren 2008 und 2009 auftreten.

Tabelle 6-14 stellt unter anderem die prozentualen Kosteneinsparungen durch Kaltlagerung auf Grundlage der jeweiligen jährlichen Preisstrukturen dar. Auf die Darstellung der Lagerungsform (heiß oder kalt) wird hierbei verzichtet, da die Heißlagerung in den Berechnungsergebnissen nicht als Möglichkeit der Kostenreduktion identifiziert werden konnte. Bei der Wahl der Technologiekombination für die Kalthandhabung werden zumeist Kartonverpackungen und Schmelztöpfe zur Kostenminimierung angewendet.

Tabelle 6-14: Übersicht über die Berechnungsergebnisse

Geänderte Parameter gegenüber Basiskonfiguration	Preisstruktur aus Jahr	Gesamtkosten in €	Prozentuale Kosteneinsparung
Basiskonfiguration	2007	9.349.129	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2007 ohne Kaltlageroption
	2008	12.263.980	2,3 % gegenüber Basiskonfiguration 2008 ohne Kaltlageroption
	2009	10.741.970	0,5 % gegenüber Basiskonfiguration 2009 ohne Kaltlageroption
	2010	12.843.670	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2010 ohne Kaltlageroption
Bedarfsdaten für alle Straßenbaubitumen	2007	18.043.720	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2007 für alle Straßenbaubitumen ohne Kaltlageroption
	2008	23.455.280	3,1 % gegenüber Basiskonfiguration 2008 für alle Straßenbaubitumen ohne Kaltlageroption
	2009	20.486.330	1,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2009 für alle Straßenbaubitumen ohne Kaltlageroption
	2010	24.706.260	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2010 für alle Straßenbaubitumen ohne Kaltlageroption
Bedarfsdaten für alle bitumenhaltigen Asphaltbindemittel	2007	30.890.630	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2007 für alle bitumenhaltigen Asphaltbindemittel ohne Kaltlageroption
	2008	40.346.950	4,1 % gegenüber Basiskonfiguration 2008 für alle bitumenhaltigen Asphaltbindemittel ohne Kaltlageroption
	2009	35.182.280	1,8 % gegenüber Basiskonfiguration 2009 für alle bitumenhaltigen Asphaltbindemittel ohne Kaltlageroption
	2010	35.182.280	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2010 für alle bitumenhaltigen Asphaltbindemittel ohne Kaltlageroption
Mindestanzahl an Lieferstandorten	2007	9.349.129	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2007 ohne Kaltlageroption

Geänderte Parameter gegenüber Basiskonfiguration	Preisstruktur aus Jahr	Gesamtkosten in €	Prozentuale Kosteneinsparung
für einen Lagerstandort beträgt 2 statt 3	2008	12.190.500	2,9 % gegenüber Basiskonfiguration 2008 ohne Kaltlageroption
	2009	10.715.960	0,7 % gegenüber Basiskonfiguration 2009 ohne Kaltlageroption
	2010	12.843.670	0,0 % gegenüber Basiskonfiguration 2010 ohne Kaltlageroption

Die Standortwahl wird mittels einer zeitlichen Variation von regional einheitlichen Preisdaten vorgenommen. Dadurch wird sichergestellt, dass historische räumliche Preisinhomogenität die Standortwahl nicht beeinflusst. Es stellt sich heraus, dass ab einer zeitlichen Preisdifferenz von zirka 80 €/t über das Gesamtjahr der Standort Hirschfeld (Abbildung 30: Expansionsstufe 1) für die Kaltlagerung in Kartonagen und die Wiederverflüssigung des Bitumens in Schmelztöpfen genutzt wird. Ab einer Preisdifferenz von zirka 100 €/t werden zusätzlich die Standorte Köln-Niehl, Villingen und Hamburg-Mitte/Afrikakai (Abbildung 30: Expansionsstufe 2) mit derselben Technologiekombination ausgestattet. Ab einer Preisdifferenz von 120,- €/t über das Gesamtjahr wird der Standort in Hirschfeld durch zwei neue Standorte in Berlin Ludwigsfelde und Altenburg-Windischleuba (Abbildung 30: Expansionsstufe 3) mit gleicher Technologieausstattung ersetzt.

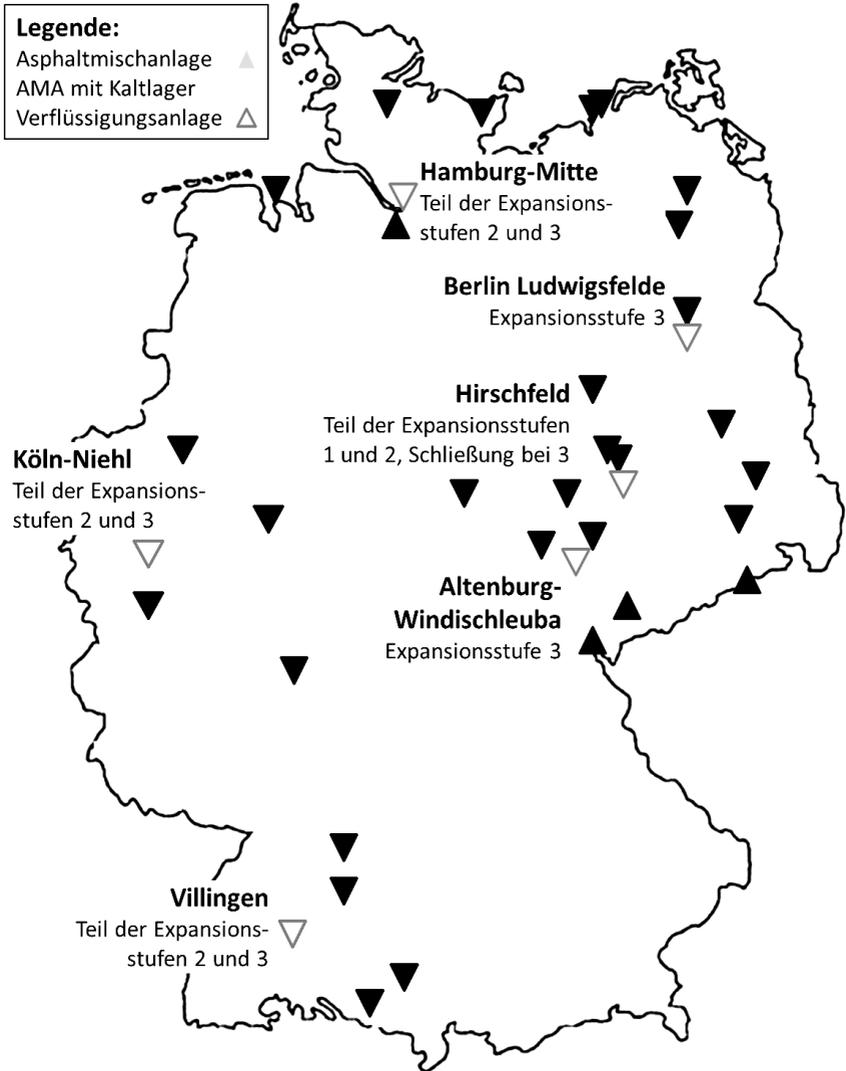


Abbildung 30: Standortwahl für Bitumenkaltlagerung und Wiederverflüssigung in drei Expansionsstufen

Die Standortexpansion in der Abbildung wird auf Grundlage der Steigerung fiktiver saisonaler Preisdifferenzen im Modell bestimmt. Räumlich konstante zeit-

liche Veränderungen des Bitumenbedarfs haben keine derartigen Auswirkungen auf Standortwahl, -kapazität und -spezifikation.

6.7.2 Diskussion der Berechnungsergebnisse

Die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen haben eine Vielzahl von Ergebnissen hervorgebracht und lassen daher verschiedenste Interpretationen zu. Neben der Darstellung der vorangegangenen Unterabschnitte 6.6.1, 6.6.2, 6.6.3 und 6.6.4, in denen einzelne oder mehrere Parameter des Modells variiert und die Berechnungsergebnisse interpretiert wurden, gilt es nun, grundlegende Empfehlungen für die Bitumendistribution in Deutschland abzuleiten. Dies erfolgt in Unterabschnitt 6.7.2.1. Ebenso müssen die in den genannten Abschnitten gemachten Interpretationen ebenso wie der Lösungsansatz kritisch hinterfragt und eingeschränkt werden. Dies erfolgt in Unterabschnitt 6.7.2.2.

6.7.2.1 Empfehlungen

Unabhängig von den berechneten Standort-, Kapazitäten- und Technologieempfehlungen, die naturgemäß referenzunternehmensspezifisch sind, lassen sich aus den Berechnungsergebnissen grundsätzliche Erkenntnisse ableiten, die unternehmensübergreifende Gültigkeit besitzen. So werden bei der Problemformulierung drei generelle Logistikkonzepte einander gegenübergestellt. Zur Minimierung der Kosten besteht die Möglichkeit der Just-in-time-Logistik, der Heiß- und der Kaltlagerung. In allen Modellierungsergebnissen, wird ein überwiegender Teil der in den jeweiligen Betrachtungszeiträumen von einem Jahr benötigten Bitumenmengen Just-in-time gehandhabt. Dies entspricht der Handhabungspraxis in den allermeisten bitumenverarbeitenden Betrieben in Deutschland. Daneben ergeben einige Berechnungsergebnisse, dass bei ausreichend großen Preisanstiegen im Betrachtungszeitraum die Kaltlagerung zur Kostenreduktion genutzt werden kann. Die Heißlagerung kommt im Modell zu diesem Zweck nicht zum Einsatz. Hier liegt nun eine Abweichung von der Praxis vor (vgl. Unterabschnitt 2.3.1). Sowohl im Referenzunternehmen als auch in anderen bitumenverarbeitenden Betrieben in Deutschland werden große Mengen Bitumen zur Versorgungssicherung – und damit unabhängig von verfahrenstechnischen Erfordernissen in der Produktion – heißflüssig gelagert. Nur in den seltensten Fällen kommt in der Praxis eine Kaltlagerung vor.

Die Erklärung für diese Diskrepanz zwischen Realität und Modell ist in der Kostenstruktur der Heißlager zu finden. Während in der Problemformulierung die Kosten für den Neubau von Heißlagerkapazitäten den Kosten für den Neubau von Kaltlagerkapazitäten gegenübergestellt werden, bestehen die Heißlager

teilweise seit Jahrzehnten. Der Instandhaltungsaufwand ist dadurch nicht zwangsläufig viel größer. Den Betreibern ist es damit allerdings möglich, die Lagerkapazitäten zu produzentenfreundlicheren Konditionen anzubieten, als sie bei der Problemformulierung berücksichtigt werden.

Eine Veränderung der Lager- und damit Handhabungsart von der Heiß- zur Kalthandhabung ist daher als mittel- bis langfristiger Prozess im Zuge der Erneuerung der Lagerkapazitäten zu empfehlen. Diese Empfehlung gilt insbesondere für das Referenzunternehmen, kann aber auch für andere bitumenverarbeitende Betriebe Gültigkeit haben. Die unternehmensspezifische Untersuchung ist mittels des formulierten Modells unter Einbeziehung der jeweiligen Randbedingungen des Produktionsbetriebes möglich. Bei der Ergebnisbetrachtung sind stets die nachfolgend dargestellten Einschränkungen zu betrachten.

6.7.2.2 Einschränkungen

Der Zweck des Modells ist es, gemäß seiner Zielfunktion die Kosten zu minimieren. Es kann allerdings auch als sinnvoll erachtet werden, Mehrkosten zur Sicherung der Bitumenversorgung in Kauf zu nehmen. In einem solchen Fall kann auch modellunabhängig entschieden werden, welche Kapazitäten zur Bedarfsicherung benötigt werden. Die dadurch anfallenden Kosten lassen sich mittels der Betrachtungen in Kapitel 5 berechnen.

Bei der Betrachtung von Modellergebnissen ist stets zu beachten, dass die Preise des Gesamtjahres vorab implementiert sind. In der Realität sind die berechneten Einsparpotentiale damit kaum erreichbar. Die berechneten Einsparungen durch Kalthandhabung unter Zugrundelegung der Preise des Jahres 2008 von 2,3 % der Gesamtkosten wären beispielsweise nur erreichbar gewesen, wenn die Jahrespreise aller Raffinerien im Voraus bekannt gewesen wären.

Zu beachten ist außerdem, dass lediglich die angesetzten Jahrespreise historischen Charakter haben. Standorte und Bedarfe werden aus aktuellen Daten generiert. So kann es vorkommen, dass mittels der historischen Jahrespreisdaten Standorte bestimmt werden, die in den jeweiligen Jahren noch nicht existierten.

Für die Zukunft bedeutet dies, dass bei Anwendung des Modells auch Vorhersagen über die Bedarfe der Produktionsstätten gemacht werden müssen.

Trotz der beiden zuletzt genannten Unsicherheiten in den Ausgangsdaten (Standorte und Bedarf) können die hier für das Referenzunternehmen berechneten Ergebnisse als hinreichend aussagekräftig gelten. Dies liegt insbesondere

daran, dass der Gesamtbedarf aller Anlagen sich von Jahr zu Jahr nur geringfügig verändert, während die Standortwahl auf Grundlage aktueller Standortspezifika und räumlich konstanter Preisdaten (siehe oben) erfolgte. Einzelne Asphaltmischanlagen verfügen über eine gewisse Mobilität. Dies wird nicht mitberücksichtigt.

Anschließend werden die berechneten Kapazitäten noch kritisch betrachtet. Die Lager- und Verflüssigungskapazität eines gewählten Standorts wird im Modell berechnet, indem das maximal anfallende jeweilige Leistungsvolumen eines Zeitintervalls (Monat) des jeweiligen Standorts herangezogen wird. Die sich hieraus ergebenden kapazitätsbezogenen Kosten fallen anschließend über den gesamten Betrachtungszeitraum (Jahr) an den Technologiestandorten an. In der Praxis kann es an den Verflüssigungsstandorten allerdings vorkommen, dass in nur wenigen Tagen große Mengen des Baustoffs bereitgestellt werden müssen. In der groben zeitlichen Auflösung (Monat) des Modells findet dies keine Berücksichtigung. Um dieses Problem genauer zu untersuchen, wird zunächst festgestellt, dass ein Verflüssigungsstandort maximal eine große Asphaltmischanlage pro Tag komplett versorgen muss. Hieraus ergibt sich eine maximale Verflüssigungsleistung von zirka 12 Tonnen Bitumen pro Stunde. Dies hätte eine maximale Verflüssigungskapazität von 1920 (Betriebszeit: 8 h/d; 20 d/mon) Tonnen pro Monat zur Folge. Diese wiederum werden in der Realität, wie im Modell, das gesamte Jahr vorgehalten. Die für die Umsetzung entscheidenden Modellergebnisse des Abschnitts 6.6.1.2 zeigen, dass mit minimal rund 2300 Tonnen pro Monat Kapazitäten ausreichender Größe berechnet werden, um den angenommenen maximalen stündlichen Bedarf von 12 t/h zu decken. Die grobe zeitliche Auflösung nach Monaten im Modell hat daher keinen Einfluss auf die Qualität der berechneten standortspezifischen Kapazitäten.

Schließlich gilt es noch zu hinterfragen ob die in den Unterabschnitten 6.6.1, 6.6.2, 6.6.3 und 6.6.4 getätigten Interpretationen richtig sind. Hierzu ist festzuhalten, dass diese in jedem Fall auf den verwendeten Anwendungsfall beschränkt sind und nicht vollumfänglich auf andere Unternehmen oder Märkte übertragen werden können. Hierzu ist eine Neukonfiguration der Modellparameter sowie eine Nebenrechnung mit den jeweiligen Daten des betrachteten Problems notwendig. Allgemeingültige Interpretationen werden lediglich in Unterabschnitt 6.7.2.1 getätigt.

6.7.3 Ausblick auf Entwicklungsmöglichkeiten des Modells

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell kann herangezogen werden, um Versorgungsketten unterschiedlichster Ausprägung zu optimieren. Einerseits ist es

möglich die Datengrundlage (Standorte und ihre Distanzen, Bedarf, Preise) an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen, als auch die Kostenfunktionen, die in das Modell integriert werden, zu modifizieren. Ein Hersteller von Dachbahnen oder ein internationaler Bitumendistributor kann beispielsweise nur unter Zugrundelegung seines Standortkonzepts berechnen unter welchen Voraussetzungen die Bitumenkalthandhabung für Teile der jeweiligen Versorgungsketten geeignet ist. Gerade in diesem Beispiel können die integrierten Kostenfunktionen dazu dienen, die zukünftigen Kosten für die Kalthandhabungstechnologien und ihre Potentiale gegenüber Heißhandhabung abzuschätzen. Hierzu ist es auch möglich das Modell auf eine spezifischere Betrachtung von Bitumensorten zu erweitern.

Daneben sind zahlreiche methodische Erweiterungen denkbar. So wäre es denkbar, das Modell als aktors- oder agentenbasiertes Modell auszuführen, bei dem die einzelnen Liefer- und Produktionsstandorte eigenständig agieren bzw. lernen. Des Weiteren könnte das Modell um statistische Berechnungen erweitert werden, die es ermöglichen die Vorhersageproblematik der Bitumenpreise genauer zu analysieren, und in den Entscheidungsprozess einzubeziehen.

7 Ökologische Bewertung von Methoden der Bitumenhandhabung

Nachdem in Kapitel 6 die Technologiekombination ermittelt werden, mit der das Referenzunternehmen seine Bitumenlogistik optimal gestalten und somit Gesamtkosten einsparen kann, werden die zur Anwendung kommenden Technologien in diesem Abschnitt unter ökologischen Gesichtspunkten der Heißhandhabung gegenübergestellt. Durch eine ökobilanzielle Bewertung von Heiß- und Kaltlagerung und den hierdurch bedingten Handhabungsschritten wird eine Entscheidungsfindung bei der Technologieauswahl zusätzlich unterstützt.

Zunächst werden die Vorüberlegungen dargelegt, die Methodik bei der Erstellung von ökologischen Bewertungen vorgestellt und schließlich wird eine Ökobilanzierung nach ISO 14044 (2006-10) und ISO 14040 (2009-11) durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.

7.1 Grundlegendes zur Ökobilanzierung

Zunächst seien hier einige grundlegende Begriffe erklärt. Ökobilanzen sind in ISO 14044 (2006-10) (ISO06) definiert als „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Output-Flüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“. Es wird also nicht ein Zustand des betrachteten Gegenstandes untersucht, sondern sein gesamter Lebensweg [HeGuHuLa92a], wobei ISO 14040 (2009-11) (ISO09) den Lebensweg als aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung definiert. Das heißt, es können Produkte oder Prozesse bewertet werden. Die Ökobilanzierung hilft unter anderem „beim Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften“ und dient dazu, Entscheidungsträger entsprechend zu informieren [ISO09].

Hierzu werden folgende Phasen einer Ökobilanz-Studie beschrieben [Ko09]:

- 1) Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- 2) Erstellung der Sachbilanz
- 3) Durchführung der Wirkungsabschätzung
- 4) Optional: Normierung und Gewichtung
- 5) Auswertung

Die vorgesehene Anwendung beeinflusst in der ersten Phase die Studie hinsichtlich ihres Betrachtungsrahmens, also die Systemgrenzen der Ökobilanz. Die Phase der Sachbilanzerstellung kann als Bestandsaufnahme über Input- und Output-Daten verstanden werden. In der Literatur wird hier oft auf Sachbilanzergebnisse von Stoff- und Energiestrommodellierungen zurückgegriffen, die im Kontext früherer Untersuchungen bereits erstellt wurden. In der dritten Phase der Wirkungsabschätzung wird die Umweltrelevanz des Produktsystems abgeschätzt. Schließlich dient die Auswertung der Berechnungsergebnisse als Basis für Schlussfolgerungen und Verbesserungsvorschläge zur Modifikation der Prozesskette.

Enthält eine Ökobilanz keine Wirkungsabschätzung, so wird von einer Sachbilanz-Studie gesprochen. Sie ist naturgemäß eine Vorstufe der ökologischen Bewertung, darf aber laut ISO 14040 [ISO09] nicht mit der oben beschriebenen Ökobilanz-Studie verwechselt werden. Beide Studien werden in der Norm beschrieben. Sowohl die Norm als auch Heijungs [HeGuHuLa92a] weisen ausdrücklich darauf hin, dass Ökobilanzen im Kontext mit anderen Untersuchungen wie ökonomischen Analysen des Produktionssystems gesehen werden müssen.

Viele Umweltbehörden weltweit haben inzwischen Open-source-Datenbanken angelegt, in denen nicht nur Daten zur Erstellung von Stoffbilanzen der wichtigsten industriellen Grundstoffe, sondern auch ein Katalog an Entwicklungen im Bereich der Methodik zur Verfügung stehen. So stellt das Umweltbundesamt (UBA) die GEMIS-Datenbank unter anderem zur Bestimmung des kumulierten Energieaufwands eines Produktionssystems kostenlos zur Verfügung. Das „Environmental Protection Agency“ in den USA pflegt darüber hinaus eine Datenbank aller Ökobilanz-Datenbanken weltweit, einschließlich Veröffentlichungen jeder Art in diesem Bereich [EPA11].

7.2 Stand der ökologischen Bewertung in der Asphaltindustrie

In gleichem Maße, in dem die Methoden der Ökobilanzierung in Wissenschaft und Industrie insgesamt an Bedeutung gewonnen haben, nahmen sie auch Einfluss auf die Untersuchung verschiedenster Produktsysteme der Asphaltproduktion. Eine kurze Auflistung der bedeutendsten bisherigen Veröffentlichungen im Bereich Ökobilanzierung in der Straßenbauindustrie liefern Huang, Bird und Heidrich [HuBiHe09]. So wurde zunächst zwischen 1993 und 1995 erstmals ein Sachbilanz-Modell über den Lebenszyklus von Straßen von der „Schwedischen Nationalen Straßenverwaltung“ entwickelt (Eine zweite Auflage erfolgte in 2001) [St01]. 1998 wurde von der „European Asphalt Pavement Association“ (EAPA) und Eurobitume eine Sachbilanzanalyse erstellt, die sich insbesondere mit Asphalt und Asphalt-Recycling-Material (RC) beschäftigte (Die dritte Auflage wurde 2005 veröffentlicht) [St05]. In der Zwischenzeit wurde bis 1999 eine Ökobilanz für den Baustoff Bitumen erstellt, die alle Produktionsschritte von der Rohölgewinnung bis zum Raffinerieprodukt umfasst. Diese Studie wurde ebenfalls von Eurobitume in Auftrag gegeben [Eu99]. Das Technische Forschungszentrum Finnlands (VTT) veröffentlichte zunächst 1996 eine vergleichende Ökobilanz von Asphalt und Betonfahrbahnen [HäMä96], auf deren Grundlage 2001 vom VTT eine Ökobilanz zur Nutzung von industriellen Nebenprodukten in Straßen erarbeitet wurde [MrEsLa01]. Birgisdottir von der Technischen Universität Dänemarks (DTU) erarbeitete 2005 eine Ökobilanz für den Einsatz von Schlacke aus der städtischen Abfallverbrennung in Straßen [Bi05]. Schließlich wurde in Großbritannien vom „Built Research Establishment“ (BRE) ab 1998 eine Datenbank „Environmental Profiles“ angelegt, die den Ressourcenverbrauch von Baustoffen und Bauprodukten ebenso umfasste wie die Methoden, Ökobilanzen auf den Bausektor anzuwenden [HoEdAn99]. Im gesamten Bausektor sind Ökobilanzen in den letzten Jahren immer mehr in den Mittelpunkt der Betrachtungsweisen im Sinne des „nachhaltigen Bauens“ gerückt.

7.3 Stand der ökologischen Bewertung von Asphaltbindemitteldistributionssträngen

Die Bindemittelversorgungskette zwischen Raffinerien und den Produzenten bitumenhaltiger Baustoffe wurde bisher noch nicht unter ökologischen Gesichtspunkten untersucht. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass gerade in den letzten 20 Jahren, einem Zeitraum, in dem die Ökobilanzierung zum gängigen Instrument von Technologiebewertungen wurde, ein Großteil der bituminösen Bindemittel direkt („just in time“) von der Raffinerie in die Asphaltmischanlagen geliefert wurde. Erst aufgrund starker Preisschwankungen in der

jüngsten Zeit ist die Thematik ergänzender Instrumente der Versorgungssicherung in den Mittelpunkt der Betrachtung gerückt. Daher kommt es auch, dass in den ökologischen Bewertungen, in denen der Baustoff Teil der Stoffbilanz ist, hier zumeist neben dem Aufwand für das Rohmaterial nur ein konventioneller Aufwand für einen Transport berücksichtigt wird (siehe Holldorb [Ho03] und Eyerer und Reinhardt [EyRe00]). Selbst der sich hinsichtlich seines Energiebedarfs vom konventionellen Transport unterscheidende Heißtransport bleibt bei Holldorbs Erstellung eines Ökoprofiles für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen unberücksichtigt [Ro03]. Anders als bei dem Logistikabschnitt bituminöser Bindemittel zwischen Raffinerie und Asphaltproduktion gibt es eine Vielzahl von ökologischen Bewertungen der vorhergehenden und anschließenden Materialströme. So hat sich Eurobitume [Eu99] in "Partial life cycle inventory or 'eco-profile' for paving grade bitumen" ausführlich mit dem Produktionssystem vom Rohöl zum fertigen Bitumenprodukt in der Raffinerie befasst. Damit liegt die Systemgrenze dieser Untersuchung genau an der Stelle, an der die Integration neuer Technologien der Asphaltbindemittellogistik (beispielsweise einer Abfüllanlage) beginnt. Befasst sich eine ökologische Bewertung eines Produktsystems mit dem Straßenbaustoff Asphalt, so schließt der Untersuchungsrahmen oft erst an die hier betrachteten Verfahrensabschnitte an oder vernachlässigt diese. Beispiele hierfür liefern Pohle und Beyert [PoBe83], Häkkinen und Mäkelä [HäMä96], Huang, Bird und Heidrich [HuBiHe09]. Die erstmalige ökologische Bewertung von Technologien, Technologiekombinationen und Versorgungssträngen der Bitumenversorgungskette von Asphaltmischanlagen ist daher sinnvoll und notwendig.

7.4 Methoden zur ökologischen Bewertung

Die Methoden der ökologischen Bewertung werden bei Goedkoops [GoSp00] zunächst lediglich in themenorientierte Methoden und schadensorientierte Methoden unterteilt. Bei Heijungs und Wenzel [HeWe92] und Haunschild [Ha98] wird die themenorientierte Methodik beschrieben, bei der die Auswirkungen der Nutzungsphase in Themenbereiche unterteilt werden. Goedkoops' Eco-Indicator 95 [Go95] kann als Beispiel für die Beschreibung schadensorientierter Methoden angesehen werden, bei der die Auswirkungen der Nutzungsphase modelliert werden. Der Eco-Indicator 95 wurde im Jahr 2000 durch den Eco-Indicator 99 [GoSp00] erweitert und kann fortan, wie auch hier dargestellt, als eigenständige gesonderte Beschreibung der Eco-Indicator-Methode angesehen werden. Zwischen 1978 [Mü78] und 2008 [Gä08], [Vo08] wurden weitere Methoden entwickelt und angewendet, die im Folgenden vorgestellt werden.

7.4.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der kumulierte Energieaufwand ist eine Methode der ökologischen Bewertung, die ausschließlich die Energieaufwendungen des Produktsystems und seiner Vorketten als Grundlage der Wirkungsabschätzung heranzieht. Auch die verfahrenstechnisch bedingten Energieverluste dieser Vorketten werden mitberücksichtigt.

Damit stellt diese Methode einen Teil der Sachbilanz dar [Wa10]. Größter Nachteil der ökologischen Bewertung über den KEA ist, dass Umweltauswirkungen wie beispielsweise der Abbau abiotischer Ressourcen und Flächennutzung nicht vollständig abgedeckt werden. Umweltauswirkungen im Bereich des Treibhauseffekts hingegen werden zumindest teilweise durch den KEA abgedeckt [Ko09]. Besonders gut eignet sich das Verfahren folglich für die Bewertung von Produktsystemen, die kaum physische Stoffströme beinhalten, wie beispielsweise die Verflüssigung von Thermoplasten. Sasse [Sa01] hat in seiner Arbeit die technisch-wirtschaftliche und umweltgerechte Ausgestaltung von standort- und betriebsübergreifenden Entsorgungsnetzwerken untersucht und die Umweltauswirkungen über den KEA abgeschätzt.

7.4.2 Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS-Indikator)

Die am Institut für Klima, Umwelt und Energie in Wuppertal entwickelte Methode der ökologischen Bewertung mittels Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS-Indikator) steht für die Menge an Material, die insgesamt für das Erbringen eines Nutzens benötigt wird. Ein Zahlenwert wird, wie in folgender Gleichung dargestellt, als Quotient aus Material-Input in der Produktion und Nutzen aus dem jeweiligen Produkt gebildet.

$$MIPS = \frac{\text{Materialmenge für Produktsystem}}{\text{Nutzen bzw. Serviceeinheit}} \quad 7-1$$

Der Materialeinsatz setzt sich sowohl aus aufgewendeten abiotischen als auch biotischen Rohstoffen, Bodenbewegungen, Wasser, Luft, Energieträgern und Grund-, Werk- und Baustoffen zusammen. Diese Form der Berechnung kann als Materialintensitätsanalyse in vielen Fachbereichen zur Anwendung kommen.

Anders als bei anderen Verfahren steht nicht der Output im Mittelpunkt der Betrachtung, sondern der Input. Erst durch die Transformations- bzw. Produktionsprozesse werden aus diesen Inputs Outputs, so dass diese, zumindest qualitativ, erfasst werden [Ri02]. Gerade in Unternehmen wird der MIPS-Indikator

herangezogen, um die EU-Verordnungen für eine Umweltbetriebsprüfung (Öko-Audit) zu einem großen Teil zu erfüllen oder Ressourcenmanagementsysteme zu konzipieren. Von Nachteil ist hier allerdings, dass die mit dem Rohstoffeinsatz verbundenen Emissionen außer Acht gelassen werden. Die Methodik wird bei Schmidt-Bleek [Sch97] beschrieben.

7.4.3 Konzept der Wirkungsindikatoren (CML-Methode)

Ein gutes Beispiel für eine schadensorientierte ökologische Bewertung ist das Konzept der Wirkungsindikatoren der sogenannten „CML-Methode“. Das am Zentrum der Umweltwissenschaften der Universität Leiden (Centrum voor Milieukunde) in Holland entwickelte Verfahren entspricht den Vorgaben aus den oben genannten ISO-Normen zur ökologischen Bewertung [ISO06], [ISO09]. Die Systemgrenzen der CML-Methode können nicht nur Produkte, sondern auch Prozesse und ganze Betriebe beinhalten. Jede Wirkungskategorie entspricht einer spezifischen Umweltauswirkung, beispielsweise Ressourcenverbrauch, Treibhauseffekt, Abbau der Ozonschicht, Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog, Feinstaubbelastung, Toxizität. Das Ziel der Methode ist es, alle direkten stofflichen und energetischen Beziehungen zwischen der natürlichen Umwelt und dem Produktsystem quantitativ abzubilden. Diese Quantifizierung erfolgt durch ein Charakterisierungsmodell, das die Umweltbeziehungen und einzelne Wirkungskategorien zusammenfasst. Mit dem Charakterisierungsmodell werden die einzelnen Stoff- und Energiearten in einen quantitativen Zusammenhang zur Höhe der gesamten weltweiten Umweltbelastung gestellt [Ad00], [HeGuHuLa92a], [HeGuHuLa92b]. Beispielsweise wird der stratosphärische Ozonabbau über das Charakterisierungsmodell „Ozone Depletion“ beschrieben. Im Bereich der Bitumenkaltlogistik ist die CML-Methode noch nicht eingesetzt worden. Allerdings werden regelmäßig Ökobilanzstudien durch das Umweltbundesamt in Auftrag gegeben [KLRe95], [Ti00], [DiDi00], [Um02], [RaCrWaGeMaKn06], weswegen diese Methode der ökologischen Bewertung auch „UBA-Methode“ genannt wird [Ko09].

Nachteil der CML-Methode zur ökologischen Bewertung ist einerseits, dass ihr die Annahme zugrunde liegt, dass Emissionen gleicher Wirkung medienübergreifend zusammengefasst werden können, und andererseits, dass die wirkungsorientierte Klassifizierung von Stoff- und Energieströmen zur Wirkungsabschätzung dient. Hinzu kommt, dass eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse nur bei deutlicher Vorteilhaftigkeit einer Handlungsalternative möglich ist [Wi11].

7.4.4 Ökologische Knappheit (Umweltbelastungspunkte)

Bei der ökologischen Bewertung mittels der Methode der ökologischen Knappheit werden die bilanzierten Stoff- und Energieflüsse, wie in folgender Formel dargestellt, mit Ökofaktoren multipliziert, um die Umweltbelastungspunkte UBP zu berechnen.

$$UBP = \sum_{k=1}^n \text{Menge der Umweltauswirkungen}_k \cdot \text{Ökofaktor}_k$$

[Ei08] 7-2

UBP Umweltbelastungspunkte in der Einheit UBP (Erklärung erfolgt im Text)

n Anzahl der Umweltauswirkungen im Modell

k Laufindex über die Umweltauswirkungen

Die Ökofaktoren werden für die verschiedenen Einwirkungen entsprechend ihrer Schädlichkeit bestimmt. Dies beruht auf der Annahme, dass die Natur eine gewisse Menge an Schadstoffen ohne kritische Auswirkung aufnehmen kann [Sch07]. Die stoff- und energiespezifischen Ökofaktoren setzen sich aus dem Produkt der Faktoren Charakterisierung, Normierung und Gewichtung zusammen und weisen die Einheit Umweltbelastungspunkte je Jahr und Einheit des jeweiligen Flusses auf [FrStJu08]. Das heißt, die Einheit des Ökofaktors ist UBP/Einheit, der Umwelteinwirkung also UBP/g emittierte Substanz UBP/m² Landnutzung oder UBP/MJ energetische Ressource.

Die Methode wurde von Müller-Wenk [Mü78] und Braunschweig [Br82] entwickelt und zählt zu den ältesten Methodiken der ökologischen Bewertung. Die Berechnung des UBP wird unter anderem vom Bundesamt für Umwelt in der Schweiz zur Abschätzung von Auswirkungen von Produktsystemen auf die natürliche Umwelt verwendet. Da bei dem Verfahren der aktuelle Materialfluss eines Bezugsraums auf den kritischen Materialfluss dieser Region bezogen wird, um so Gewichtungsfaktoren zu erhalten, kann eine höhere Auflösung hinsichtlich regionaler Spezifika erreicht werden. Durch die Quadrierung des Gewichtungsfaktors wird eine Überschreitung der Umweltziele überproportional gewichtet [Ko00]. Am Ende können die Umweltbelastungspunkte der Einheit UBP einfach aufaddiert werden.

7.4.5 Eco-Indicator (EIP)

Die bereits zu Anfang erwähnte Methode der ökologischen Bewertung mittels Eco-Indikator 99 fasst ähnlich der Methode der ökologischen Knappheit die unterschiedlichen Umweltauswirkungen zu einem Gesamtergebnis, den Eco Indicator Points (EIP) zusammen. Bei der Entwicklung wurde davon ausgegangen, dass der hierfür notwendige Gewichtungsschritt besonders kritisch für die Aussagekraft dieses Ergebnisses ist. Der Eco-Indikator wurde deshalb im „Top-down-Verfahren“ ausgearbeitet [GoSp00], das heißt, Ausgangspunkt war die Erstellung einer problemadäquaten Gewichtungsmethodik. Hierzu werden als Wirkungsendpunkte entsprechend den Schadensbildern die menschliche Gesundheit, die Ökosystemqualität und der Ressourcenverbrauch betrachtet. Die Gewichtung dieser Wirkungsendpunkte beziehungsweise Schadensbilder ist mehr oder weniger subjektiv. Allerdings gibt es eine Standardgewichtung, die aus einer Expertenbefragung bei Erstellung der Methodik generiert wurde. Danach werden die Wirkungsendpunkte menschliche Gesundheit und Ökosystemqualität mit je 40 % und der Wirkungsendpunkt Ressourcenverbrauch mit 20 % gewichtet [GoSp00]. Dies führt allerdings wiederum dazu, dass beispielsweise ein durch Umweltwirkungen erzielt Todesopfer pro 1 Mio. Einwohner z.B. 5 % langzeitgeschädigter Ökosysteme entspricht [Vi11]. Die Eco-Indikator-99-Methode wurde unter anderem in einer Studie aus der Schweiz zur ökologischen Bewertung von Biotreibstoffen, einschließlich der Berücksichtigung von Biomethan als Treibstoff, eingesetzt [Za07].

7.4.6 Ökoeffizienzanalyse (BASF)

Die Ökoeffizienzanalyse der BASF SE beinhaltet neben ökologischen Aspekten auch die Wirtschaftlichkeit eines Produktsystems (Effizienz im Sinne der Nachhaltigkeit). Dies dient dazu, unterschiedliche Produktsysteme hinsichtlich dieser beiden Kriterien zu vergleichen. Dabei wird der gesamte Lebensweg eines Produktes dargestellt.

Die Höhe der Umweltbelastungen wird im Rahmen einer Ökobilanz ermittelt und in einem zweistufigen Aggregationsverfahren als dimensionslose Umweltkennzahl, relativ zur mittleren Umweltbelastung aller betrachteten Alternativen dargestellt. In jedem Aggregationsschritt werden die Bewertungsergebnisse zunächst über eine lineare Skalentranskription in relative Ergebniswerte zwischen 0 und 1 überführt und anschließend gewichtet [Ko09]. Die Gewichtungsfaktoren setzen sich aus dem Produkt aus sogenannten subjektiven Gesellschaftsfaktoren und sogenannten Relevanzfaktoren zusammen. Die Relevanzfaktoren gewichten die Bewertungsergebnisse relativ zu den gesamten Um-

weltauswirkungen Deutschlands in dieser Wirkungskategorie und stellen somit eine objektive Größe dar. In der abschließenden Darstellung wird der mittleren Umweltbelastung aller Produktalternativen der Wert 1 zugewiesen [SaKiDi-WiZo02]. Umweltauswirkungen der Produktlebenswege und Gesamtkosten werden als gleichberechtigt betrachtet. Externe Kosten werden für die Gesamtkosten nicht berücksichtigt. Die BASF SE hat das Verfahren in zahlreichen Forschungsprojekten angewendet.

7.5 Ökobilanzierungssoftware

Ökobilanzierungen werden EDV-unterstützt durchgeführt. Es wird hierbei zwischen Datenbanken und der Berechnungssoftware unterschieden. Es gibt universitätsbasierte Datenbanken und beratungsbasierte Datenbanken. Die Harmonisierung der vorhandenen Datensätze ist noch nicht erfolgt [CuNo96]. Die nachfolgende Liste zeigt die bedeutendsten Datenbanken:

- 1) Australian Life Cycle Inventory
- 2) BUWAL 250
- 3) Dutch Input Output
- 4) Ecoinvent
- 5) ELCD
- 6) EDIP
- 7) Fanklin US LCI
- 8) German Network on Life Cycle Inventory Data
- 9) ITRI Database
- 10) ICAM LCA Data
- 11) NREL
- 12) NEEDS

Daneben gibt zahlreiche Softwaretools, wobei die folgenden fünf Hersteller die meisten Lizenzen verkauft haben [SiClBrAr05]:

- 13) SimaPro
- 14) Gabi
- 15) Umberto
- 16) LCAIT

17) NRE-LCA

Die EDV-Werkzeuge, die hier für die ökobilanzielle Betrachtung der Bitumenlogistik herangezogen werden, sind in den nächsten Unterabschnitten beschrieben.

7.5.1 Die Datenbank Ecoinvent

Die seit elf Jahren bestehende Datenbank Ecoinvent aus der Schweiz hat einen vergleichsweise großen Umfang an Datensätzen der Ökobilanzierung. Die Nutzung dieser Datenbank ist kostenpflichtig, wobei die Lizenz zur Einsicht aller Daten auch über den Erwerb der Berechnungssoftware eines kooperierenden Softwareherstellers erworben werden kann. Die neueste und hier verwendete Version der Datenbank Ecoinvent ist die Version 2.2, die auf Daten aus dem Jahr 2010 beruht [FrJuNiAlDoDoHe07]. Die Datensätze aus den Themengebieten wie beispielsweise Transport, Elektrizitätsherstellung oder Materialherstellung sind nach folgender Thematik strukturiert:

- 1) Prozesse: Diese enthalten Sachbilanzen und bewertete Ergebnisse zu Produkten und Dienstleistungen.
- 2) Elementarflüsse: Sie beinhalten Bezeichnungen von Schadstoffen und Ressourcen mit zugehöriger Einheit, Kategorie und Quelle.
- 3) Methoden der Wirkungsabschätzung: Bewertungsmethoden für Ökobilanzen mit entsprechenden Faktoren.

Die jeweilige Ermittlung der Daten ist genau dokumentiert und innerhalb der Datenbank einsehbar. Eine genaue Durchsicht dieser Dokumentationen ist für ihre Kombination in einer neuen ökobilanziellen Betrachtung unerlässlich.

7.5.2 ELCD

Die Datenbank des Joint Research Center der europäischen Kommission ist eine vergleichsweise kleine Datenbank, die sich auf Daten spezialisiert, die von den EU-Wirtschaftsverbänden erhoben werden. Sie beinhaltet derzeit vor allem Daten aus den Bereichen Transportwesen, Materialherstellung, Abfallentsorgung und Energieversorgung. Diese Datenbank ist kostenlos im Internet verfügbar. Allerdings werden ihre Daten nicht regelmäßig aktualisiert. Hier wird daher in erster Linie die Datenbank Ecoinvent verwendet und die ELCD-Datenbank nur als Ergänzung herangezogen.

7.5.3 Umberto

Die Ökobilanzierungssoftware Umberto ist neben LCAit, NIRE-LCA und SimaPro eines der am häufigsten angewendeten nicht tabellenkalkulationsbasierten Berechnungswerkzeuge. Umberto gliedert die Datenbestände in drei einander untergeordnete Ebenen. Auf der obersten Ebene befindet sich das Projekt. Das Projekt umfasst alle Daten der Stoffstromanalyse. Darunter existiert die Szenario-Ebene. Auf dieser Ebene wird ein projektspezifisches PETRI-Netz modelliert. Es kann über mehrere Zeitperioden analysiert werden. Die einzelnen Zeitperioden stellen somit die unterste Modellebene dar.

In der Reihenfolge dieser Ebenen erfolgt auch die Bearbeitung einer Studie. Das heißt, es wird mit der Projekterstellung begonnen, dann wird das untersuchte Produktsystem als Prozessnetz abgebildet und Betrachtungsperioden werden definiert. Prozesse (Transitionen) können dabei wahlweise mit Daten oder Funktionen gefüllt werden.

Umberto wird hier für die ökobilanzielle Bewertung der Versorgungsstränge der Bitumenkalthandhabung gewählt, weil es diese übersichtliche Form der Netzpläne bietet. Es wird dadurch einfacher, den großen Datenumfang der Ökobilanz zu handhaben. Einheiten werden automatisiert umgerechnet. Ein nicht zu vernachlässigender Vorteil ist die leichte und lückenlose Integrierbarkeit von Ecoinvent-Daten.

7.6 Ökologische Bewertung der Bitumenkalthandhabungstechnologie

Nachdem die Technologien der Bitumenhandhabung im Kapitel 4 vorgestellt und in Kapitel 5 und 6 monetär bewertet und somit einander gegenübergestellt werden, wird nun abschließend eine ökobilanzielle Bewertung der für das Referenzunternehmen gewählten Technologiekombination der Kalthandhabung durchgeführt. Dabei wird auch ein ökobilanzieller Vergleich mit der Heißlagerung erfolgen.

Die Bitumenversorgungskette wird durch den Einsatz von Technologien der Kalthandhabung komplexer. Dadurch müsste zunächst der negative Einfluss auf die Umwelt größer sein als bei der Heißhandhabung. Andererseits können mittels der Kaltlagerung größere Energiemengen eingespart werden, die negative Auswirkungen kompensieren. Die Auswirkungen zu untersuchen und einander gegenüberzustellen, ist Gegenstand dieses Abschnitts.

In Unterabschnitt 7.6.1 wird im Detail erläutert, wie sich der Untersuchungsrahmen zusammensetzt.

Die Wahl der Bitumenmenge und damit der untersuchte Produktionszeitraum werden in Unterabschnitt 7.6.2 erläutert. Anschließend wird in Unterabschnitt 7.6.3 zunächst eine Sachbilanz durchgeführt. Die Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung werden in Unterabschnitt 7.6.4 vorgestellt.

7.6.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung werden Teil der Entscheidungsgrundlage im Kontext der Bitumenkaltlogistik. Deshalb sind die Technologien der verglichenen Logistikketten genau zu spezifizieren. Gewählt wird der Vergleich der im Unternehmen üblichen Heißlogistik mit der neuartigen Kaltlogistik, unter Integration der Strabox und konventioneller Verflüssigungstechnologien. Entscheidend bei der Wahl der Technologiekombination Strabox mit konventioneller Verflüssigung für den ökobilanziellen Vergleich mit dem Produktionsstrang der Heißlagerung war allerdings, dass im Rahmen dieser Arbeit die Technologien zunächst modellhaft, mittels eines mathematischen Optimierungsmodells zur Minimierung der Gesamtkosten in die Strukturen eines Referenzunternehmens integriert werden (Kapitel 6). Die Erkenntnisse hieraus bildeten die Grundlage der Entscheidung für die Strabox als interessantes Gebindesystem für die ökologische Bewertung.

Aus der durchgeführten Technologiebewertung ergibt sich auch, dass sich die konventionelle Verflüssigungsanlage aufgrund ihrer geringen fixen Kosten insbesondere für Produktionschargen anbietet, bei denen keine hohen Vorgaben hinsichtlich Verflüssigungsleistung gegeben sind. Aus der Praxis ist bekannt, dass dies in vielen Asphaltmischanlagen der Fall ist. Auch die Berechnungen des mathematischen Modells ergaben eine Empfehlung hinsichtlich einer dezentralen Aufgliederung der Distributionsstellen der Bitumenkaltlogistikkette und verhältnismäßig kleiner Verflüssigungschargen am Lagerstandort.

Eine vergleichende zusätzliche Berücksichtigung der Just-in-time-Handhabung des Bindemittels im Rahmen der ökologischen Bewertung wird hier gleich zu Anfang ausgeschlossen, da offensichtlich viel geringere Auswirkungen in beinahe allen Wirkungskategorien zu erwarten sind. So liegen bei Tagespreislieferungen keine stofflichen Aufwendungen für Bindemittelverpackung, Heißlagerung, Wiederverflüssigung und zusätzlichen Transport in dem definierten Betrachtungsrahmen vor.

Die Wirkungskategorien, die in der Auswertung betrachtet werden, basieren auf den untersuchten Wirkungskategorien des Eco-Indikator 99. Es handelt sich hierbei um die menschliche Gesundheit, Ressourcen und die Ökosystemqualität. Die menschliche Gesundheit bildet sich aus den Unterkategorien radioaktive Strahlung, Klimawandel, krebserregende Stoffe, Atemwegserkrankungen und Ozonabbau. Ressourcen umfassen fossile Brennstoffe und Mineralien, während die Ökosystemqualität in Landnutzung, Versauerung, Eutrophierung und Ökotoxizität aufgegliedert wird. Eine im Eco-Indicator vorgenommene Gewichtung, bei der die menschliche Gesundheit und die Ökosystemqualität stärker als die Ressourcen gewichtet werden, wird jedoch nicht übernommen. Die Normierung, deren Werte aus Tabelle 7-1 entnommen werden können, wird jedoch beibehalten. Die Normierung basiert auf Werten für Emissionen in Europa, die wiederum über den Ressourceneinsatz pro Europäer in einem Jahr ermittelt wurden [TsPo03]. Die menschliche Gesundheit wird in der Einheit DALY (Disability Adjusted Life Years) gemessen. Dies bedeutet, dass der „Disnutzen“ für die Menschen, der sowohl einen frühzeitigen Tod als auch beispielsweise die Störung des Menschen durch Atemwegserkrankungen erfasst, in dieser Einheit berücksichtigt wird. Die Ökosystemqualität wird in der Einheit $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}$ gemessen. Diese Einheit berücksichtigt die Schädigung des Ökosystems, die durch toxische Emissionen, Versauerung und Eutrophierung oder die Abnahme der Artenvielfalt durch die Beanspruchung der Landschaft verursacht wird.

Tabelle 7-1: Normierung des Eco-Indicators

Wirkungskategorie	Wert	Einheit
Menschliche Gesundheit	0,0154	DALY
Ökosystemqualität	5130	$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}$
Ressourcen	8410	MJ

7.6.2 Funktionelle Einheit und Betrachtungszeitraum

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung beziehen sich jeweils auf eine vorher festgelegte Größe. Diese funktionelle Einheit wird hier in Anlehnung an die beispielhaft angenommene Produktionsmenge in Kapitel 5 ebenfalls 15.000 Tonnen/a betragen. Zugleich wird damit der Betrachtungszeitraum auf ein Jahr festgelegt.

Prozesse, die neben dem Hauptprodukt ein Nebenprodukt hervorbringen, müssten beispielsweise mit Hilfe von Allokationsvorschriften berücksichtigt werden. In diesem Fall dürften nicht alle verursachten Inputs und Outputs einem Produkt zugerechnet werden. Hierbei würde es Vorschriften benötigen,

inwieweit diese den einzelnen Produkten zugerechnet werden müssen. In dieser Betrachtung ist dies der Fall im Bereich der Entsorgung der einzelnen Verpackungsvarianten. Hierbei entstehen Schleifen oder sog. „loops“. Diese beschreiben, dass in diesem Prozess Elektrizität durch die Müllverbrennung entsteht, die in anderen Bereichen verwendet werden kann. Die verwendeten Datensätze dieser Müllverbrennung vereinfachen diesen Prozess jedoch mit der Annahme, dass gewissermaßen eine interne Schleife vorliegt und somit die produzierte Energie direkt wieder in den Prozess der Müllverbrennung einfließt. Dies ist zwar nicht die exakte Abbildung des Prozesses, ist jedoch eine häufig verwendete und akzeptable Vereinfachung des Systems. Die Produktsysteme umfassen alle relevanten Input- und Outputströme der einzelnen Szenarien. Ein Großteil der Daten stammt aus der Ecoinvent-Datenbank. Die selbst erhobenen Daten haben den Anspruch, möglichst vollständig den tatsächlichen Sachverhalt abzubilden. Zeitlich wird ein Rahmen von einem Jahr betrachtet. Daher muss berücksichtigt werden, dass Inputs und Outputs der Betriebsstoffe nur zu einem gewissen Anteil, gemäß ihrer erwarteten Gesamtlebensdauer, in die Ökobilanz einfließen.

Geografisch gesehen umfasst der Untersuchungsrahmen Deutschland, wobei hier die Grenzen nicht eindeutig gezogen werden können. Dies basiert zum einen darauf, dass die Datensätze teils von Daten stammen, die in einem anderen Land erhoben wurden, und zum anderen darauf, dass die Wirkungen nicht geografisch eindeutig festgelegt sind. Im Sinne des technologischen Bezugs wird darauf geachtet, dass möglichst aktuelle Datensätze verwendet werden, um somit den Stand der Technik möglichst exakt abzubilden.

7.6.3 Erstellung der Sachbilanz

Zur Erfassung aller Stoffströme in der Bitumenversorgungskette müssen zunächst einige Parameter festgelegt und Annahmen getroffen werden.

Für die Bitumenhandhabung (Unterabschnitt 7.6.3.1) mit Heißlagerung fallen folgende Prozesse an:

- 1) Heißtransport im TKW vom Raffineriestandort ins Tanklager
- 2) Leerfahrt des TKW
- 3) Tanklagerung
- 4) Heißtransport im TKW vom Tanklager in die Asphaltmischanlage
- 5) Leerfahrt des TKW

Für die Bitumenhandhabung (Unterabschnitt 0) mit Kaltlagerung fallen folgende Prozesse an:

- 1) Verpackung des Bitumens
 - a. Verpackungsmaterial
 - b. Verpackungsvorgang (Abfüllen)
- 2) Kalttransport im LKW vom Raffineriestandort zum Kaltlager²⁷
- 3) Kaltlagerung
- 4) Wiederverflüssigung
- 5) Heißtransport im TKW vom Lager- und zugleich Verflüssigungsstandort in die Asphaltmischanlage
- 6) Leerfahrt des TKW
- 7) Abtransport der Verpackung
- 8) Verbrennen der Verpackung

In den nachfolgenden Unterabschnitten wird jeweils auf Herstellung, Entsorgung und Betrieb der für die Prozesse benötigten Systeme eingegangen. Lediglich die Transporte werden vorab dargestellt. Es ist zu erwarten, dass die Transporte einen wesentlichen Teil der ökologischen Auswirkungen verursachen. Sowohl im Kontext der Bitumenheiß- als auch der Kalthandhabung fallen zusätzliche Transporte an. Dadurch unterscheiden sich diese Handhabungsformen einerseits von der Just-in-time-Handhabung, aber auch zugleich untereinander, da das Bitumen bei der Bitumenkalthandhabung theoretisch auch vom Lager in die Verflüssigungsanlage transportiert werden kann. Kapitel 6 hat al-

²⁷ Der LKW kann anschließend vom Logistiker anderweitig beladen werden, weshalb bei Kalttransporten – anders als bei TKW-Transporten – keine zusätzliche Leerfahrt anfällt.

lerdings gezeigt, dass aus ökonomischen Gründen die Lagerung und die Verflüssigung des erkalteten Bitumens am selben Standort sinnvoll sind. Der Transport wird hier daher einerseits im Betrachtungsrahmen belassen, um die genannten Handhabungsformen von der Just-in-time-Handhabung abzugrenzen, zugleich wird allerdings angenommen, dass für die Heiß- und Kaltlagerung mit der entsprechenden Handhabung dieselben Transportstrecken anfallen. Damit werden diese beiden Verfahrensweisen besonders gut vergleichbar. Der verwendete Datensatz gilt sowohl für TKW als auch LKW, da sich beide Fahrzeuge nur hinsichtlich der Aufleger unterscheiden.²⁸ Der Transport, der hier im Modell wie auch zumeist in der Praxis per TKW erfolgt, erfolgt sowohl zwischen Raffinerie und Lager als auch zwischen Lager und Asphaltmischanlage, beispielhaft über eine Strecke von 150 km. Die Datensätze, die für die Bilanzierung des TKW-Transports verwendet werden, kommen aus der Ecoinvent Datenbank und umfassen Fahrzeugbetrieb, -konstruktion, -unterhalt und -entsorgung sowie die Konstruktion, den Unterhalt und die Entsorgung der Straße. Die Daten wurden zwar im Jahr 2000 in der Schweiz erhoben, bilden jedoch den europäischen Durchschnitt ab [SpBaDoSch07]. Die zum Einsatz kommenden LKW haben eine Nutzlast von 25 Tonnen bei Heiß- und bei Kalttransport. Des Weiteren geht der Datensatz von einer TKW-Lebensdauer von 8 Jahren mit einer Gesamtkilometeranzahl von 540.000 km aus. Die jährliche Fahrleistung beträgt demzufolge 70.000 km. Der Instandhaltungsaufwand des jeweiligen Fahrzeugs in der Werkstatt ergibt sich ebenfalls aus dem oben genannten Datensatz [SpBaDoSch07] und wird in Tabelle 7-2 gezeigt. Es wird angenommen, dass alle LKW-Bestandteile entsorgt werden. Lediglich das Metall wird recycelt und die Reifen in einer Zementfabrik verbrannt werden [SpBaDoSch07]. Für den Bau des LKW wird eine Produktionsstätte mit insgesamt 1.300.000 m² Fläche benötigt, die anteilig in die Ökobilanz einfließt, deren Umschlag auf den einzelnen LKW hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht wiedergegeben wird. Die Produktion eines LKW benötigt insgesamt 34.000 MJ Erdgas, 4.740 kWh Elektrizität, 906 MJ Heizöl, 187 kg Diesel und 2.860.00 m³ Wasser [SpBaDoSch07]. Der für den Betrieb benötigte Treibstoff und die dabei anfallenden Emissionen sind ebenso in Tabelle 7-2 enthalten.

²⁸ TKW werden daher zukünftig im Kontext der Ökobilanz auch als LKW bezeichnet.

Tabelle 7-2: Daten [SpBaDoSch07] und Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz der Bitumentransporte und Leerfahrten

Parameter	Wert	Einheit
Gesamttransportstrecke für Bitumen	300	km
LKW-Nutzlast	25	t
LKW-Fahrtstrecke p.a.	70.000	km
Instandhaltung in einem Jahr:		
Öl	100	kg
Fett	50	kg
Ölfilter	4	Stk.
Luftfilter	4	Stk.
Abgasrohr	0,3	Stk.
Backenbremse	0,6	Stk.
Reifen	100	Stk.
Elektrizität	15.800	MJel/LKW
Leichtes Heizöl	56.700	MJ/LKW
Verbrauch bei LKW-Produktion:		
Erdgas	34.000	MJ
Elektrizität	4.740	kWh
Heizöl	906	MJ
Diesel	187	kg
Wasser	2.860.000	m ³
Treibstoffverbrauch im Flottendurchschnitt	294,40	g/km
Emissionen im Flottendurchschnitt (Ecoinvent Report no. 14):		
CO ₂	927,5	g/km
Schwefeldioxid	0,03	g/km
Kohlenmonoxid	1,90	g/km
NO _x	9,70	g/km
Feinstaub	0,24	g/km
Kohlenwasserstoffe	0,29	g/km
Mehrverbrauch bei Beladung gegenüber Leerfahrt	63	%

7.6.3.1 Die Bitumenversorgungskette mit Heißlagerung

Neben den Transporten ist der Heißlagertank die wesentlichste ökobilanziell zu untersuchende Komponente der Bitumenheißhandhabung. Für die Ökobilanz wird der Ecoinvent-Datensatz „liquid storage tank, chemicals, organics“ verwendet, wobei eine Wärmedämmung von 0,15 Meter Dicke hinzugerechnet wird. Neben dem Materialbedarf wird auch der Transport des Materials zum Bauplatz berücksichtigt. Hier wird von vier geheizten Tanks mit jeweils 4.000

Tonnen Ladekapazität und jeweils 5.000 Tonnen Jahresdurchsatz ausgegangen. Zum Heizen werden 50 kWh/a pro Tonne Bitumen benötigt, wobei dieser Gesamtheizbedarf laut Stripple [St01] zu 90 % elektrisch und zu 10 % mittels Heizöl gedeckt wird. Die sich hieraus ergebenden Mengen und weitere Datengrundlagen sind Tabelle 7-3 zu entnehmen.

Tabelle 7-3: Daten [St01][FrJuNiAlDoDoHe07] und Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz der Bitumenheißhandhabung

Parameter	Wert	Einheit
Tankkapazität	4.000	t
Anzahl laut Datensatz	4	Stk.
Jahresdurchsatz	5.000	t/Tank
Energiebedarf	50	kWh/t
davon aus elektrischem Strom	45	kWh/t
davon aus Heizöl	5	kWh/t
Benötigte Menge an Heizöl	430	g/t
berechnet mit:		
Dichte des Heizöls	850	g/l
Heizwert des Heizöls	9.970	Wh/l
Strom-Mix		
Kernenergie	25	%
Thermische Energie	55	%
Importe	10	%
Pumpspeicherkraftwerke	1	%
Wasserkraftwerke	3	%
Abfälle	1	%
Nutzungsdauer des Bitumentanks	50	Jahre
Stahlverbrauch pro Tank	104	Tonnen
Transport der Materialien der vier Tanks auf die Baustelle		
Straßentransport	66.800	tkm
Schienentransport	288.500	tkm
Wartung der Tanks		
Lackierungsvorgang	alle 17	Jahre
Lackierungsmaterial	1	t/Tank-Lackierung
Wärmedämmung (Ecoinvent Report no. 7)		
Dichte der Dämmung	50	kg/m ³
Dicke an der Wand	15	cm
Dicke am Boden	50	cm
Dicke an der Decke	30	cm
Landschaftsverbrauch der Tanks	2200	m ²

Die mit den Werten ermittelte Sachbilanz der Bitumenheißhandhabung befindet sich im Anhangkapitel 9.6 dieser Arbeit.

7.6.3.2 Die Bitumenversorgungskette mit Kaltlagerung

Da anders als bei Transport und Tanklagerung für die neuen Technologien der Bitumenkalthandhabung keine Datensätze vorhanden sind, von denen ausgehend die Bilanzierung durchgeführt werden kann, müssen hier mehrere Annahmen getroffen werden, die in diesem Unterabschnitt ausführlich vorgestellt werden. Wichtige Daten und Annahmen, die im nachfolgenden Text nicht enthalten sind, werden in Tabelle 7-4 wiedergegeben.

Als zusätzlicher Aufwand ist zunächst die Verpackung zu betrachten. Die Maße der für das Referenzunternehmen als optimal ermittelten Verpackung, der Strabox, betragen $0,7 \text{ m} \cdot 0,31 \text{ m} \cdot 0,475 \text{ m}$. Für die Herstellung von Karton im Allgemeinen kann ein Ecoinvent Datensatz herangezogen werden. Hierin sind das Schneiden, Falten und Bedrucken der Kartons enthalten. Es wird keine Abfüllanlage benötigt, da das Befüllen der Kartons direkt und bei bis zu $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich ist. Der Abfüllvorgang kann hier daher vernachlässigt werden.

Die Parameter zur Bilanzierung des Transports werden in Tabelle 7-2 vorgestellt. Auch zu jedem Bitumenkalttransport fallen Leerfahrten an. Da der Transportdienstleister den LKW aber zumeist zu anderen Zwecken nutzen kann, werden hier nur 14 % der Fahrt angesetzt.

Da die Kartons nicht ausreichend witterungsresistent sind, wird für die Lagerung auf den Asphaltmischanlagen ein Industriezelt (PVC-Weiß) benötigt. Im Zelt wird pro gelagerte Bitumentonne ein Quadratmeter Platz benötigt. Hinzu kommt ein Zuschlag von 5 % zum Rangieren.

Der Bau der Verflüssigungsanlage wird mit dem Ecoinvent Datensatz „building machine“ abgeschätzt. Der Energiebedarf und der Materialtransport für den Bau der Anlage sind hierin berücksichtigt. Da davon ausgegangen werden kann, dass die Maschine zu 100 % recycelt wird, ist gemäß Althaus [AlHiOsKüLe07-1] die Geräteentsorgung mitberücksichtigt.

Es wird angenommen, dass die Verpackungen nach einmaligem Gebrauch entsorgt werden müssen. Dies erfolgt durch Verbrennen, wobei hier davon ausgegangen wird, dass die dabei gewonnene Energie wieder genutzt werden kann.

Tabelle 7-4: Daten [Hi07-1][Hi07-2][Do09] und Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz der Bitumenkalthandhabung

Parameter	Wert	Einheit
Verpackungsmaterial der Kartonverpackung		
Abmessungen gefaltet		
Länge	0,70	m
Breite	0,31	m
Höhe	0,475	m
Silikonschicht		
Dicke	0,01	mm
Dichte	1.120	kg/m ³
Abfüllgewicht	103	kg
Eigengewicht der Kartonage inklusive Anteil am Kartondeckel ²⁹	2,48	kg
berechnet mit:		
Dichte	903	g/m ²
Fläche	2,8	m ² /Stk.
Herstellung von Karton (Ecoinvent Report no. 11)		
Landschaftsverbrauch	12.000	m ² /Produktions- stätte
Zeit zum Aufbau der Produktionsanlage	2	Jahre
Bestandteile der Produktionsanlage		
Hallen	80	%
Höhe	10	m
Lebensdauer	50	Jahre
Maschinen	20	%
Gesamtgewicht	2.500	t
Lebensdauer	25	Jahre
Bestandteile der Maschinen ³⁰		
Chromstahl	70	%
Stahl	25	%
Plastik	4	%
Elektronik	1	%

²⁹ Jeweils drei Kartonbehälter teilen sich einen Deckel.

³⁰ Bei der Entsorgung der Maschinen wird der Kunststoff thermisch verwertet, die Elektronik entsorgt und das Metall zu 100 % recycelt.

Parameter	Wert	Einheit
Lebensdauer der Produktionsanlage für Kartons	50	Jahre
Produktionskapazität	14.000	t/Jahr
Straßentransporte der Hilfsstoffe	150	tkm
Straßentransport der Kartons	100	tkm
Elektrizität	0,114	kWh/kg
Material (wg. Verschnitt)	1,093	kg/kg
Druckfarbe	2	g/kg
Klebstoff	10	g/kg
Leichtes Heizöl	11,6	g/kg
Bitumenkaltlager		
Platzbedarf (siehe Text)	1,05	m ² /t
Industriezelt		
Stahlwände aus Trapezblechen (RAL 9006-weiß)		
Höhe	3,40	m
Dicke	0,75	mm
Firsthöhe	6,64	m
Aluminiumbinderabstand	4,00	m
Verflüssigungsanlage		
Verflüssigungsleistung	2	t/h
Platzbedarf	21,96	m ² /Anlage
Leergewicht	5.800	kg
Brennerleistung	110	kWh
Pumpe		
Energiebedarf	4	kWh
Leistung	10	m ³ /h
Anlagenbau (Ecoinvent Datensatz „building machine“)		
Materialtransport		
Schientransport	600	tkm
Straßentransport	50	tkm
Energiebedarf für den Anlagenbau		
Elektrizität (Strom-Mix siehe Tabelle 7-3)	5.319	kWh
Erdgas	58.000	MJ
Verpackungsentsorgung (Ecoinvent Report no. 13)		
Wasseranteil	19,6	%
Transportstrecke zur Verbrennungsanlage	10	km

Die mit den Werten ermittelte Sachbilanz der Bitumenkalthandhabung befindet sich im Anhangkapitel 9.6 dieser Arbeit.

7.6.4 Durchführung der Wirkungsabschätzung

Die Bewertung wird gemäß Unterabschnitt 7.6.1 mittels des Eco-Indikator 99 durchgeführt. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung basieren auf den Wirkungskategorien dieser Methode:

- 1) Menschliche Gesundheit
 - Radioaktive Strahlung
 - Klimawandel
 - Krebserregende Stoffe
 - Atemwegserkrankungen
 - Ozonabbau
- 2) Ressourcen
 - Fossile Brennstoffe
 - Mineralien
- 3) Ökosystemqualität
 - Landnutzung
 - Versauerung & Eutrophierung
 - Ökotoxizität

Diese Kategorien decken einen Großteil der ökologischen Problemfelder ab und sind in der Betrachtung breit gefächert. Damit wird gewährleistet, dass die Auswertung nicht nur einzelne Problemfelder herausgreift, sondern eine umfassende ökologische Bewertung ermöglicht. Die mittels Umberto berechneten Umweltauswirkungen der Handhabungsformen in diesen Kategorien werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Zunächst wird in Unterabschnitt 7.6.4.1 auf die Bitumenheißhandhabung und anschließend in Unterabschnitt 7.6.4.2 auf die Bitumenkalthandhabung eingegangen. Eine Gegenüberstellung der beiden Handhabungsformen erfolgt in Unterabschnitt 7.6.4.3. Zur Erleichterung der Darstellbarkeit werden in diesem Abschnitt alle mit Umberto ermittelten Eco-Indikator-Punkte mit 1000 multipliziert.

7.6.4.1 Auswirkungen der Bitumenheißhandhabung

Die durch die Berechnung (Charakterisierung) ermittelten Werte der einzelnen Wirkungskategorien sind in Tabelle 7-5 dargestellt. Davon werden einige im Einzelnen näher beschrieben. Für diese detaillierte Darstellung werden die Ergebnisse stets in Punkten des Eco-Indikators angegeben.

Tabelle 7-5: Bewertung der Bitumenheißhandhabung in Eco-Indikator-99-Punkten in den Wirkungskategorien

Kategorie		Eco-Indikator99 Punkte (EIP)
Unterkategorie		
Menschliche Gesundheit		
Radioaktive Strahlung	115,00	EIP
Klimawandel	5.240,69	EIP
Krebserregende Stoffe	777,28	EIP
Atemwegserkrankungen	13.611,73	EIP
Ozonabbau	2,86	EIP
Total	19.747,54	EIP
Ressourcen		
Mineralien	1.912,10	EIP
Fossile Brennstoffe	60.546,53	EIP
Total	62.458,63	EIP
Ökosystemqualität		
Landnutzung	1.193,69	EIP
Versauerung & Eutrophierung	1.488,38	EIP
Ökotoxizität	1.578,70	EIP
Total	4.260,77	EIP

Alle Auswirkungen werden von den beiden hier betrachteten Vorgängen des Bitumentransports und der Bitumenlagerung in Heißlagertanks verursacht. Abbildung 31 zeigt auf, inwieweit die Auswirkungen jeweils von diesen beiden Vorgängen beeinflusst werden.

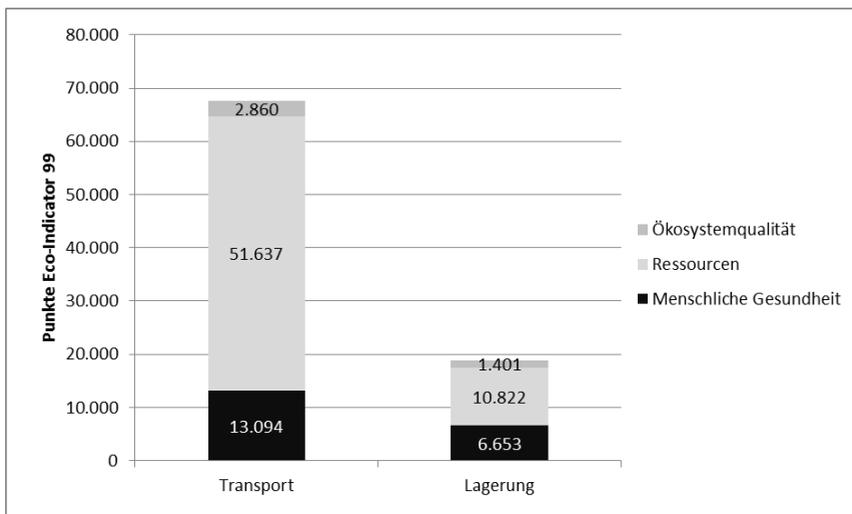


Abbildung 31: Auswirkungen aus links Transport und rechts Lagerung in Eco-Indikator-Punkten

Es wird deutlich, dass der Bitumenheißtransport einen Großteil der Auswirkungen verursacht. In beiden Verfahrensschritten wird weit über die Hälfte der Umweltauswirkungen durch den Ressourcenverbrauch verursacht. Dies ist auf den jeweils großen Verbrauch fossiler Brennstoffe (Diesel und Heizöl) zurückzuführen.

7.6.4.2 Auswirkungen der Bitumenkalthandhabung

Analog der Untersuchung im vorhergehenden Unterabschnitt sind auch hier die Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien nach der Charakterisierung in Tabelle 7-6 dargestellt.

Tabelle 7-6: Bewertung der Bitumenkalthandhabung in Eco-Indikator-99-Punkten in den Wirkungskategorien

Kategorie		Eco-Indikator99 Punkte (EIP)
Unterategorie		
Menschliche Gesundheit		
Radioaktive Strahlung	69,74	EIP
Klimawandel	4.808,44	EIP
Krebserregende Stoffe	1.757,80	EIP
Atemwegserkrankungen	15.984,25	EIP
Ozonabbau	3,84	EIP
Total	25.624,05	EIP
Ressourcen		
Mineralien	1.234,41	EIP
Fossile Brennstoffe	91.749,65	EIP
Total	92.984,06	EIP
Ökosystemqualität		
Landnutzung	10.149,44	EIP
Versauerung & Eutrophierung	1.655,73	EIP
Ökotoxizität	2.024,42	EIP
Total	13.829,59	EIP

Die Umweltauswirkungen werden durch die Verfahrensschritte Abfüllung, Lagerung, Wiederverflüssigung, das Verpackungsmaterial und den Transport verursacht. Abbildung 32 zeigt, inwieweit die einzelnen Umweltauswirkungen von den jeweiligen Verfahrensschritten verursacht werden.

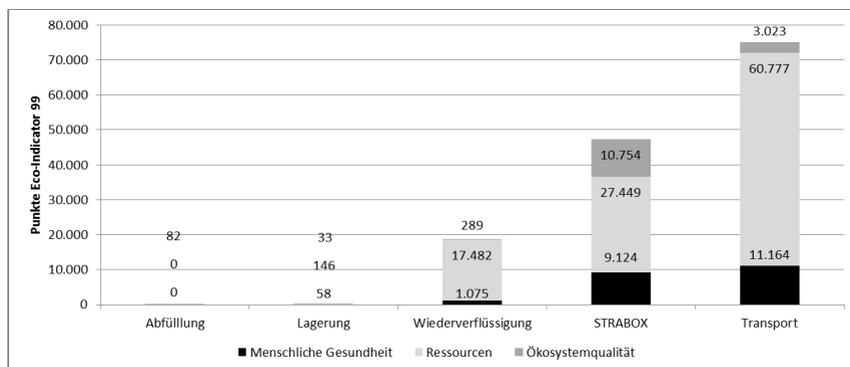


Abbildung 32: Auswirkungen aus den Verfahren der Bitumenkalthandhabung in Eco-Indikator-Punkten

Wie bereits bei der Bitumenheißlogistik wird auch in der Bitumenkaltlogistik und ihren Vorketten eine große Menge fossiler Brennstoffe verbraucht und damit eine große Indikatorpunktesumme in der Kategorie Ressourcen verursacht.

7.6.4.3 Gegenüberstellung der Handhabungsformen

Stellt man die – in Eco-Indikator-99-Punkten ausgedrückten – Auswirkungen der beiden Handhabungsformen in der Bitumenlogistik einander gegenüber so stellt man fest, dass die Bitumenheißhandhabung ökologisch sinnvoller ist als die Bitumenkalthandhabung.

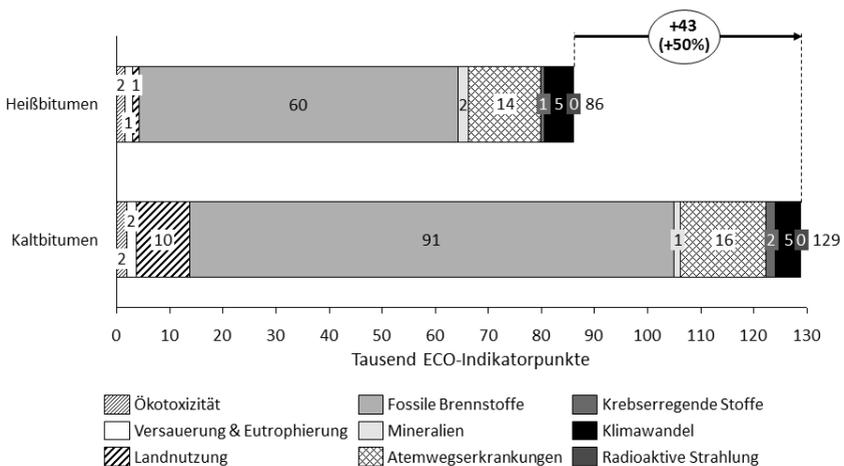


Abbildung 33: Gegenüberstellung der ökologischen Auswirkungen von Bitumenheiß- und -kalthandhabung in tausend ECO-Indikator-99-Punkten

Die Anzahl der ermittelten Eco-Indikator-Punkte ist fast in allen Wirkungskategorien der Bitumenkalthandhabung größer oder annähernd gleich der Anzahl der Eco-Indikator-Punkte der Bitumenheißhandhabung. Insbesondere der Mehraufwand an fossilen Brennstoffen fällt stark ins Gewicht.

Unter ökologischen Gesichtspunkten scheint die Bitumenheißhandhabung daher sinnvoller als die Bitumenkalthandhabung.

7.7 Zusammenfassung der ökologischen Bewertung

Nachdem in Kapitel 6 festgestellt wird, dass für das Referenzunternehmen die Lagerung in Kartonverpackungen mit der Errichtung integrierter Lager- und Verflüssigungsstandorte ökonomisch sinnvoller ist als die Heißlagerung, derer sich das Unternehmen bisher bedient, werden in diesem Kapitel beide Verfahrensweisen zusätzlich unter ökologischen Gesichtspunkten untersucht. Hierzu wird zunächst der Untersuchungsrahmen definiert und weitere Annahmen getroffen. Es konnten größtenteils Daten der Eco-Invent-Datenbank herangezogen werden. Die Modellierung der Versorgungskette erfolgte in Umberto.

Eine abschließende Gegenüberstellung der beiden untersuchten Bitumenversorgungsketten zeigt, dass die Anwendung der in Kapitel 6 bestimmten Technologiekombination eine erhöhte Belastung der Umwelt zur Folge hat. Vornehmlich aufgrund des erhöhten Bedarfs an fossilen Brennstoffen steigt der Ressourcenbedarf der gesamten Kalthandhabungskette derart stark an, dass sie mit insgesamt 129.400 EPI zirka 50 % mehr Eco-Indikator-Punkte hat als die Heißhandhabungskette (zirka 86.400 EPI). Es darf dabei allerdings nicht vergessen werden, dass insbesondere bei längeren Lagerzeiten die Kalthandhabung gegenüber der Heißhandhabung aufgrund des verminderten Wärmeenergiebedarfs während der Lagerung ökologisch vergleichsweise günstiger wird. Darüber hinaus ermöglicht es das Standortplanungsmodell in Kapitel 6, die Transportstrecken mittels einer geeigneten Wahl der neuen Kaltlagerstandorte gegenüber der Heißhandhabung zu reduzieren. Dass gerade beim Errichten neuer Standorte die Kaltlagerung unter ökonomischen Gesichtspunkten sinnvoller ist, hat die Modellauswertung in Kapitel 6 ebenfalls gezeigt. Letztendlich muss daher im Kontext der Errichtung neuer Lagerstandorte zwischen Ökologie und Ökonomie abgewogen werden. Eine Sensitivitätsanalyse, die hier nicht durchgeführt wird, könnte zeigen, inwiefern eine Verkürzung der Transportwege oder eine Erhöhung der Lagerzeiten den ermittelten Unterschied beeinflussen können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Erklärtes Ziel dieser Arbeit ist es, aktuelle Probleme der Bitumenlogistik durch die modellhafte Integration neuer Technologien der Bitumenkalthandhabung zu lösen. Hierfür werden sowohl die existierenden Systeme der Versorgungssicherung als auch ihres Teilbereichs, der physischen Bedarfsdeckung, vorgestellt und verglichen. Neben der damit verbundenen Untersuchung ihrer Wirtschaftlichkeit und ökologischen Auswirkungen werden auch Parameter bestimmt, die die Technologie-, Kapazitäten- und Standortwahl beeinflussen und durch deren Kenntnis es somit möglich wird, die Entscheidungsfindung in diesem Kontext zu erleichtern.

Zur Bearbeitung der aufgezeigten Aufgabenstellung wird die sich ergebenden Forschungsfragen in Kapitel 1 genau definiert. Kapitel 2 dient dazu, zunächst grundlegende Zusammenhänge der Bitumenspezifikation, -produktion und -logistik und schließlich der Asphaltproduktion vorzustellen. Hieraus werden die technischen Besonderheiten der Bitumenhandhabung deutlich. Daneben ist es möglich, Veränderungen auf den Bitumen- und Asphaltmärkten vorzustellen und hieraus die sich abzeichnenden Trends herauszuarbeiten. Es wird deutlich, dass die Probleme im Bereich der Bitumenversorgung zukünftig zunehmen werden. Die zur Verfügung stehenden Methoden der Versorgungssicherung werden in Kapitel 3 vorgestellt. Hierbei wird eine Unterscheidung in Preisabsicherungsmethoden beim Einkauf (bzw. einkaufsseitige Absicherungsmethoden) und Methoden der physischen Versorgungssicherung getroffen. Die Ausprägungsformen beider Bereiche werden vorgestellt. Es zeigt sich, dass die Lagerung von Bitumen eine sinnvolle Alternative zu Termingeschäften darstellt. Um die vergleichsweise komplexe Kaltlagerung unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten besser mit der Bitumenheißlagerung vergleichen zu können, wird die damit verbundene Kalthandhabung in Kapitel 4 hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Abfüll-, Verpackungs- und Verflüssigungstechnologien ausführlich beschrieben. Hieraus ergeben sich bereits mehrere Kombinationsmöglichkeiten von Verpackungs- und Verflüssigungstechnologien, die in sogenannten Technologiekombinationen zusammengefasst werden.

Um die Kosten der zur Anwendung kommenden Technologien der Bitumenkalthandhabung genau zu beschreiben, werden in Kapitel 5 zunächst Methoden der Investitionsschätzung herangezogen. Aufbauend auf den berechneten Werten wird es damit anschließend möglich, investitions- und betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten zu beschreiben. Für jede Technologiekombination können so die jeweiligen Kostenfunktionen generiert werden, die in Kapitel 6 in

ein mathematisches Optimierungsmodell integriert werden. Das Modell wird in GAMS als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formuliert. Dieses allgemeingültige Modell wird dann auf ein Referenzunternehmen in Deutschland angewendet. Hierzu werden die unternehmensspezifischen Daten und Parameter in das Modell integriert, nachdem die zur Verfügung stehenden Produktionsstandorte hinsichtlich ihrer Eignung für den Modelllösungsraum analysiert wurden. Anschließend werden Preis- und Bedarfsdaten und andere Parameter variiert, um deren Einfluss auf die Untersuchungsgrößen – Gesamtkostenreduktion, Technologien, Standorte und Kapazitäten – ermitteln zu können. Es zeigt sich, dass sich je nach Anwendungsfall zirka 2 bis 4 % der jährlichen Gesamtkosten einsparen lassen, wenn die Bitumenkalthandhabung im Referenzunternehmen eingesetzt wird. Dies gilt, insofern eine saisonale Preisdifferenz von mehr als 80 € pro Tonne Bitumen vorliegt. An den ermittelten Technologiestandorten findet sowohl die Lagerung als auch die Wiederverflüssigung statt. Die geeignetsten Technologien werden ebenfalls bestimmt.

Um die Bitumenkalthandhabung abschließend unter ökologischen Gesichtspunkten mit der Bitumenheißhandhabung, insbesondere mit der Heißlagerung zu vergleichen, werden die in Kapitel 6 ermittelten Technologien und die Versorgungskette mit Tanklagerung in Kapitel 7 mittels einer ökobilanziellen Bewertung gegenübergestellt. Die Bewertung in Eco-Indikator-99-Punkten – als Maß für die Umweltauswirkungen der Verfahren – zeigt, dass bei gleichen Transportwegen die Bitumenheißhandhabung ökologischer ist als die Bitumenkalthandhabung.

Diese und die zuvor ermittelten Ergebnisse fließen in die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Implementierung der neuen Technologien im Referenzunternehmen und anderen Unternehmen ein. Die hier ermittelten Standorte mit Technologien bestimmter Kapazitäten für das Referenzunternehmen beziehen sich ausschließlich auf ökonomische Aspekte. Die existierenden Tanklager sollen gemäß den Berechnungsergebnissen durch Kaltlager mit Kartonverpackungen und Schmelztöpfen am Standort Hirschfeld ersetzt werden.

Die Entwicklungen dieser Arbeit haben auch Gültigkeit für andere bitumenverarbeitende Betriebe. Das entwickelte Modell kann leicht an die Spezifika des jeweiligen Baustoffproduzenten angepasst werden, um so eine optimale Technologie-, Kapazitäten- und Standortwahl zu ermöglichen. Auch das Referenzunternehmen kann das Modell anwenden, um den Betrachtungsraum (Deutschland) auf den Gesamtkonzern (weltweit) zu erweitern. Hierbei wäre im Modell, wie auch in der Realität, ein ganz wesentliches zusätzliches Einsparpotential realisierbar: Neben der Partizipation an saisonalen Preisunterschieden würde es

durch die Bitumenkalthandhabung über längere Distanzen in erhöhtem Maße möglich, regionale Preisunterschiede zu nutzen. Die Kalttransportkosten sind beispielsweise beim LKW-Transport nur zirka halb so hoch wie beim Heißtransport. Durch die Kalthandhabung kann es so einerseits infrastrukturell schlecht erschlossenen Raffinerien (beispielsweise ehemaliger Ostblockländer) möglich werden, das produzierte Bitumen zu höheren Preisen zu verkaufen. Andererseits wird es infrastrukturell unterentwickelten Ländern (beispielsweise in Afrika) möglich, das Bitumen zu günstigeren Konditionen für zukünftige Infrastrukturmaßnahmen im Asphaltstraßenbau zu erwerben.

9 Anhang

9.1 Bitumenspezifikationen

Tabelle 9-1: Straßenbaubitumen-Spezifikationen für die Sorten mit Penetrationen von 20 × 0,1 mm bis 220 × 0,1 mm gemäß DIN EN 12591 (2005)

Eigenschaften	Einheit	Prüfverfahren	Klasse 0 ^a	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetration bei 25 °C	0,1 mm	EN 1426	/	20 – 30	30 – 45	35 – 50	40 – 60	50 – 70	70 – 100	100 – 150	160 – 220
Erweichungspunkt	°C	EN 1427	/	55 – 63	52 – 60	50 – 58	48 – 56	46 – 54	43 – 51	39 – 47	35 – 43
Beständigkeit gegen Verhärtung bei 163 °C		EN 12607-1	/								
Verbleibende Penetration	%		/	≥ 55	≥ 53	≥ 53	≥ 50	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
Anstieg des Erweichungspunktes, max. – Schweregrad 1 oder Anstieg des Erweichungspunktes, max. – Schweregrad 2 ^b	°C		/	≤ 8 oder ≤ 10	≤ 8 oder ≤ 11	≤ 8 oder ≤ 11	≤ 9 oder ≤ 11	≤ 9 oder ≤ 11	≤ 9 oder ≤ 11	≤ 10 oder ≤ 12	≤ 11 oder ≤ 12
Flammpunkt ^b	°C	EN ISO 2592	/	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
Löslichkeit ^b	%	EN 12592	/	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
Massenänderung nach RTFOT ^b	%	EN 12607-1	/	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
Penetrationsindex		Anhang A ^c	KA ^d	-1,5 bis +0,7	-1,5 bis +0,7						
Kinematische Viskosität bei 135 °C	mm ² /s	EN 12595	KA ^d	≥ 530	≥ 400	≥ 370	≥ 325	≥ 295	≥ 230	≥ 175	≥ 135
Dynamische Viskosität bei 60 °C	Pa s	EN 12596	KA ^d	≥ 440	≥ 260	≥ 225	≥ 175	≥ 145	≥ 90	≥ 55	≥ 30
Brechpunkt nach Fraaß	°C	EN 12593	KA ^d	–	≤ -5	≤ -5	≤ -7	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15

Tabelle 9-2: Straßenbaubitumen-Spezifikationen für die Sorten mit Penetrationen von 250 × 0,1 mm bis 900 × 0,1 mm gemäß DIN EN 12591 (2005)

	Einheit	Prüfverfahren	250/330	330/430	500/650	650/900
Penetration bei 25 °C oder	0,1 mm	EN 1426	250 – 330	–	–	–
Penetration bei 15 °C	0,1 mm	EN 1426	–	90 – 170	140 – 260	180 – 360
Dynamische Viskosität bei 60 °C oder	Pa s	EN 12596	≥ 18	≥ 12	≥ 7,0	≥ 4,5
Erweichungspunkt	°C	EN 1427	30 – 38	28 – 36	–	–
Beständigkeit gegen Verhärtung bei 163 °C		EN 12607-1				
Verhältnis der Viskositäten bei 60 °C oder Anstieg des Erweichungspunktes	°C			≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0
Kinematische Viskosität bei 135 °C	mm ² /s	EN 12595	≥ 100	≥ 85	≥ 65	≥ 50
Flammpunkt	°C	EN 2719	≥ 180	≥ 180	≥ 180	≥ 180
Löslichkeit	Masse-%	EN 12592	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
Beständigkeit gegen Verhärtung bei 163 °C		EN 12607-1				
Massenänderung	%			≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,5
Brechpunkt nach Fraaß	°C	EN 12593	≤ -16	≤ -18	≤ -20	≤ -20

Tabelle 9-3: Straßenbaubitumen-Spezifikation – Weichbitumen: Bitumensorten, die nach ihrer kinematischen Viskosität bei 60 °C bezeichnet und spezifiziert werden gemäß DIN EN 12591 (2005)

	Einheit	Prüfverfahren	V1500	V3000	V6000	V12000
Kinematische Viskosität bei 60 °C	mm ² /s	EN 12595	1 000 – 2 000	2 000 – 4 000	4 000 – 8 000	8 000 – 16 000
Beständigkeit gegen Verhärtung bei 120 °C (TFOT)		EN 12607-2				
Verhältnis der Viskositäten bei 60 °C			≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 2,5	≤ 2,0
Flammpunkt	°C	EN 2719	≥ 160	≥ 160	≥ 180	≥ 180
Löslichkeit	%(Masseanteil)	EN 12592	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
Beständigkeit gegen Verhärtung bei 120 °C (TFOT)		EN 12607-2				
Masseänderung* (Absolutwert)	%		≤ 2,0	≤ 1,7	≤ 1,4	≤ 1,0

9.2 Bitumenhaltige Bindemittel neben Straßenbaubitumen

Fluxbitumen gemäß DIN EN 12597 wird durch Vermischen eines weichen Straßenbaubitumens mit schwerflüchtigen Fluxölen auf Mineralölbasis und gegebenenfalls weiteren Zusätzen hergestellt [StKr05]. Dies erleichtert die Verarbeitung bei niedrigen Temperaturen [VeMeEy09]. Nach einer Übergangszeit, in der die mit Fluxbitumen hergestellten Verbundwerkstoffe nicht übermäßig belastet werden dürfen, sind die Fluxöle größtenteils verdunstet und es bleibt ein bitumenhaltiges Bindemittel mit sehr ähnlichen Eigenschaften wie das verwendete Straßenbaubitumen zurück [VeMeEy09].

Bitumenemulsionen gemäß DIN EN 13808 (2005) sind feinste Verteilungen von Bitumen in Wasser [StKr05]. Bitumentropfen werden hierzu mittels einer Kolloidmühle und der Zugabe von Emulgatoren in Wasser dispergiert [StKr05][VeMeEy09]. Bitumenemulsionen können entsprechend ihrer Eigenschaften auf verschiedene Art und Weise kategorisiert werden [VeMeEy09].

Zunächst besteht hierbei die Möglichkeit der Unterteilung in anionische und kationische Emulsionen. Je nachdem wie sauer die mineralischen Bestandteile des Asphalt sein werden (u.a. sind Basalt, Diabas, Kalkstein mit einem SiO₂-Gehalt zwischen 34 und 52 M% basisch und Quarzit, Grauwacke, Granit mit einem SiO₂-Gehalt > 63 M% sauer [VeMeEy09][Ma02]), besteht bei der Herstellung der Bitumenemulsion die Möglichkeit, durch geeignete Emulgatorenwahl ladungsbedingte Abstoßungs- und Anziehungskräfte zu erzeugen. Beispielsweise kann durch die Zugabe einer Lauge und Fettsäuren eine Emulsion erzeugt werden, in der die Bitumentropfen negativ geladen sind, oder alternativ durch die Zugabe von Fettaminen und einer Säure eine Emulsion, in der die Bitumentropfen positiv geladen sind [VeMeEy09]. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird hierzu zumeist Kalilauge (anionische Bitumenemulsion) beziehungsweise Salzsäure (kationische Bitumenemulsion) verwendet. Später haften anionische Emulsionen an basischen Gesteinen naturgemäß sehr gut. Ebenso verhält es sich mit kationischen Emulsionen an sauren Gesteinen [VeMeEy09].

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Unterteilung von Bitumenemulsionen in instabile, stabile und halbstarile Emulsionen. Unstarile Emulsionen (U) brechen sofort bei der Berührung mit dem Gestein und können nur verspritzt oder vergossen werden [VeMeEy09]. Starile Emulsionen (S) brechen erst durch das Verdunsten des Wassers und lassen sich mit jeder Art von Mineralien vermischen [VeMeEy09]. Halbstarile Emulsionen (H) haben Eigenschaften, die zwischen denen der beiden ersten Typen liegen.

Als Letztes besteht die Möglichkeit der Spezifikation mittels des Bindemittelgehalts in der Emulsion. Die im Straßenbau verwendeten Bitumenemulsionen haben prozessbedingt 55 bis 70 M% (Masseprozent) Bitumenanteil [VeMeEy09].

Kaltbitumen entsteht bei der Zugabe von Lösungsmitteln, beispielsweise 20 M% dünnflüssiger Benzine, zu Straßenbaubitumen. Hierdurch wird das Bindemittel im kalten Zustand verarbeitbar [StKr05]. Aufgrund des niedrigen Siedepunkts der zugegebenen Lösungsmittel muss Kaltbitumen zeitnah verarbeitet werden [VeMeEy09]. Die zurückbleibenden Bindemittelreste haben sehr ähnliche Eigenschaften wie das als Grundstoff verwendete Straßenbaubitumen. Die Lösungsmitteldämpfe verursachen erhöhte Anforderungen an die Arbeitssicherheit, denn sie sind einerseits leicht entflammbar und darüber hinaus gesundheitsschädlich. Wegen der Belastung der Luft und des hohen Preises ist der Einsatz von Kaltbitumen selten, bei einigen Spezialarbeiten der Straßenerhaltung allerdings unverzichtbar [VeMeEy09].

Polymermodifizierte Bitumen sind die häufigste Anwendungsform bitumenhaltiger Bindemittel neben dem reinen Destillationsbitumen im Straßenbau. Polymermodifiziertes Bitumen (PmB) ist ein physikalisches Gemisch von Bitumen und Polymeren [StKr05]. Das Mischen von Bitumen und Polymeren soll eine Verbesserung der Standfestigkeit, eine Erweiterung der Plastizitätsspanne und eine bessere Haftung am Gestein bewirken [VeMeEy09].

Entsprechend der Vielzahl an existierenden Kunststoffen gibt es eine große Anzahl an Möglichkeiten der Modifizierung mittels Polymeren. Einschränkend wirken hierbei technische Kriterien (die Polymere müssen gut mit Bitumen mischbar sein) und Kriterien der Wirtschaftlichkeit (oft werden Kunststoffreste der Industrie verwendet).

Es besteht die Möglichkeit der Unterteilung polymermodifizierter Bitumen in Elastomer-modifizierte und Thermoplasten-modifizierte PmB (TL-Bitumen). Eine weitere, sehr sinnvolle Spezifikation ist die Unterteilung in PmB, die fertig gemischt aus einer Modifizieranlage geliefert werden, und PmB, die im Zuge der Asphaltherstellung in der Asphaltmischanlage gemischt werden. Velske,

Mentlein und Eymann [VeMeEy09] raten von letzterer Variante ab, da es hierbei unter anderem zu Inhomogenitäten, Entmischungen und Überhitzungen kommen kann.

PmB können auch beim Heißtransport und der Heißlagerung entmischen, die Kaltlogistik schadet den meisten PmB-Arten erfahrungsgemäß hingegen nicht [Wu11].

Hartbitumen (Hochvakuumbitumen) wird in der Raffinerie durch besonders großen Unterdruck aus dem Straßenbaubitumen gewonnen [StKr05]. Da es im Straßenbau nicht eingesetzt wird, ist es für die Untersuchungen dieser Arbeit nicht relevant, wird hier allerdings der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Oxidationsbitumen entsteht, wenn bei hohen Temperaturen in einer entsprechenden Anlage Luftsauerstoff durch weiches Straßenbaubitumen hindurchgeblasen wird [StKr05]. Für Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt kommen diese Oxidationsbitumen aufgrund ihrer Härte kaum zur Anwendung [BrSchRü10][Ti09] und sind deshalb für diese Arbeit nicht weiter relevant. Die Tatsache, dass das Bitumen durch Sauerstoff verhärtet, kann allerdings erhebliche Relevanz auf die Eigenschaftsveränderung beim Wiederverflüssigen des Bitumens haben. Bei der Beschreibung der Technologien der Bitumenkalthandhabung in Kapitel 3 sowie bei der Auswahl entsprechender Technologiekombinationen in Kapitel 4 wird diese Tatsache mitberücksichtigt.

Gummibitumen wird hier nicht den polymermodifizierten Bitumen zugeordnet, da neben Polymeren auch Ruß und Schwefel [NWT11] im zumeist beigemischten Altreifengranulat vorhanden sind. Durch die Zugabe dieser Gummigranulate werden Wärmestandfestigkeit und Tiefentemperaturverhalten der Straße verbessert und damit wird ihre Nutzungsdauer verlängert [Ne08]. In Deutschland gibt es vergleichsweise wenig Erfahrung mit gummimodifiziertem Bitumen. Die tatsächliche Eignung des hieraus produzierten Asphalts und die mögliche Lagerdauer im heißflüssigen Zustand werden daher teilweise in der Praxis als noch zu unsicher eingeschätzt. Es gibt bisher, abgesehen von der „TL-RmB10“, kein deutsches Regelwerk, das Richtlinien in diesem Bereich vorgibt.

Naturasphalt sind alle natürlichen Bitumenvorkommen. Hierzu zählen Asphaltseen, Fels-Asphalte und Gilsonite [ReWh03]. Die teilweise irreführende Bezeichnung „Asphalt“ kommt einerseits durch die Vermischung der Begriffe Bitumen und Asphalt in der angloamerikanischen Literatur zustande und ist andererseits teilweise zutreffend, da Naturbitumenvorkommen oft durch mineralische Bestandteile verunreinigt sind, mit denen sie definitionsgemäß eine Art Asphalt bilden. Bei der bekanntesten Naturasphaltgattung, dem Trinidad-

Epuré, kommen tonige Bestandteile hinzu, die diesem Bindemittel besondere Eigenschaften verleihen [VeMeEy09]. Erwähnenswert ist Trinidad-Epuré an dieser Stelle auch deshalb, da es aufgrund weltweiter Nachfrage mit damit einhergehenden großen Transportstrecken in kaltem Zustand distribuiert wird.

Mischformen bituminöser Bindemittel sind in jeder Form denkbar. Bei Straube und Krass [StKr05] werden neben polymermodifizierten Bitumen gemäß DIN EN 14023 polymermodifizierte Bindemittel für Oberflächenbehandlungen gemäß TL PmBO und polymermodifizierte Bitumenemulsionen für dünne Schichten im Kalteinbau gemäß TL PmBE-DSK aufgeführt. Zu polymermodifizierten Bindemitteln zählen hierbei polymermodifizierte Fluxbitumen, polymermodifizierte Bitumenemulsionen und polymermodifizierte Fluxbitumenemulsionen.

9.3 Bitumenspezifikation und genormte Prüfverfahren

Für eine effiziente Kalthandhabung des Bitumens ist die Berücksichtigung seiner Materialeigenschaften von großer Bedeutung. Die Bitumeneigenschaften lassen sich anschaulich anhand ihrer Messung mittels der Bitumenprüfverfahren verdeutlichen. In diesem Unterabschnitt werden die gebräuchlichsten Begriffe im Kontext der Bitumenspezifikation daher anhand der jeweiligen Messverfahren vorgestellt.

Die Anforderungen an bitumenhaltige Bindemittel sind in der TL Bitumen - STB 07 geregelt [Th08]. Demnach erfolgt die Beurteilung der Bitumeneigenschaften nach verschiedenen Prüfverfahren. Im Weiteren werden zwei Standardverfahren der Bitumenuntersuchung, die Spezifikation nach DIN EN 1426 (Penetration bei 25 °C) und DIN EN 1427 (Erweichungspunkt nach Ring und Kugel) dargestellt. Die ermittelten Werte ermöglichen dabei nur bedingt eine Aussage über die Eignung des Bitumenprodukts für die Herstellung von dauerhaftem Asphalt, weswegen weitere Prüfverfahren abschließend aufgelistet werden.

Nadelpenetration nach DIN EN 1426

Anhand der Nadelpenetration [DIN EN 1426 (2007)] wird die Härte des Bitumens im mittleren Temperaturbereich bestimmt. Hierbei wird der Weg gemessen, den eine mit 100 g belastete genormte Nadel bei 25 °C Temperatur in 5 Sekunden in die Oberfläche des zu prüfenden Bitumens eindringt. Der Messwert, angegeben in 1/10 mm, dient als Grundlage zur Einordnung des Bindemittels. Die Benennung der Straßenbaubitumensorten erfolgt nach der Spanne der in den Regelwerken vorgeschriebenen Nadelpenetrationen (Abbildung 34).

Die Bezeichnung des Bitumens 50/70 bedeutet, dass ein Bitumen eine Nadelpenetration zwischen 50 und 70 [1/10 mm] aufweisen muss, um entsprechenden Anforderungen der Regelwerke zu erfüllen.

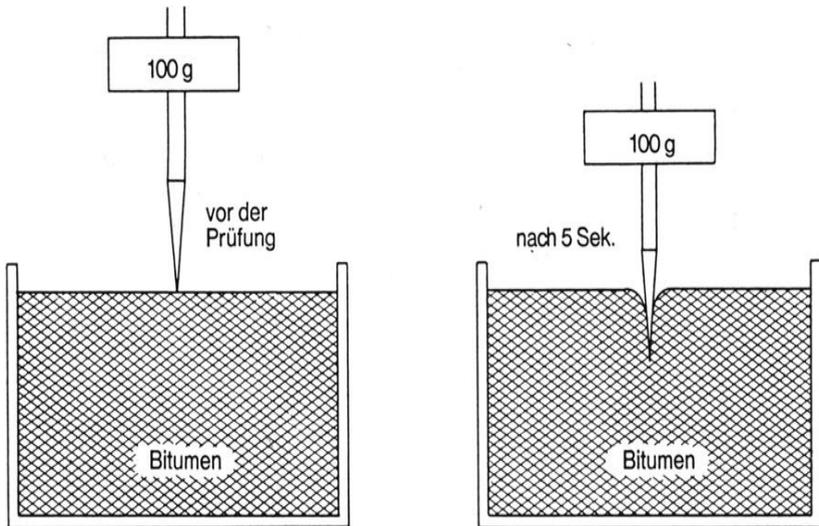


Abbildung 34: Bestimmung der Nadelpenetration nach DIN EN 1426 [Ko08]

Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN EN 1427

Da der Übergang vom festen in den flüssigen Zustand bei Bitumen gleitend ist, lässt sich kein Schmelzpunkt, sondern nur ein definierter Erweichungspunkt bestimmen. Dieser kennzeichnet den Konsistenzübergang vom plastischen in den flüssigen Zustand [Ko05]. Weiterhin dient er zur Beurteilung der Bindemittelleigenschaften im oberen Temperaturbereich. Bei der Bestimmung dieses Wertes wird eine in einen Metallring gegossene Bitumenschicht bei konstant steigender Temperatur von 5 K/min in einem Flüssigkeitsbad erwärmt. Hierbei wird die Bindemittelschicht mit einer 3,5 g schweren Stahlkugel so lange belastet, bis sie eine festgelegte Verformung von 25,4 mm erfährt (Abbildung 35). Die an dieser Stelle gemessene Temperatur ist der Erweichungspunkt Ring und Kugel [DIN EN 1427 (2007)]. Je höher dieser liegt, desto härter ist das Bitumen.

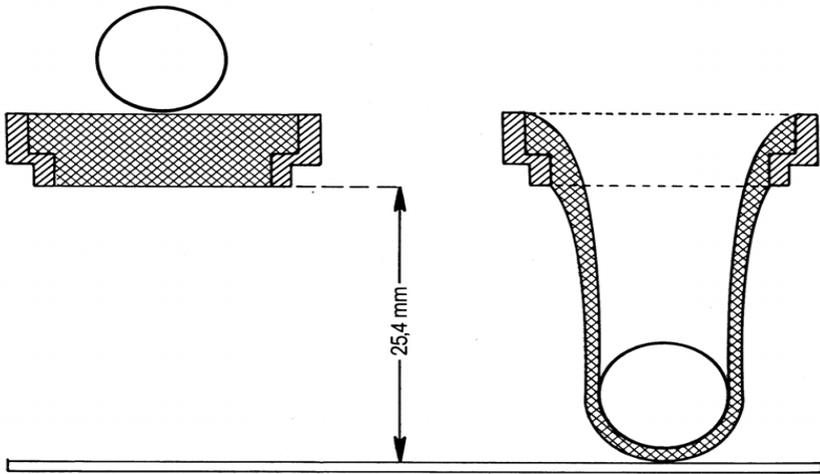


Abbildung 35: Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN EN 1427 [Ko08]

Weitere Bitumenprüf- und Untersuchungsverfahren

Neben den häufig angewendeten Messungen der Nadelpenetration und des Erweichungspunkts Ring und Kugel gibt es weitere genormte Untersuchungsverfahren für Bitumen, die der Vollständigkeit halber im Folgenden aufgelistet werden.

- Beschleunigte Langzeit-Alterung mit dem rotierenden Zylinder nach DIN EN 15323
- Beschleunigte Langzeit-Alterung mit dem Druckalterungsbehälter nach DIN EN 14769
- Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft nach DIN EN 12607-1
- Bestimmung der Affinität nach DIN EN 12697-11
- Bestimmung des Paraffingehaltes nach DIN EN 12606
- Bestimmung der Löslichkeit nach DIN EN 12592
- Bestimmung der dynamischen Viskosität nach DIN EN 12596
- Bestimmung der Biegekriechfestigkeit nach DIN EN 14771
- Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels nach DIN EN 14770
- Elastische Rückstellung nach DIN EN 13398

- Kraftduktilität nach DIN EN 13589
- Duktilität nach DIN EN 52013
- Brechpunkt nach Fraaß nach DIN EN 12593
- Weitere Bitumenprüf- und Untersuchungsverfahren

9.4 Die Zusammensetzung von Bitumen

Bitumen wird traditionell als Kolloidal-System beschrieben [ReWh03][Gi65]. Die kontinuierliche Phase besteht hierbei aus sogenannten Maltenen [VeMeEy09]. Es handelt sich hierbei um Kohlenwasserstoffgemische von öligem Konsistenz [VeMeEy09] und niedrigem Molekulargewicht [ReWh03]. Ihre Bestandteile sind die nicht polaren dunkelbraunen Aromate und die nicht polaren weißen Saturated, beides Kohlenwasserstoffverbindungen unterschiedlicher Bindungsstruktur [ReWh03]. In ihnen sind die Mizelle dispergiert. Sie besitzen einen Kern aus Asphaltene, die von Erdölharzen umschlossen sind [VeMeEy09]. Asphaltene sind schwarze amorphe polare Kohlenwasserstoffverbindungen mit Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff. Fünf bis 25 Prozent des Bitumens besteht aus Asphaltene [ReWh03], wobei Bitumen mit einem hohen Asphaltengehalt vergleichsweise „härter“ ist.

In großen Teilen der Literatur werden die molekularen Bestandteile und Bindungen des Bitumens als kompliziert und unübersichtlich dargestellt (vgl. [KrMiRu09][We08][Wa06]). Dies mag, bedingt durch den organischen Ursprung des Bitumens, bei oberflächlicher Betrachtung zutreffen, doch gibt es auch Literatur aus den Chemiewissenschaften (vgl. [OeNe75][OeHo76][Vi76][Va77][Cr81][Th09]), die das Asphaltbindemittel und Erdöle hinsichtlich ihrer Elemente, Moleküle und Molekülgruppen umfassend beschreiben. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Bitumenbestandteile in diesen Kategorien gegeben.

Unter anderem ist der Vanadium-Nickel-Gehalt eines Rohöls ein Hinweis auf die Herkunft (Provenienz) eines Erdöls. Auch bei daraus hergestelltem Bitumen lässt der Vanadium-Nickel-Gehalt Rückschlüsse auf die Herkunft zu. Allerdings werden in den Raffinerien häufig Rohölgemische eingesetzt, was die nachträgliche Zuordnung zu Provenienzen erschwert bzw. unmöglich macht [Hö10].

Elementaranalytische Beschreibung

Aufgrund seines organischen Ursprungs enthält Bitumen eine Vielzahl von Stoffen. Die Anteile der Hauptelemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff

(N), Schwefel (S) und Sauerstoff (O) sind in Tabelle 9-4 entsprechend ihren Anteilen an den oben aufgeführten Asphaltene, Harzen, Aromaten und Saturate aufgeführt.

Tabelle 9-4: Durchschnittliche Verteilung der Hauptelemente im Bitumen [ReWh03]

		Anteil am Bi- tumen in M%	C in M%	H in M%	N in M%	S in M%	O in M%	Molekular- gewicht in u
Mizelle	Asphaltene	5-25	82,0	7,3	1,0	7,8	0,8	1000- 100.000
	Harze	ca. 20	81,0	9,1	1,0	5,2	-	500-50.000
Maltene	Aromate	40-65	83,3	10,4	0,1	5,6	-	300-2.000
	Saturate	5-20	85,6	13,2	0,05	0,3	-	ca. 835

Hinzu kommt eine Vielzahl von Metallen [Cr81], insbesondere Nickel und Vanadium als Verunreinigungen oder als Kolloid in Verbindungen wie Salzen oder anderen Halbmetallkomplexen [ReWh03].

Molekülanalytische Beschreibung

Varavinit [Va77] hat vier verschiedene Industriebitumen hinsichtlich ihrer molekularen Bestandteile chemisch analysiert. Hierfür wurde das Bitumen in saure und basische Bestandteile, Neutralheteroverbindungen (NHV) und Kohlenwasserstoffe (KWST), insbesondere Asphaltene zerlegt. Diese Bestandteile werden wiederum hinsichtlich ihrer wichtigsten enthaltenen Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 9-5 dargestellt.

Tabelle 9-5: Durchschnittliche Verteilung der Moleküle im Bitumen und ihre Elementarverteilung [Va77][Th09]. Ca.-Angaben aufgrund Störeinfluss bei der Messung

Kategorisierung nach		Anteil am Bi- tu-men in M%	C in M%	H in M%	N in M%
Ladungsart	Base	19,3	82,1	8,5	0,4
	Säure	6,5	79,9	8,1	0,8
	Neutrale Heteroverbin- dungen	12,8	83,4	10,5	0,5
Kohlenwasser- stoffe (KWST)	nicht Asphaltene KWST	55,8			
	- Gesättigte KWST				
	Paraffine				
	Naphtene				
	- Ungesättigte KWST				
	Olefine				
	Aromate				
	Asphaltene KWST	26,2			

Diese Werte können in erster Näherung auch für die Quantifizierung molekularer Bestandteile bituminöser Bindemittel im Straßenbau herangezogen werden. Für die Verarbeitbarkeit des Bitumens wichtigster Bestandteil innerhalb der Kohlenwasserstoffverbindungen sind die Paraffine. Paraffine können im Bitumen in unterschiedlicher Form vorliegen: als grobkristalline Makroparaffine (geradkettige n-Paraffine mit geringem Anteil an Iso- und Cycloparaffinen), feinkristalline Mikroparaffine (Iso- und Cycloparaffine mit langen Seitenketten und geringeren Mengen an n-Paraffinen) und als teilkristalline/amorphe Paraffine (u. a. halbfeste, überwiegend aus n-Paraffinen (90 %) und Iso- und Cycloparaffinen (10 %) bestehende Gatschparaffine), jeweils in unterschiedlichen Anteilen [Th09][ObRa97].

Gruppenanalytische Beschreibung

Varavinit [Va77] hat neben den Molekülen (vorheriger Abschnitt) auch die Molekülgruppen hinsichtlich ihrer Häufigkeit in vier verschiedenen Industriebitumen untersucht. Der Vollständigkeit halber seien auch diese Analyseergebnisse in Tabelle 9-6 aufgeführt. Als Methylgruppen werden Kohlenstoffatome in Kohlenwasserstoffketten bezeichnet, die Atombindungen mit drei Wasserstoffatomen eingehen. Methylen bezeichnet Kohlenstoffatome in Verbindung mit zwei Wasserstoffatomen und Methin einfache Bindungstypen dieser Art.

Tabelle 9-6: Gruppenanalyse von Bitumen [Va77].

	%C _{CH₃}	%C _{CH₂}	%C _{CH}	%C _{∑α}	%H _O	%C _{Char}
Bitumen	12,470	31,863	21,565	12,870	0,063	7,433
Base	10,415	24,675	16,330	12,383	0,114	9,019
Säure	5,5325	11,945	7,965	5,4125	0,061	3,795
NHV+ KWST	13,535	34,253	22,838	10,558	0,056	6,990

Tabelle 9-6 stellt den relativen Gehalt des Kohlenwasserstoffs dar an nicht Methylgruppen %C_{CH₃}; nicht Methylengruppen %C_{CH₂}; Methingruppen %C_{CH}. Außerdem: den relativen aromatenständigen Kohlenwasserstoffgehalt der gesamten Methyl-, Methylene- und Methingruppen %C_{∑α} und außerdem den relativen olefinischen Doppelbindungs-Protongehalt %H_O und den relativen aromatischen Kohlenstoffgehalt %C_{Char}.

Aufgrund der Vielzahl von Kohlenstoffverbindungen im Bitumen wird auf eine genauere Darstellung anderer Analyseergebnisse an dieser Stelle verzichtet.

9.5 Parameter für die Standortplanung

Tabelle 9-7: Distanzen zwischen den Asphaltmischanlagen in Kilometern

APPs	Langen	Mönsheim	Hamburg- Peute	Langentrog	Süsel	Villip	Lösau	Westenfeld	Exleben	Villingen	Köln-Niehl	Kölleda	Hermisdorfer Kreuz	Grenis	Hamburg- Afrikakai	Vetschau	Dresden- Kaditz	Spremburg
Langen	0	169	500	387	590	181	365	211	275	257	200	298	324	386	501	583	468	565
Mönsheim	169	0	663	222	753	310	453	375	371	124	356	395	410	194	664	632	517	614
Hamburg- Peute	500	663	0	806	896	458	410	358	376	762	414	446	446	501	504	404	476	565
Langentrog	387	222	806	0	896	553	620	543	553	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Süsel	590	753	896	806	0	545	497	444	492	448	350	455	455	524	524	404	476	565
Villip	181	310	458	553	896	0	474	497	543	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Lösau	365	453	410	620	497	545	0	384	384	424	433	433	433	433	433	433	433	433
Westenfeld	211	375	358	543	444	384	384	0	356	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Exleben	275	371	376	553	492	384	384	356	0	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Villingen	257	124	762	509	448	424	433	455	455	0	411	411	411	411	411	411	411	411
Köln-Niehl	200	356	414	599	501	384	436	436	436	436	0	93,9	475	475	475	475	475	475
Kölleda	298	395	368	524	455	436	436	436	436	436	93,9	0	475	475	475	475	475	475
Hermisdorfer Kreuz	324	410	446	501	455	436	436	436	436	436	475	475	0	475	475	475	475	475
Grenis	386	194	781	30,4	868	528	550	550	550	550	475	475	475	0	475	475	475	475
Hamburg- Afrikakai	501	664	6,5	807	97,8	458	413	413	413	413	475	475	475	475	0	475	475	475
Vetschau	583	632	480	722	448	692	692	692	692	692	475	475	475	475	475	0	475	475
Dresden- Kaditz	468	517	480	607	525	648	648	648	648	648	475	475	475	475	475	475	0	475
Spremburg	565	614	431	704	476	576	576	576	576	576	475	475	475	475	475	475	475	0
Langen	0	169	500	387	590	181	365	211	275	257	200	298	324	386	501	583	468	565
Mönsheim	169	0	663	222	753	310	453	375	371	124	356	395	410	194	664	632	517	614
Hamburg- Peute	500	663	0	806	896	458	410	358	376	762	414	446	446	501	504	404	476	565
Langentrog	387	222	806	0	896	553	620	543	553	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Süsel	590	753	896	806	0	545	497	444	492	448	350	455	455	524	524	404	476	565
W.-Villip	181	310	458	553	896	0	474	497	543	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Lösau	365	453	410	620	497	545	0	384	384	424	433	433	433	433	433	433	433	433
Westenfeld	211	375	358	543	444	384	384	0	356	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Exleben	275	371	376	553	492	384	384	356	0	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Villingen	257	124	762	509	448	424	433	455	455	0	411	411	411	411	411	411	411	411
Köln-Niehl	200	356	414	599	501	384	436	436	436	436	0	93,9	475	475	475	475	475	475
Kölleda	298	395	368	524	455	436	436	436	436	436	93,9	0	475	475	475	475	475	475
Hermisdorfer Kreuz	324	410	446	501	455	436	436	436	436	436	475	475	0	475	475	475	475	475
Grenis	386	194	781	30,4	868	528	550	550	550	550	475	475	475	0	475	475	475	475
Hamburg- Afrikakai	501	664	6,5	807	97,8	458	413	413	413	413	475	475	475	475	0	475	475	475
Vetschau	583	632	480	722	448	692	692	692	692	692	475	475	475	475	475	0	475	475
Dresden- Kaditz	468	517	480	607	525	648	648	648	648	648	475	475	475	475	475	475	0	475
Spremburg	565	614	431	704	476	576	576	576	576	576	475	475	475	475	475	475	475	0
Langen	0	169	500	387	590	181	365	211	275	257	200	298	324	386	501	583	468	565
Mönsheim	169	0	663	222	753	310	453	375	371	124	356	395	410	194	664	632	517	614
Hamburg- Peute	500	663	0	806	896	458	410	358	376	762	414	446	446	501	504	404	476	565
Langentrog	387	222	806	0	896	553	620	543	553	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Süsel	590	753	896	806	0	545	497	444	492	448	350	455	455	524	524	404	476	565
W.-Villip	181	310	458	553	896	0	474	497	543	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Lösau	365	453	410	620	497	545	0	384	384	424	433	433	433	433	433	433	433	433
Westenfeld	211	375	358	543	444	384	384	0	356	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Exleben	275	371	376	553	492	384	384	356	0	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Villingen	257	124	762	509	448	424	433	455	455	0	411	411	411	411	411	411	411	411
Köln-Niehl	200	356	414	599	501	384	436	436	436	436	0	93,9	475	475	475	475	475	475
Kölleda	298	395	368	524	455	436	436	436	436	436	93,9	0	475	475	475	475	475	475
Hermisdorfer Kreuz	324	410	446	501	455	436	436	436	436	436	475	475	0	475	475	475	475	475
Grenis	386	194	781	30,4	868	528	550	550	550	550	475	475	475	0	475	475	475	475
Hamburg- Afrikakai	501	664	6,5	807	97,8	458	413	413	413	413	475	475	475	475	0	475	475	475
Vetschau	583	632	480	722	448	692	692	692	692	692	475	475	475	475	475	0	475	475
Dresden- Kaditz	468	517	480	607	525	648	648	648	648	648	475	475	475	475	475	475	0	475
Spremburg	565	614	431	704	476	576	576	576	576	576	475	475	475	475	475	475	475	0
Langen	0	169	500	387	590	181	365	211	275	257	200	298	324	386	501	583	468	565
Mönsheim	169	0	663	222	753	310	453	375	371	124	356	395	410	194	664	632	517	614
Hamburg- Peute	500	663	0	806	896	458	410	358	376	762	414	446	446	501	504	404	476	565
Langentrog	387	222	806	0	896	553	620	543	553	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Süsel	590	753	896	806	0	545	497	444	492	448	350	455	455	524	524	404	476	565
W.-Villip	181	310	458	553	896	0	474	497	543	509	200	324	324	386	501	583	468	614
Lösau	365	453	410	620	497	545	0	384	384	424	433	433	433	433	433	433	433	433
Westenfeld	211	375	358	543	444	384	384	0	356	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Exleben	275	371	376	553	492	384	384	356	0	455	211	298	324	386	501	583	468	614
Villingen	257	124	762	509	448	424	433	455	455	0	411	411	411	411	411	411	411	411
Köln-Niehl	200	356	414	599	501	384	436	436	436	436	0	93,9	475	475	475	475	475	475
Kölleda	298	395	368	524	455	436	436	436	436	436	93,9	0	475	475	475	475	475	475
Hermisdorfer Kreuz	324	410	446	501	455	436	436	436	436	436	475	475	0	475	475	475	475	475
Grenis	386	194	781	30,4	868	528	550	550	550	550	475	475	475	0	475	475	475	475

APPS	
Hartmannsdorf	Langen 404 Mönshelm 453 H.-Peute 520 Langentrog 543 Suesel 607 W.-Villip 513 Lösaus 486 Westenfeld 432 Ekleben 176 Villingen 552 K.-Nielh 516 Koellada 174 Hermisdorfer-K. 83,4 Grenis 518 H.-Afrikakai 521 Vetschau 195 D.-Kaditz 195 Spremberg 177 Hartmannsdorf 0 Mühhbrook 595 A.-Windischleuba 39,1 Zwickau 45,3 Sietzsch 112 Neustrelitz 377 Neubrandenburg 444 Rostock 446 Fretal 81 StegelitZ 46 B.-Ludwigsfelde 258 Wolteritz 93,6 Freudenstadt 518 Wilhelms-haven 777 Hirschfeld 221 Peez 474 Ladeburg 76,6 Marl 300 544
Mühhbrook	574 737 87,9 543 62,5 485 486 479 860 477 442 514 588 82,7 447 476 595 524 578 418 305 341 225 439 543 368 246 380 438 777 530 595 221 474 437 304 398
Altenburg-Windischleuba	376 464 450 554 536 485 52,4 439 154 137 563 146 1,8 450 232 213 39,1 524 42,4 70,4 346 447 439 115 180 270 145 278 132 68,9 530 578 523 91,6 492 304 501
Zwickau, Muldestraße	382 412 372 501 591 491 108 463 154 154 510 153 62,1 476 505 228 45,3 578 191 191 0 265 369 494 351 114 270 140 278 290 812 468 578 347 435 304 524
Sietzsch	398 486 372 576 458 507 108 414 146 146 585 484 387 77 372 512 228 228 112 418 265 37,8 146 361 194 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 475
Neustrelitz	655 745 258 324 288 697 410 308 429 531 946 844 928 336 912 810 372 258 224 246 377 305 341 305 447 401 191 0 265 369 494 143 143 146 37,8 0 436 384 316 272 172 140 145 382 390 585 893 516 468 298 140 143 120 584
Neubrandenburg	759 847 320 929 174 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Rostock	689 839 847 324 288 697 410 308 429 531 946 844 928 336 912 810 372 258 224 246 377 305 341 305 447 401 191 0 265 369 494 143 143 146 37,8 0 436 384 316 272 172 140 145 382 390 585 893 516 468 298 140 143 120 584
Freital	470 519 496 209 540 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
StegelitZ	449 612 255 324 380 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Berlin-Ludwigsfelde	535 623 333 333 377 450 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Wolteritz	410 498 703 392 450 790 450 519 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Freudenstadt	208 78,8 199 299 929 458 305 396 544 396 519 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Wilhelms-haven	491 655 219 703 392 450 790 450 519 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Hirschfeld (ab September 2010)	407 495 400 219 703 392 450 790 450 519 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Peez	686 836 199 299 929 458 305 396 544 396 519 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Ladeburg	611 434 335 299 929 458 305 396 544 396 519 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649
Marl (ab September 2010)	278 434 335 299 929 458 305 396 544 396 519 592 491 579 653 775 410 410 566 669 584 414 531 429 946 726 480 438 904 912 324 372 319 252 228 209 213 476 112 45,3 578 418 191 0 37,8 146 361 194 143 384 316 133 114 102 145 145 390 912 468 523 91,6 359 226 649

Tabelle 9-8: Distanzen von Raffineriestandorten zu Asphaltmischanlagen in Kilometern

Raffinerien:	
Karlsruhe	Langen 140 Mönshheim 58,3 H.-Peute 633 Langentrog 277 Suessel 719 W.-Willip 259 Lössau 490,8 Westenfeld 342,2 Ekleben 402 Villingen 179,8 K.-Niehl 311,2 Koelleda 426 Hermesdorfer- 450,8 Grenis 267,9 311,2 632,5 H.-Afrikakai 640,9 Vetschau 555,7 D.-Kaditz 398,5 471 647,7 Sprembg 379,3 Hartmanns- 314,4 Mühlbrook 490,8 704,8 502,9 A.-Windischl 326,5 Zwickau 449,7 Sietzsch 737,2 341,1 326,9 Neustreitz 783,8 607,4 884,3 Neubranden- 707,9 Rostock 700,7 394,7 Fretal 380,5 556,9 Stegelitz 800,7 624,3 661,8 B.- 485,4 61,2 Wolteritz 352 528,4 90,7 Freudenstadt 309,8 630 Wilhelms- 775,3 533,9 Hirschfeld 357,5 818,7 Peez 698,1 743,2 Ladeburg 566,7 401,2 Marl 575,5
Ingolstadt	317,5 263,6 700 267,9 781 490,2 314,4 507,5 325,6 340,7 508 598,5 274,4 242,4 696,2 471 464,5 379,3 64,5 768,5 326,9 326,5 273,3 326,9 607,4 707,9 700,7 380,5 624,3 485,4 352 309,8 775,3
Vohburg	331,7 372,5 467,3 709,2 270,3 795 491,8 480 328,6 521,7 339,8 343 448,4 222,2 288,6 244,8 710,4 471 398,5 485,4 379,3 95 328,6 782,7 64,5 340,7 326,5 287,5 273,3 502,7 341,1 326,9 621,6 607,4 403,6 722,1 707,9 174,9 396,4 320 638,5 624,3 181 499,6 485,4 47,7 366,2 352 312,2 309,8 789,5 486 371,7 52,87 393 712,3 698,1 580,9 262,5 589,7
S.-Leuna	372,5 467,3 405,8 553,3 270,3 795 491,8 480 328,6 521,7 339,8 343 448,4 222,2 288,6 244,8 710,4 471 398,5 485,4 379,3 95 328,6 782,7 64,5 340,7 326,5 287,5 273,3 502,7 341,1 326,9 621,6 607,4 403,6 722,1 707,9 174,9 396,4 320 638,5 624,3 181 499,6 485,4 47,7 366,2 352 312,2 309,8 789,5 486 371,7 52,87 393 712,3 698,1 580,9 262,5 589,7
K.-Godorf	185 335,8 432,6 576,1 345,5 518,6 34,5 474,2 135,6 380 380 462,6 32,45 404 430,7 550,6 433,8 663 574,9 692,1 509,5 509,5 404,1 495,2 489,7 284,5 385,9 587 678 654,4 745,5 622,6 554,3 576,2 682,2 562,2 497,7 507,9 457,4 379,6 464 379,6 281,2 372,4 480 513 620 528,9 560,1 113,4 10,2
Gelsen- kirchen	269,6 420,4 341,5 660,7 427,5 381,8 133,4 435,9 423,8 117,1 390 547 87 414,3 441 635,2 342,7 598,5 553 627,5 519,7 509,5 404,1 495,2 489,7 284,5 385,9 587 678 654,4 745,5 622,6 554,3 576,2 682,2 562,2 497,7 507,9 457,4 379,6 464 379,6 281,2 372,4 480 513 620 528,9 560,1 113,4 10,2
Brunsbüttel	580,9 739,5 86,9 887,8 139,7 381,8 133,4 551 493 451 430,3 856,5 501,8 446 521,4 862,3 80,59 478,4 598,5 574,2 507,5 602,2 73,5 735 585 713,7 385,9 284,5 385,9 587 678 654,4 745,5 622,6 554,3 576,2 682,2 562,2 497,7 507,9 457,4 379,6 464 379,6 281,2 372,4 480 513 620 528,9 560,1 113,4 10,2
Schwedt	684,4 779,2 371,5 865,1 139,7 381,8 133,4 551 493 451 430,3 856,5 501,8 446 521,4 862,3 80,59 478,4 598,5 574,2 507,5 602,2 73,5 735 585 713,7 385,9 284,5 385,9 587 678 654,4 745,5 622,6 554,3 576,2 682,2 562,2 497,7 507,9 457,4 379,6 464 379,6 281,2 372,4 480 513 620 528,9 560,1 113,4 10,2
Heide	604,3 763 110,4 911,2 809 648 1100 243 574,5 338 516,4 310 474,6 624,3 446,9 880 877 221 525 674,9 404,7 469,5 544,8 885,7 843,7 369 501,9 225 597,6 301,5 254,2 375,9 625,7 731 625,7 631 79,7 421,9 608,5 408,2 585 713,7 385,9 284,5 385,9 587 678 654,4 745,5 622,6 554,3 576,2 682,2 562,2 497,7 507,9 457,4 379,6 464 379,6 281,2 372,4 480 513 620 528,9 560,1 113,4 10,2
Antwerpen	398 535 568 778 809 648 1100 243 574,5 338 516,4 310 474,6 624,3 446,9 880 877 221 525 674,9 404,7 469,5 544,8 885,7 843,7 369 501,9 225 597,6 301,5 254,2 375,9 625,7 731 625,7 631 79,7 421,9 608,5 408,2 585 713,7 385,9 284,5 385,9 587 678 654,4 745,5 622,6 554,3 576,2 682,2 562,2 497,7 507,9 457,4 379,6 464 379,6 281,2 372,4 480 513 620 528,9 560,1 113,4 10,2
Plock	1044 1207 807 1221 809 648 1100 243 574,5 338 516,4 310 474,6 624,3 446,9 880 877 221 525 674,9 404,7 469,5 544,8 885,7 843,7 369 501,9 225 597,6 301,5 254,2 375,9 625,7 731 625,7 631 79,7 421,9 608,5 408,2 585 713,7 385,9 284,5 385,9 587 678 654,4 745,5 622,6 554,3 576,2 682,2 562,2 497,7 507,9 457,4 379,6 464 379,6 281,2 372,4 480 513 620 528,9 560,1 113,4 10,2
Litvinov	168 501 597 572 642 601 190 573 261 815 600 1201 605 1051 597 259 782 180 724 547 1168 597 808 487 590 219 96 837 645 130 114 185 418 485 538 70,7 363 298 179 567 671 150 535 343 630

Würzburg	118	220	344	441	450	316	Langen
	161	253	508	605	499	345	Mönshheim
	511	607	226	169	461	578	H.-Peute
	601	697	701	817	589	433	Langentrog
	289	135	243	340	556	488	Suesel
	295	524	416	433	105	173	W.-Villip
	307	328	135	251	482	499	Löschau
	205	434	397	388	222	227	Westenfeld
	258	316	628	725	596	443	Elxleben
	309	180	199	296	553	507	Villingen
	228	457	391	391	204	224	K.-Niehl
	252	480	443	466	133	133	Koellada
	287	476	676	792	564	408	Hermisdorfer-K.
	512	602	221	163	432	578	Grenis
	484	743	501	517	149	332	H.-Afrikakai
	369	627	499	516	33	217	Vetschau
	466	725	528	545	119	314	D.-Kaditz
	305	564	525	543	53	153	Spremberg
	485	670	289	231	535	652	Hartmannsdorf
	306	536	455	472	97	161	Mühbrook
	263	542	504	527	93	112	A.-Windschl
	328	558	377	394	98	213	Zwickau
	587	815	472	414	332	474	Sietzsch
	689	915	508	450	399	555	Neustrelitz
	681	797	416	358	452	568	Neubrandenburg
	371	630	501	518	33	219	Rostock
	456	608	299	311	191	308	Freital
	465	695	401	418	209	352	Stegitz
	340	570	398	414	83	225	B.-Ludwigsfelde
	217	277	547	644	565	411	Wolteritz
	572	540	159	60	535	651	Freudenstadt
	337	567	405	422	63	222	Wilhelmshaven
	678	794	413	355	449	565	Hirschfeld
	545	771	462	456	255	432	Peetz
	376	270	120	217	543	560	Ladeburg
							Marl

9.6 Sachbilanz

Aufgrund des großen Umfangs der Sachbilanz (teilweise mehr als tausend Input- und Outputgrößen) werden nur die 10 größten – falls vorhanden – Mengen jeder Einheit dargestellt.

Tabelle 9-10: Input bei Kalthandhabung mit Kartons

Input	Menge	Einheit
Bitumen	15.000.000,00	kg
Kies, im Boden [Ressource/im Boden]	1.186.286,95	kg
Kohlendioxid, in Luft [Ressource/in Luft]	369.920,00	kg
Rohöl, im Boden [Ressource/im Boden]	343.813,75	kg
Kohle, Stein-, im Boden [Ressource/im Boden]	69.565,42	kg
Kohle, Braun-, im Boden [Ressource/im Boden]	61.675,73	kg
Kalkstein, im Boden [Ressource/im Boden]	38.259,96	kg
Eisen, 46 % in Erz, 25 % in Roherz, im Boden [Ressource/im Boden]	36.952,81	kg
Ton, allgemein, im Boden [Ressource/im Boden]	13.207,90	kg
Steinsalz, im Boden [Ressource/im Boden]	9.292,05	kg
Umwandlung, zu Ackerbau, unbewässert [Ressource/Fläche]	53.394,17	m ²
Umwandlung, von Ackerbau, unbewässert [Ressource/Fläche]	53.350,76	m ²
Umwandlung, von Wald, extensiv [Ressource/Fläche]	5.673,80	m ²
Umwandlung, zu Wald, intensiv [Ressource/Fläche]	5.112,13	m ²
Umwandlung, zu Ressourcenabbau [Ressource/Fläche]	678,60	m ²
Umwandlung, von unbekannt [Ressource/Fläche]	468,49	m ²
Umwandlung, zu Wald, intensiv, normal forstlich bewirtschaftet [Ressource/Fläche]	463,20	m ²
Umwandlung, von Wald [Ressource/Fläche]	363,29	m ²
Umwandlung, von Meer und Ozeanen [Ressource/Fläche]	110,32	m ²
Umwandlung, zu Deponie, Benthos [Ressource/Fläche]	110,21	m ²
Nutzung, Wald, intensiv [Ressource/Fläche]	767.342,66	m ² a
Nutzung, Wald, intensiv, normal forstlich bewirtschaftet [Ressource/Fläche]	59.391,68	m ² a
Nutzung, Ackerbau, unbewässert [Ressource/Fläche]	29.068,00	m ² a
Nutzung, Verkehrsweg, Straßenbau [Ressource/Fläche]	14.241,16	m ² a
Nutzung, Verkehrsweg, Straße [Ressource/Fläche]	5.424,85	m ² a
Nutzung, Industrieareal [Ressource/Fläche]	3.172,78	m ² a
Nutzung, Wasserfläche, künstlich [Ressource/Fläche]	1.258,18	m ² a
Nutzung, Deponie [Ressource/Fläche]	952,24	m ² a
Nutzung, Industrieareal, bebaut [Ressource/Fläche]	884,48	m ² a

Input	Menge	Einheit
Nutzung, Ressourcenabbau [Ressource/Fläche]	701,07	m ² a
Wasser, Turbinier-, allgemein [Ressource/im Wasser]	2.253.209,70	m ³
Wasser, Kühl-, allgemein [Ressource/im Wasser]	10.232,87	m ³
Wasser, Fluss- [Ressource/im Wasser]	7.380,61	m ³
Wasser, allgemein [Ressource/im Wasser]	3.479,94	m ³
Wasser, Grund- [Ressource/im Wasser]	1.281,36	m ³
Holz, Weich- [Ressource/biogen]	318,77	m ³
Wasser, Salz-, Meer [Ressource/im Wasser]	299,25	m ³
Wasser, Salz-, Sole [Ressource/im Wasser]	229,54	m ³
Wasser, See- [Ressource/im Wasser]	75,25	m ³
Holz, Hart- [Ressource/biogen]	66,58	m ³
Volumennutzung, Speichersee [Ressource/im Wasser]	7.685,18	m ³ a
Energie, Brennwert, in Biomasse [Ressource/biogen]	4133711,877	MJ
Energie, potentiell (im Staubecken), umgewandelt [Ressource/im Wasser]	361.132,96	MJ
Energie, kinetisch (Wind), umgewandelt [Ressource/in Luft]	23.132,00	MJ
Energie, Brennwert, in Biomasse, Primärwald [Ressource/biogen]	1441,563543	MJ
Energie, Sonne, umgewandelt [Ressource/in Luft]	319,94	MJ
Gas, Erd-, im Boden [Ressource/im Boden]	125.359,23	Nm ³
Gas, Gruben-, als Ressource [Ressource/im Boden]	740,96	Nm ³

Tabelle 9-11: Output bei Kalthandhabung mit Kartons

Output	Menge	Einheit
Radon-222 [Luft/Land, Langzeitemission]	88.264.905,34	kBq
Edelgase, radioaktiv, allgemein [Luft/Land]	44.850.806,87	kBq
Radon-222 [Luft/Land]	2.117.129,05	kBq
Hydrogen-3, Tritium [Wasser/Ozean-]	1.804.904,79	kBq
Hydrogen-3, Tritium [Wasser/Fluss-]	199.537,94	kBq
Hydrogen-3, Tritium [Luft/Land]	26.365,70	kBq
Xenon-133 [Luft/Land]	12.668,93	kBq
Radium-226 [Wasser/Fluss-]	8.999,74	kBq
Strontium-90 [Wasser/Fluss-]	5.329,07	kBq
Xenon-135 [Luft/Land]	5.109,91	kBq
Bitumen heiß	15.000.000,00	kg
Kohlendioxid, biogen [Luft/Stadt]	959.349,43	kg
Kohlendioxid, fossil [Luft/allgemein]	668.504,04	kg
Kohlendioxid, fossil [Luft/Stadt]	382.568,74	kg
Kohlendioxid, fossil [Luft/Land]	173.159,11	kg
Chloride [Wasser/Fluss-]	11.690,46	kg
CSB, Chemischer Sauerstoff Bedarf [Wasser/Grund-, Langzeitemission]	5.398,98	kg
Natrium, Ion [Wasser/Fluss-]	4.834,61	kg
CSB, Chemischer Sauerstoff Bedarf [Wasser/Fluss-]	4.722,42	kg
Chloride [Wasser/allgemein]	4.339,81	kg
Abwärme [Luft/Stadt]	13.388.337,92	MJ
Abwärme [Luft/allgemein]	9.890.523,43	MJ
Abwärme [Luft/Land]	2.668.637,13	MJ
Abwärme [Wasser/Fluss-]	1.641.171,01	MJ
Abwärme [Wasser/allgemein]	11.104,32	MJ
Abwärme [Boden/allgemein]	10.940,91	MJ
Abwärme [Wasser/Grund-, Langzeitemission]	7.277,08	MJ
Abwärme [Boden/Industrie]	2.461,91	MJ
Abwärme [Wasser/Ozean-]	35,29	MJ
Abwärme [Luft/untere Stratosphäre + obere Troposphäre]	2,610	MJ
Betrieb, Lkw >28 t, leer, Flottendurchschnitt [CH]	102.272,73	vkm
Betrieb, Lkw >32 t, EURO5 [RER]	25.200,00	vkm

Tabelle 9-12: Input bei Heißhandhabung

Input	Menge	Einheit
Bitumen	15.000.000,00	kg
Kies, im Boden [Ressource/im Boden]	1.186.286,95	kg
Kohlendioxid, in Luft [Ressource/in Luft]	369.920,00	kg
Rohöl, im Boden [Ressource/im Boden]	343.813,75	kg
Kohle, Stein-, im Boden [Ressource/im Boden]	69.565,42	kg
Kohle, Braun-, im Boden [Ressource/im Boden]	61.675,73	kg
Kalkstein, im Boden [Ressource/im Boden]	38.259,96	kg
Eisen, 46 % in Erz, 25 % in Roherz, im Boden [Ressource/im Boden]	36.952,81	kg
Ton, allgemein, im Boden [Ressource/im Boden]	13.207,90	kg
Steinsalz, im Boden [Ressource/im Boden]	9.292,05	kg
Umwandlung, zu Ackerbau, unbewässert [Ressource/Fläche]	53.394,17	m ²
Umwandlung, von Ackerbau, unbewässert [Ressource/Fläche]	53.350,76	m ²
Umwandlung, von Wald, extensiv [Ressource/Fläche]	5.673,80	m ²
Umwandlung, zu Wald, intensiv [Ressource/Fläche]	5.112,13	m ²
Umwandlung, zu Ressourcenabbau [Ressource/Fläche]	678,60	m ²
Umwandlung, von unbekannt [Ressource/Fläche]	468,49	m ²
Umwandlung, zu Wald, intensiv, normal forstlich bewirtschaftet [Ressource/Fläche]	463,20	m ²
Umwandlung, von Wald [Ressource/Fläche]	363,29	m ²
Umwandlung, von Meer und Ozeane [Ressource/Fläche]	110,32	m ²
Umwandlung, zu Deponie, Benthos [Ressource/Fläche]	110,21	m ²
Nutzung, Wald, intensiv [Ressource/Fläche]	767.342,66	m ² a
Nutzung, Wald, intensiv, normal forstlich bewirtschaftet [Ressource/Fläche]	59.391,68	m ² a
Nutzung, Ackerbau, unbewässert [Ressource/Fläche]	29.068,00	m ² a
Nutzung, Verkehrsweg, Straßenbau [Ressource/Fläche]	14.241,16	m ² a
Nutzung, Verkehrsweg, Straße [Ressource/Fläche]	5.424,85	m ² a
Nutzung, Industriearéal [Ressource/Fläche]	3.172,78	m ² a
Nutzung, Wasserfläche, künstlich [Ressource/Fläche]	1.258,18	m ² a
Nutzung, Deponie [Ressource/Fläche]	952,24	m ² a
Nutzung, Industriearéal, bebaut [Ressource/Fläche]	884,48	m ² a
Nutzung, Ressourcenabbau [Ressource/Fläche]	701,07	m ² a
Wasser, Turbinier-, allgemein [Ressource/im Wasser]	2.253.209,70	m ³
Wasser, Kühl-, allgemein [Ressource/im Wasser]	10.232,87	m ³
Wasser, Fluss- [Ressource/im Wasser]	7.380,61	m ³
Wasser, allgemein [Ressource/im Wasser]	3.479,94	m ³
Wasser, Grund- [Ressource/im Wasser]	1.281,36	m ³
Holz, Weich- [Ressource/biogen]	318,77	m ³
Wasser, Salz-, Meer [Ressource/im Wasser]	299,25	m ³
Wasser, Salz-, Sole [Ressource/im Wasser]	229,54	m ³
Wasser, See- [Ressource/im Wasser]	75,25	m ³
Holz, Hart- [Ressource/biogen]	66,58	m ³

Input	Menge	Einheit
Volumennutzung, Speichersee [Ressource/im Wasser]	7.685,18	m ³ a
Energie, Brennwert, in Biomasse [Ressource/biogen]	4133711,877	MJ
Energie, potentiell (im Staubecken), umgewandelt [Ressource/im Wasser]	361.132,96	MJ
Energie, kinetisch (Wind), umgewandelt [Ressource/in Luft]	23.132,00	MJ
Energie, Brennwert, in Biomasse, Primärwald [Ressource/biogen]	1441,563543	MJ
Energie, Sonne, umgewandelt [Ressource/in Luft]	319,94	MJ
Gas, Erd-, im Boden [Ressource/im Boden]	125.359,23	Nm ³
Gas, Gruben-, als Ressource [Ressource/im Boden]	740,96	Nm ³

Tabelle 9-13: Output bei Heißhandhabung

Output	Menge	Einheit
Radon-222 [Luft/Land, Langzeitemission]	163.934,760	kBq
Edelgase, radioaktiv, allgemein [Luft/Land]	56.344.158,02	kBq
Radon-222 [Luft/Land]	3.919.161,35	kBq
Hydrogen-3, Tritium [Wasser/Ozean-]	2.269.151,67	kBq
Hydrogen-3, Tritium [Wasser/Fluss-]	314.411,73	kBq
Strontium-90 [Wasser/Fluss-]	52.190,8325	kBq
Hydrogen-3, Tritium [Luft/Land]	34.179,2627	kBq
Xenon-133 [Luft/Land]	29.452,5488	kBq
Radium-226 [Wasser/Fluss-]	15.282,9652	kBq
Krypton-85 [Luft/Land]	15.111,6152	kBq
Bitumen	15.000.000,00	kg
Kohlendioxid, fossil [Luft/allgemein]	544.358,80	kg
Kohlendioxid, fossil [Luft/Land]	416.029,96	kg
Kohlendioxid, fossil [Luft/Stadt]	141.031,42	kg
Kohlendioxid, biogen [Luft/Stadt]	9.548,8943	kg
Silizium [Wasser/Grund-, Langzeitemission]	5.835,1835	kg
Chloride [Wasser/Fluss-]	4.736,8570	kg
Stickoxide [Luft/allgemein]	2.958,3197	kg
Kohlendioxid, biogen [Luft/Land]	2.728,1039	kg
Natrium, Ion [Wasser/Fluss-]	2.699,4683	kg
Abwärme [Luft/allgemein]	7.668.642,71	MJ
Abwärme [Luft/Land]	4.760.932,72	MJ
Abwärme [Luft/Stadt]	1.872.123,88	MJ
Abwärme [Wasser/Fluss-]	794.855,04	MJ
Abwärme [Wasser/allgemein]	6.907,2975	MJ
Abwärme [Boden/allgemein]	4.848,9371	MJ
Abwärme [Wasser/Grund-, Langzeitemission]	1.388,5936	MJ
Abwärme [Wasser/Ozean-]	149,6888905	MJ
Abwärme [Boden/Industrie]	101,3615097	MJ
Abwärme [Luft/untere Stratosphäre + obere Troposphäre]	1,363531668	MJ
Betrieb, Lkw >28 t, leer, Flottendurchschnitt [CH]	204.545,45	vkm

Literaturverzeichnis

- [Ad00] Adensam, H.; Ganglberger, E.; Gupfinger, H.; Wenisch, A.: Wieviel Umwelt braucht ein Produkt? Studie zur Nutzbarkeit von Ökobilanzen für Prozess- und Produktvergleiche Analyse von Methoden, Problemen und Forschungsbedarf. Endbericht Österreichisches Ökologie Institut, Wien, 2000
- [Ag05] AGHEZZAF, E.: Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. In: Journal of Operational Society 56, S. 453–462, 2005
- [Ai04] Airey, G. D.: Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. Journal of Material 39. Nottingham, 2004
- [Al10] Albrecht, F. in Köln; Geschäftsführer der Albr3cht Supply Concepts GmbH. Interview am 30.11.2010
- [AlHiOsKüLe07-1] Althaus, Hans-Joerg; Kellenberger, Daniel; Künniger, Tina; Lehmann, Martin; Jungbluth, Niels; Thalmann, Philipp: Life Cycle Inventory of Building Products. Part XVIII: Additional Products and Processes. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.). Dübendorf, 2007
- [AlHiOsKüLe07-2] Althaus, Hans-Jörg; Hischier, Roland; Osses, Maggie; Primas, Alex; Hellweg, Stefanie; Jungbluth, Niels; Chudacoff, Mike: Life Cycle Inventories of Chemicals. Ecoinvent report No. 8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.). Dübendorf, 2007
- [Am06] Amiri, A.: Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. In: European Journal of Operational Research 171, S. 567–576, 2006
- [AmDaBeJa05] Ammand, M.; Damm, K.-W.; Beer, F. M.; Jakubik D.: Einfluss von Kurzzeit- sowie Langzeitalterung im Labor auf die Struktur von Polymeren und praxisrelevanten Eigenschaften modifizierter Bindemittel. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 910, 2005. Typo-Druck- und Verlagsgesellschaft mbH, Bonn, 2005
- [AnDa81] Anderson, Ronald W.; Danthine, Jean-Pierre: Cross Hedging. Journal of Political Economy 89, Nr. 6, S. 1182–1196, 1981
- [ARBIT08] Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V., Hamburg. Informationsblatt zum Transport Klasse 9, UN 3257. Hamburg, 2008
- [ARGUS09] ARGUS Media Limited (Hrsg.): ARGUS Asphalt Report - Methodology and Specifications Guide. Juni 2009

- [As10] Asphalt: Ein aktives Risikomanagement ist unerlässlich. Asphalt im Gespräch mit Frank Albrecht. Interview Asphalt 07/2010 36-38, 2010
- [Ba04] Bakhtiari, A. M. S.: World oil production capacity model suggests output peak by 2006–07. OilandGasJournal102 (16), S. 18–20, 2004
- [Be09] Benninghoven GmbH & Co. KG: Bitumen. Produktbroschüre. Mülheim, 2009
- [Be71] Behrens, S.: Allgemeine Standortbestimmungslehre. 2. Auflage. Westdeutscher Verlag, UTB für Wissenschaft\Uni-Taschenbücher, Opladen, 1971
- [Be73] Beier, U.: Zur Anwendung heuristischer Entscheidungsmethoden bei der Bestimmung eines Konsumprogramms. Zeitschrift für Betriebswirtschaft 43, S. 199-224, 1973
- [Bi05] Birgisdottir H.: Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration. Institute of Environment & Resources, Technical University of Denmark, 2005
- [Bi11] Bitubale Lt.: <http://www.bitubale.com/> (Stand 07.02.2011)
- [BlEr08] Bloss, Michael; Ernst, Dietmar: Derivate: Handbuch für Finanzintermediäre und Investoren. Edition Derivate. Oldenbourg, München, 2008
- [BP89] 5. Deutsche BP: Das Buch vom Erdöl. Verlag Reuter und Klöckner, Hamburg, 1989
- [Br10] Braun, C.: Energiepreisabsicherung mit Derivaten in Management von Rohstoffrisiken. Teil II. Springer, 2010
- [Br82] Braunschweig, A.: Ökologische Buchhaltung für eine Stadt. Ruegger-Verlag, Chur, 1982
- [Br87] Brown, G.G. ; Graves, G.W. ; Honczarenko, M.D.: Design and operation of a multicommodity production/distribution system using primal goal decomposition. In: Management Science 33, Nr. 11, S. 1469–1480, 1987
- [BrKeMeRaRo98] Brook, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A.; Raman, R.; Rosenthal, R.: GAMS: A user's guide. GAMS Development Corporation, Washington DC, 1998
- [BrSchRü10] Bretschneider-Hagemes, M.; Schmidt, H.; Rühl, R.: Temperatursenkung bei der Verarbeitung von Bitumen - Eine Chance für Umwelt, Arbeitsschutz und Wirtschaft. In Gefahrenstoffe – Reinhaltung der Luft. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherungen (DGUV /IFA), 2010
- [ChFoRa03] Chauvel, A.; Fournier, G.; Raimbault, C.: Manual of Process Economic Evaluation - New, revised and expanded edition. Editions Technik, Paris, 2003

- [ChFoRa76] Chauvel, A.; Fournier, G.; Raimbault, C.: Publications de l'Institut français du pétrole – Manuel, 1976
- [ChSu07] Chen, Fei; Sutcliffe, Charles: Better Cross Hedges With Composite Hedging? Hedging Equity Portfolios Using Financial and Commodity Futures. ICMA Centre Discussion Papers in Finance No. DP2007-04, 2007
- [CoMo91] Cohen, M. A. ; Moon, S.: An integrated plant loading model with economies of scale and scope. In: European Journal of Operational Research 50, S. 266–279, 1991
- [Cr81] Crump, G. B.: Black but such as in esteem - the analytical chemistry of Bitumen. Chairman's retiring address to the N W Region Analytical Division of the Royal Society of Chemistry, 1981
- [CuNo06] Curran, M. A.; Notten, P.: Summary of Global Life Cycle Inventory Data Resources, 2006
- [DAV11] Deutscher Asphaltverband: <http://www.asphalt.de> (Stand 15.03.2011)
- [De02] Deffeyes, K. S.: World's oil production peak reckoned in near future. Oil and Gas Journal 100(46), S. 46–48, 2002
- [De08.1] Deutsch, H.: Derivate und interne Modelle, modernes Risikomanagement. 4. Auflage. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2008
- [De08.2] Deutag AG: Deutag Aktuell: http://www.deutag.de/no_cache/deutag-aktuell/deutag-aktuell (Stand 05.09.2008)
- [DeExRu08] Denk, R.; Exner-Merkelt, K.; Ruthner, R.: Corporate Risk Management, Unternehmensweites Risikomanagement als Führungsaufgabe. 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage. Linde-Verlag, Wien, 2008
- [DiDi00] Dippel, J.; von Dincklage, R., D.: Integrierter Umweltschutz bei bestimmten industriellen Tätigkeiten. Deutscher Beitrag zu besten verfügbaren Techniken in der Raffinerieindustrie. Umweltbundesamt, Berlin, 2000
- DIN 52013 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Duktilität. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 12592 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung Bestimmung der Löslichkeit. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 12593 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunkts nach Fraas. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 12596 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der dynamischen Viskosität mit Vakuum- Kapillaren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007

- DIN EN 12606-1 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Paraffingehaltes –Teil 1: Destillationsverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 12607-1 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT – Verfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 12607-2 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 2: TFOT – Verfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 12607-3 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 3: RFT – Verfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 12697-11 Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005
- DIN EN 13398 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der elastischen Ruckstellung von modifiziertem Bitumen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- DIN EN 13589 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bitumen mit dem Kraft-Duktilitäts-Verfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
- DIN EN 1426 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 1427 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes Ring- und Kugelverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- DIN EN 14769 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter(PAV). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006
- DIN EN 14770 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006

- DIN EN 14771 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegebiegesteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005
- DIN EN 15323 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit dem rotierenden Zylinder (RCAT). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- [Do09] Doka, Gabor: Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Part II "Waste incineration". Ecoinvent Report No. 13. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.). St. Gallen, 2009
- [Do75] Domschke, W.: Modelle und Verfahren zur Bestimmung betrieblicher und innerbetrieblicher Standorte. Ein Überblick. Zeitschrift für Operations Research, Band 19, 1975
- [Do85] Domschke, W.: Logistik-Transport: Grundlagen, lineare Transport- und Umladeprobleme. Band 1,2. Ergänzte Auflage; Oldenbourg, München, 1985
- [DoDr04] Domschke, W.; Drexel, A.: Einführung in Operations Research; 6. Auflage; Springer, 2004
- [DoDr96] Domschke, W.; Drexel, A.: Logistik-Standorte, Band 3, 4. Überarbeitete und erweiterte Auflage München: Oldenbourg Verlag, 1996
- [DoGo99] Dogan, K.; Goetschalckx, M.: A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems. In: IIE Transactions 31: 11, S. 1027–1036, 1999
- [DPMA10] Deutsches Patent und Markenamt: Großvolumiges Behältnis zur Verpackung von Bitumen, Gebrauchsmusterschrift. Aktenzeichen: 202010014031.5, Anmeldetag: 08.10.2010, Eintragungstag: 17.02.2011, Bekanntmachungstag im Patentblatt: 24.03.2011, Name und Wohnsitz des Inhabers: Deutsche Asphalt GmbH, 50679 Köln
- [DrHa02] Drezner, Z.; Hamacher, H. W.: Facility location. Springer, Berlin, 2002
- [Du08] Dupont, L.: Branch and bound algorithm for a facility location problem with concave site dependent costs. In: International Journal of Production Economics 112, S. 245–254, 2008
- [EfRy66] Efraymson, M. A. ; Ray, T. L.: A Branch-Bound Algorithm for Plant Location. In: Operations Research 14, Nr. 3, S. 361–368, 1966
- [Ei08] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK. Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe, 2008
- [EIA10] U.S. Energy Information Administration (EIA): Annual Energy Outlook 2011, Early Release. EIA, 2010

- [En02] Engels, B.: Integrierte Logistik- und Verwertungsplanung beim Produktrecycling. Dargestellt am Beispiel von Gerätebatterien. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 150. VDI, Karlsruhe, 2002
- [EnIn05] The Energy Institute: Bitumen safety code. 4th Edition. Model code of Safe Practice Part 11, London, 2005
- [Ep89] Eppen, G.D. ; Martin, R.K. ; Schrage, L.: A scenario approach to capacity planning. In: Operations Research 37, S. 517–527, 1989
- [EPA11] Environmental Protection Agency: LCA
<http://www.epa.gov/nrmrl/lcaccess/index> (Stand 05.09.2011)
- [Eu99] EUROBITUME: Partial Life Cycle Inventory or „Eco-Profile“ for Paving Grade Bitumen. Eurobitume Report 99/007, Brussels, 1999
- [EV11] Schweizer Erdöl-Vereinigung (EV): Erdöl - Entstehung, Förderung und Verarbeitung. Erdölbroschüren, 2011
- [EyRe00] Eyerer, P.; Reinhardt, H.-W.: Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden: Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung. Basel, 2000
- [FaDyRe88] Fandel, G.; Dyckhoff, H.; Reese, J.: Essays on Production Theory and Planning, Optimal programm planing in joint production. Springer, Berlin, 1988
- [Fe66] Feldmann, E.; Lehrer, F. A.; Ray, T. L.: Warehouse location under continuous economies of scale. In: Management Science 12, Nr. 9, S. 670–684, 1966
- [Fi05] Fichtner, Wolf: Emissionsrechte, Energie und Produktion. Verknappung der Umweltnutzung und produktionswirtschaftliche Planung. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2005
- [Fi97] Fischer, K.: Standortplanung unter Berücksichtigung verschiedener Marktbedingungen. Physika, Heidelberg, 1997
- [FrJuNiAlDoDoHe07] Frischknecht, Rolf; Jungbluth, Niels; Althaus, Hans-Jörg.; Doka, Gabor; Dones, Roberto; Heck, Thomas; Hellweg, Stefanie; Hischer, Roland; Nemecek, Thomas; Rebitzer, Spielmann, Michael; Wernet, Gregor: Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.), Dübendorf, 2007
- [FrStJu08] Frischknecht, R.; Steiner, R.; Jungbluth, N.: Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 2006. Öbu, Zürich, 2008
- [Ga01] GAMS: The solver Manuals. GAMS Development Corporation, Washington DC, 2011
- [Gä08] Gärtner, S.; Münch, J.; Reinhardt, G.; Vogt, R.: Ökobilanzen. Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland, 2008

- [GeGr74] GEOFFRION, A.M. ; GRAVES, G.W.: Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. In: Management Science 20, Nr. 5, S. 822–844, 1974
- [Gi65] Girdler, R. B.: Proc Assoc Asph Pav Tech. Association Asphalt Paving Technologists, Vol. 34, S. 45, Seattle, 1965
- [GiTo99] Gigerenzer, G.; Todd, P. M.; ABC Research Group: Simple heuristics that make us smart. Oxford University Press, New York, 1999
- [Go95] Goedkoop M.J.: De Eco-indicator 95. Final report. NOH report 9523, Pré Consultants, Amersfoort, 1995
- [GoSp00] Goedkoop, M.; Spriensma, R.: The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report. Second edition. Product ecology consultants, Amersfoort, 2000
- [Gu05] Guillén, G.; Mele, F. D.; Bagajewicz, M. J.; Espuña, A.; Puigjaner, L.: Multi-objective supply chain design under uncertainty. In: Chemical Engineering Science 60, S. 1535–1553, 2005
- [Gu09] Guillén-Gosálbez, G.; Mele, F. D.; Grossmann, I. E.: A bi-criterion optimization approach for the design and planning of hydrogen supply chains for vehicle use. In: AIChE Journal 56 (2009), S. 650–667
- [GüTe94] Günther, H.-O.; Tempelmaier, H.: Produktion und Logistik. Springer, Berlin u.a., 1994
- [Ha04] Hamelinck, C.: Outlook for advanced biofuels. Dissertation am Copernicus Institute der Universität Utrecht, Utrecht, 2004
- [Ha06] Hansmann, K.-W.: Industrielles Management. 8. Auflage. Oldenbourg, München, 2006
- [Ha90] Hammerschmid, R.: Entwicklung technisch-wirtschaftlich optimierter regionaler Entsorgungsalternativen - Dargestellt für Reststoffe aus der Rauchgasreinigung für Baden-Württemberg, Universität Karlsruhe (TH), Physica-Verlag, Heidelberg, Dissertation, 1990
- [Ha93] Hax, Herbert: Investitionstheorie. Fünfte bearbeitete Auflage. Physica-Verlag, Heidelberg, 1993
- [HaWe98] Hauschild, M.; Wenzel, M.: Environmental assessment of products, part 2: scientific background. Chapman and Hall, Cambridge, 1998
- [HäMä96] Häkkinen, T.; Mäkelä, K.: Environmental adaption of concrete - Environmental impact of concrete and asphalt pavements. Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1996
- [He10] Herchenbach Industrie - Zeltebau GmbH: Broschüre, 2010
- [HeGuHuLa92a] Heijungs, R.; Guinée, J.B.; Huppes, G.; R.M. Lankreijer, R. M. Udo de Haes, H. A.; Wegener Sleswijk, A.; Ansems A. M. M.; Eggels, P. G.;

- van Duin, R.; de Goede, H. P.: Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide, Report Nr. 9266, CML, Leiden, 1992
- [HeGuHuLa92b] Heijungs, R.; Guinée, J.B.; Huppes, G.; R.M. Lankreijer, R. M. Udo de Haes, H. A.; Wegener Sleswijk, A.; Ansems A. M. M.; Eggels, P. G.; van Duin, R.; de Goede, H. P.: Environmental Life Cycle Assessment of Products. Backgrounds, Report Nr. 9267, CML, Leiden, 1992
- [Hi07-1] Hischier, Roland: Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Papers. Part II. Ecoinvent report No. 11, Dübendorf, 2007
- [Hi07-2] Hischier, Roland: Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Papers. Part III. Ecoinvent report No. 11, Dübendorf 2007
- [HiKu70] Hinkle, C. L.; Kuehn, A. A.: Heuristic Models: Mapping the Maze for Management. Information for Decision Making. Quantitative and Behavioral Dimensions. Rappaport, A. Englewood Cliffs (Hrsg.), S. 78-89, 1970
- [Ho03] Holldorb, C.: Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrzeugen. Durth Roos Consulting GmbH, Karlsruhe, 2003
- [Ho07] Hofmeister, Wolfgang: Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse. Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen. 2. Überarbeitete Auflage. Berliner Wissenschaftsverlag, Berlin, 2007
- [HoEdAn99] Howard, N.; Edwards, S.; Anderson, J.: BRE methodology for environmental profiles of construction materials, components and buildings, built research establishment, 1999
- [Hö10] Höbel, Reinhardt: Personal reference/interview. Hamburg 04.10.2010
- [Hü07] Hübner, R.: Strategic supply chain management in process industries: an application to specialty chemicals production network design. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [Hu09] Hull, John: Optionen, Futures und andere Derivate. 7. aktualisierte Auflage. Pearson Studium, München [u.a.], 2009
- [Hu11] Hull, John: Risikomanagement: Banken, Versicherungen und andere Finanzinstitutionen. 2. aktualisierte Auflage. Pearson Studium, München, 2011
- [Hu81] Hummeltenberg, W.: Optimierungsmethoden zur betrieblichen Standortwahl: Modelle und ihre Berechnung. Physika, Würzburg, 1981
- [HuBiHe09] Huang, Y.; Bird, R.; Heidrich, O.: Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. Journal of Cleaner Production 17, S. 283–296, 2009
- [HuMaSchFr98] Hugener, M.; Mattrel, P.; Schmidt, P.; Fritz, H. W.: Recycling von Straßenbelägen - ein Umweltproblem? Bauchemie Construction Chemicals. Chimia 52 Nr. 5, Neue Schweizerische Chemiegesellschaft, 1998

- [HüMü09] Hübel, M; Müller, H.: Trends in einer Hochleistungsindustrie. Nachrichten aus der Chemie, 57(1), S. 40f, 2009
- [HuPi05] Hugo, A.; Pistikopoulos, E. N.: Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. In: Journal of Cleaner Production 13 (2005), S. 1471–1491
- [HuWö10] Hutschenreuther, J.; Wörner, T.: Asphalt im Straßenbau. 2. Auflage. Kirschbaum, Bonn, 2010
- [HuWö98] Hutschenreuther, J.; Wörner, T.: Asphalt im Straßenbau. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1998
- [IEA10] International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook 2010. OECD/IEA, Paris, 2010
- [IHS06] Petroleum Exploration and Production Statistics (PEPS), IHS Energy, Genf und London, 2006
- [ISO06] ISO, Internationale Organisation für Normung: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044), 2006
- [ISO09] ISO, Internationale Organisation für Normung: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040), 2009
- [Ja05] Jacob, F.: Quantitative Optimierung dynamischer Produktionsnetzwerke, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Darmstadt, 2005
- [Je99] Jenseit, W.: Einsatz des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) im Baubereich. Beitrag zur KEA-Tagung am 01.10.1999 in Weimar, Weimar, 1999
- [Ke08] Kerdoncuff, Pierre: Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2008
- [KeKh82] Kelly, D. K. ; Khumawala, B. M.: Capacitated warehouse location with concave costs. In: The Journal of the Operational Research Society 33, S. 817–826, 1982
- [KeReBIFa09] Kesicki, F.; Remme, U.; Blesl, M.; Fahl, U.: Eine integrative Szenarienanalyse der langfristigen Ölpreisentwicklung. Beitrag des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart zu der 6. Internationalen Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT). Wien, 2009
- [KI92] Kirchner, Klaus Peter: Optimierungsmethoden. Einführung in die Unternehmensforschung für Wirtschaftswissenschaftler. 2. Auflage. Physika, 1992
- [KI01] Klose, A.: Standortplanung in distributive Systemen: Modelle, Methoden, Anwendungen. Physika, Heidelberg, 2001

- [KI02] Klapp, E.: Apparate- und Anlagentechnik: Planung, Berechnung, Bau und Betrieb stoff- und energieumwandelnder Systeme auf konstruktiver Grundlage. Springer, Berlin und Heidelberg, 2002
- [KI10] Klages, Otto: Bitumen- und Asphalttechnologie. Lernfeld 5: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Landesfachklasse für Baustoffprüfer, Skript Berufskolleg Beckum, 2010
- [KIRe95] Klöpfer, W.; Renner, I.: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien. UBA-FB 94-095 in UBA-Texte 23/95: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung. Berlin, 1995
- [Ko05] Koch, Carsten: Umdruck Straßenbau und –betrieb Bitumen und pechhaltige Bindemittel. Skript Fachhochschule Köln, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Köln, 2005
- [Ko08] Koch, Carsten: Umdruck Baustofflehre 2, Teil: Bitumen und Asphalt. Fachhochschule Köln, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Köln, 2008
- [Ko09] Koch, M.: Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2009
- [KoEv07] Ko, H. J.; Evans, G. W.: A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. In: Computers and Operations research 34, S. 346–366, 2007
- [KrMiRu09] Krass, J.; Mitransky, B.; Rupp, G.: Grundlagen der Bautechnik. Vieweg Teubner, Wiesbaden, 2009
- [KuHa63] Kuehn, A. A. ; Hamburger, M. J.: A heuristic program for locating warehouses. In: Management Science 9, Nr. 4, S. 643–666, 1963
- [Le02] Lenk, G.: Bitumen in Europa. Vortrag anlässlich des 28. GESTRATA-Bauseminar, 2002
- [Le91] Lee, C. Y.: An optimal algorithm for the multiproduct capacitated facility location problem with a choice of facility type. In: Computers & Operations Research 18, Nr. 2, S. 167–182, 1991
- [LiVa07] Lieckens, K.; Vandaele, N.: Reverse logistics network design with stochastic lead times. In: Computers and Operations research 34, S. 395–416, 2007
- [Ma02] Le Maitre, R. W.: Igneous Rocks, A Classification and Glossary of Terms, Recommendation of the International Union of Geological sciences Sub-commission on the systematics of Igneous Rocks. 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2002

- [Ma05] Martel, A.: The design of production-distribution networks: a mathematical programming approach. In: Pardalos, P. M. (Hrsg.) ; Hearn, D. (Hrsg.); Geunes, J. (Hrsg.); Pardalos, P. M. (Hrsg.): Supply Chain Optimization Bd. 98. Springer US, S. 266–305, 2005
- [MaNe99] Mazzola, J. B.; Neebe, A. W.: Lagrangian-relaxation-based solution procedures for a multiperiod capacitated facility location problem with choice of facility type. In: European Journal of Operational Research 115, S. 285–299, 1999
- [MaTö01] Maier, G.; Tödting, F.: Regional- und Stadtökonomik 1. Standorttheorie und Raumstruktur. Dritte aktualisierte Auflage. Springer, Wien, NewYork, 2001
- [Me05] Melo, M. T.; Nickel, S.; Gama, F. Saldhana-da: Dynamic multicommodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. In: Computers and Operations research 33, S. 181–208, 2005
- [MeMi00] Melachrinoudis, E.; Min, H.: The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility: A multiple objective approach. In: European Journal of Operational Research 123, S. 1–15, 2000
- [MeSch89] Meyer; Schiffner: Technische Thermodynamik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1989
- [Mo89] Moon, S.: Application of Generalized Benders Decomposition to a nonlinear distribution system design problem. In: Naval Research Logistics 36, S. 283–295, 1989
- [MoEv07] Mohr, S. H.; Evans, G. M.: Mathematical model forecasts year conventional oil will peak. OilandGasJournal105 (17), S. 45–50, 2007
- [MoEv08] Mohr, S. H.; Evans, G. M.: Peak oil: testing Hubbert's curve via theoretical modeling. Natural Resources Research 17(1), S. 1–11, 2008
- [MrEsLa01] Mroueh, U.-M.; Eskola P.; Laine-Ylijoki: Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. Waste Management, 2001
- [Mü78] Müller-Wenk, R.: Die ökologische Buchhaltung: ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik. Stiftung Gesellschaft u. Unternehmen, Campus-Verlag, Frankfurt a. M. [u.a.], 1978
- [MüMö02] Müller-Möhl, Ernst; Lee, Erhard (Hrsg.): Optionen und Futures: Grundlagen und Strategien für das Termingeschäft in Deutschland, Österreich und in der Schweiz. 5. überarbeitete und aktualisiert Auflage (Handelsblatt-Bücher). Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2002

- [MWV06] Mineralölwirtschaftsverband e. V.: MWV-Prognose 2025 für die Bundesrepublik Deutschland. Hamburg, 2006
- [MWV11] Mineralölwirtschaftsverband e. V.: Statistiken, Kapazitätserhebung 2009. <http://www.mwv.de>. (Stand 18.03.2011)
- [NaPi92] Narasimhan, S.; Pirkul, H.: Hierarchical concentrator location problem. In: Distributed Computing 15, S. 185–191, 1992
- [Ne08] Neutag, Lars: Gebrauchseigenschaften von gummimodifizierten Asphalten. 5. Internationale Verkehrstage in Wuppertal. Wuppertal, 2008
- [Ne94] Neumann, K.: Produktions- und Operations-Management II: Standortplanung und Qualitätssicherung. 2. Auflage. Institut für Wirtschaftstheorie und Operation-Research, Karlsruhe, 1994
- [NWT11] No-Waste-Technology GmbH: <http://www.no-waste-technology.de/gummiasphalt.html> (Stand 08.03.2011)
- [ObGa08] Obermeier, Thomas; Gasper, Richard: Investitionsrechnung und Unternehmensbewertung. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2008
- [ObRa97] Oberthür, U.; Rahimian, I.: Einfluss der zugesetzten Paraffine und deren Struktur auf die Eigenschaften von Bitumen. Bitumen (ARBIT), Band 4, S. 164 - 170, 1997
- [OeHo76] Oelert, H. H.; Holguin-Uttermann, A.: Kompendium Deutscher Gesteins Mineralolwissenschaft und Kohlechemie, 1976
- [OeNe75] Oelert, H. H.; Neumann, H.J.: DGMK-Bericht. 4508. Clausthal, 1974
- [ORF10] News ORF: Die Straße stinkt nicht. <http://news.orf.at/stories/2020067/2020068/> (Stand 03.03.2011)
- [Pa04] Paquet, M.; Martel, A.; Desaulniers, G.: Including technology selection decisions in manufacturing network design models. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 17, Nr. 2, S. 117–125, 2004
- [PeBrSt05] Peters, Sönke; Brühl, Rolf; Stelling, Johannes N.: Betriebswirtschaftslehre. 12. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2005
- [Pö04] Pörner, Andreas: Verfahren zum Abpacken von Bitumen. Internationale Patentanmeldung, WO 2004/048204 Al. Weltorganisation für geistiges Eigentum, 2004
- [Pö05] Pörner, Andreas: Verfahren zum Abpacken von Bitumen. Österreichische Patentanmeldung, AT 500 279 A1 2005-11-15. Österreichisches Patentamt, Wien, 2005
- [Pö07] Pörner, Andreas: Anlage zum Abpacken von Bitumen. Europäische Patentschrift, EP 1 611 016 81. Europäisches Patentamt, Wien, 2005

- [Pö08] Pörner, Andreas: Verfahren zum Abpacken von Bitumen. Patentschrift, AT 500 279 81 2007-03-15. Österreichisches Patentamt, Wien, 2005
- [Po11] Polycube Systems GmbH: www.polycubesystems.com (Stand 10.05.11)
- [Pö12] Pörner Ingenieurgesellschaft mbH: <http://www.biturox.com/> (Stand 08.02.2012)
- [PoBe83] Pohle, G.; Beyert, J.: Aufstellung einer Energiebilanz für verschiedene Oberbauarten im Straßenbau. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 485, Bonn, 1983
- [Pr07] Pred, A.: Behaviour and Location: Foundations for a Geographic and Dynamic Theorie. Part 1, Lund Studies in Geography B, Nr. 27, University of Lund, Lund, 1972
- [Pü95] Püchert, H.: Ein Ansatz zur strategischen Planung von Kreislaufwirtschaftssystemen, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 1995
- [Wh85] Whitaker, R.A.: Some Add-Drop and Drop-Add interchange heuristics for non-linear warehouse locations. In: The Journal of the Operational Research Society 36, Nr. 1, S. 61–70, 1985
- [Wo08] Wollenweber, J.: A multi-stage facility location problem with staircase costs and splitting of commodities: model, heuristic approach and application. In: OR Spectrum 30, S. 655–673, 2008
- [WuSk13] Wunder, M; Skudelny, C.: Integrating Innovative Technologies into Grown Supply Chains; A case study from asphalt industry. PwC, PricewaterhouseCoopers WPG; PwC-Management-Consulting. Munich, 2013
- [Ra06] Rausch, A.: Strategische Standortplanung unter Unsicherheit: Robuste Distributionsstruktur für einen Automobilzulieferer in GUS, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, Karlsruhe, 2006
- [RaCrWaGeMaKn06] Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, Knopf, S.: Verfahren zur CO₂-Abscheidung und –Speicherung. Abschlussbericht. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2006
- [Re79] Rentz, O.: Techno-Ökonomie von betrieblichen Emissionsminderungsmaßnahmen. Habilitationsschrift. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1979
- [Re91] Remmers, J.: Zur Ex-ante-Bestimmung von Investitionen bzw. Kosten für Emissionsminderungstechniken und den Auswirkungen der Datenqualität in mesoskaligen Energie-Umwelt-Modellen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1991
- [ReWh03] Read, J.; Whiteoak, D.: The Shell Bitumen Handbook. 5. Auflage. Thomas Telford Publishing, The University Press, London, 2003

- [Ri02] Ritthoff, M.; Rohn, H.; Liedtke, C.; Merten, T.: MIPS berechnen. Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen. Umwelt Energie GmbH, Wuppertaler Institut für Klima (Hrsg.), Wuppertal, 2002
- [Ri12] Richter und Heß Verpackungs-Service GmbH: <http://www.richtershess.de/> (Stand 08.02.2012)
- [Sa01] Sasse, H.: Zur technisch-wirtschaftlichen und umweltgerechten Ausgestaltung von standort- und betriebsübergreifenden Entsorgungsnetzwerken – Konkretisierung am Beispiel der thermischen Klärschlamm Entsorgung. Cuvillier, Göttingen, 2001
- [SaKiDiWiZo02] Saling, P.; Kicherer, A.; Dittrich-Krämer, B.; Wittlinger, R.; Zombik, W.; Schmidt, I.; Schrott, W.; Schmidt, S.: Eco-efficiency Analysis by BASF: The Method. The international journal of Life Cycle Assessment, June, 2002
- [SaRa97] Sankaran, J.K. ; Raghavan, N.R.S.: Locating and sizing plants for bottling propane in South India. In: Interfaces 27, S. 1–15, 1997
- [Sc82] Scott, A.: Location Patterns and Dynamic of Industrial Activity in the Modern Metropolis. Urban Studies, 1982
- [Sch01] Schiessl, P.: Skriptum zur Grundvorlesung. Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, München, 2001
- [Sch02] Schlame, K.: Entwicklung einer Methode zur Langzeitalterung von Straßenbaubindemitteln. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 843, 2002 Typo-Druck- & Verlagsgesellschaft mbH, Bonn, 2002
- [Sch03] Schultmann, F.; Engels, B.; Rentz, O.: Closed loop supply chains for spent batteries. In: Interfaces 33, Nr. 6, S. 57–71, 2003
- [Sch07] Schmidt, S.: Ökobilanz Bioabfallentsorgung. Ökologische Bewertung von Entsorgungsoptionen für Bioabfälle unter Berücksichtigung räumlicher und ökonomischer Aspekte. Ibidem-Verlag, Stuttgart, 2007
- [Sch12] Schwaderer, F.: Integrierte Standort-, Kapazitäts- und Technologieplanung von Wertschöpfungsnetzwerken zur stofflichen und energetischen Biomassenutzung. Dissertation, angenommen von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012
- [Sch80] Schulze, J.: Modernisierter Preisindex für Chemieanlagen. Chemische Industrie, 39, 1980
- [Sch82] Schmenner, R. W.: Making Business Location Decision. Engelwood Cliffs, Prentice Hall, 1982
- [Sch94] Schweizer, M.: Industriebetriebslehre. Band 2, Vahlen, München, 1994

- [Sch97] Schmidt-Bleek, F.: Wieviel Umwelt braucht der Mensch? Faktor 10 - das Maß für ökologisches Wirtschaften. Deutscher Taschenbuch-Verlag, München, 1997
- [Sch98] Schultmann, F.: Kreislaufführung von Baustoffen - Stoffflußbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden. Erich Schmidt, Berlin, 1998
- [Sch99] Schleef, H. J.: Zur Techno-ökonomischen Bewertung des gestuften Ausbaus von Kombikraftwerken. Dissertation, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1999
- [SchZi08] Schindler, J.; Zittel, W.: Zukunft der weltweiten Erdölversorgung. Überarbeitete, deutschsprachige Ausgabe. Energy Watch Group. Ludwig-Bölkow-Stiftung, Ottobrunn, 2008
- [Sh05] Shen, Z. -J. M.: A multi-commodity supply chain design problem. In: IIE Transactions 37, Nr. 8, S. 753–762, 2005
- [Sh91] Shulmann, A.: An algorithm for solving dynamic capacitated plant location problems with discrete expansion sizes. In: Operations Research 39, S. 423–436, 1991
- [SiClBrAr05] Siegenthaler, C. P.; Braunschweig, A.; Oetterli, G.; Furter, S.: LCA Software. Guide 2005. Market Overview - Software Portraits. ÖBU, Swiss Association for Environmentally Conscious Management, Zürich, 2005
- [SiWuZa11] Simmleit, N.; Wunder, M.; Zander, U.: Handhabung von Kaltbitumen. Asphalt: Fachzeitschrift für Herstellen und Einbauen von Asphalt. 46. Jahrgang; 4/2011. Hannover, 2011
- [So74] Soland, R. M.: Optimal facility location with concave costs. In: Operationsresearch 22, S. 373–382, 1974
- [SpBaDoSch07] Spielmann, Michael; Bauer, Christian; Dones, Roberto; Scherrer, Paul; Tuchs Schmidt, Matthias: Transport Services. Data v2.0. Ecoinvent report No. 14. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrgs.), Dübendorf, 2007
- [SpPIPeRe97] Spengler, T.; Plüchert, H.; Penkuhn, T.; Rentz, O.: Environmental integrated production and recycling management. European Journal of Operations Research, 1997
- [SpStWe08] Spiegel, M.; Steidl, H.; Weixlbaum, M.: Alterungsbestandigkeit von Straßenbaubitumen. Gestrata Nr.120, 2008
- [St01] Stripple, H.: Life cycle Assessment of road: A Pilot Study for Inventory Analysis. 2nd edition. Swedish Environmental Research Institute (IVL), Gothenburg, 2001

- [St05] Stripple, H.: Life cycle inventory of asphalt pavements. 3rd edition. Swedish Environmental Research Institute (IVL), Gothenburg, 2005
- [St09.1] Strabag AG: Strabag Geschäftsbericht 2009. Köln, 2009
- [St09.2] Strabag SE: Standard presentation English 2009. Vienna, 2009
- [St70] Stallworthy, E. A.: The Viewpoint of a large Chemical Manufacturing Company. The Chemical Engineer, 1970
- [StKr05] Straube, E.; Krass, K.: Straßenbau und Straßenerhaltung. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Erich Schmidt, Berlin, 2005
- [StWa83] Storper, M.; Walker, R.: The Theory of Labour and the Theory of Location. International Journal of Urban and Regional Research, No.7, S. 1-43, 1983
- [StZü11] Strabag SE; Züblin AG: Forschung, Entwicklung, Innovation, Research, Development, Innovation; Projekte, Projects 2010/2011. STRABAG-Konzernbroschüre: Forschung, Entwicklung, Innovationen – Projekte. Wien, 2011
- [StZü12] Strabag SE; Züblin AG: Forschung, Entwicklung, Innovation, Research, Development, Innovation; Projekte, Projects 2011/2012. STRABAG-Konzernbroschüre: Forschung, Entwicklung, Innovationen – Projekte. Wien, 2012
- [Th09] Thimm, L.: FT-IR und FT-NIR spektroskopische Untersuchungen in Kombination mit chemometrischen Auswertalgorithmen zur Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung von Straßenbaubitumen. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Fachbereiches Chemie der Universität Duisburg-Essen. Institut für Physikalische Chemie, Universität Duisburg-Essen, Essen, 2009
- [Ti00] Tiedemann, A.: Ökobilanzen für graphische Papiere, Vergleich von Verwertungs- und Beseitigungsverfahren für graphische Altpapiere sowie Produktvergleich für Zeitungsdruck-, Zeitschriften- und Kopierpapiere unter Umweltgesichtspunkten. Umweltbundesamt, Berlin, 2000
- [TL-RmB10] Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern: Technische Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen. TL RmB-StB By, 2010
- [TsPo03] Tschandl, Martin; Posch, Alfred: Integriertes Umweltcontrolling. Von der Stoffstromanalyse zum integrierten Bewertungs- und Informationssystem. 1. Aufl. Gabler, Wiesbaden, 2003
- [UI06] Ulstein, L. N.; Christiansen, M.; Grønhaug; Magnussen, N.; Solomon, M. M.: Elkem uses optimization in redesigning its supply chain. In: Interfaces 36, Nr. 4, S. 314–325, 2006

- [Um02] A. u.: Ökobilanz für Getränkeverpackungen für alkoholfreie Getränke und Wein II. Phase 2. Umweltbundesamt, Berlin, 2002
- [Va77] Varavinit, S.: Zum Oxidationsverhalten von Bitumen. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs. Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Clausthal, 1977
- [VeDa02] Verter, V. ; Dasci, A.: The plant location and flexible technology acquisition problem. In: European Journal of Operational Research 136, S. 366–382, 2002
- [VeDi95] Verter, V.; Dincer, M. C.: An integrated evaluation of facility location, capacity acquisition and technology selection for designing global manufacturing strategies. In: European Journal of Operational Research 60, S. 1–18, 1992
- [VeMeEy09] Velske, Siegfried; Mentlein, Horst; Eymann, Peter: Straßenbau Straßentechnik. 6. neu bearbeitete Auflage. Werner, Köln, 2009
- [Vi06] Vila, D.; Martel, A.; Beauregard, R.: Designing logistics networks in divergent process industries: A methodology and its application to the lumber industry. In: International Journal of Production Economics 102, S. 358–378, 2006
- [Vi11] [http://www . visumsurf . ch / alle _ lernpfade / lernpfad _ oekobilanz / durch-fuehren_einer_oekobilanz](http://www.visumsurf.ch/alle_lernpfade/lernpfad_oekobilanz/durch-fuehren_einer_oekobilanz) (Stand 14.01.2011)
- [Vi76] Vincente Jardim de Camarago, J.: Thermogravimetrische, Differential-Thermoanalytische und Pyrolyse Untersuchungen an Bitumen und deren Bestandteile. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs. Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Clausthal, 1976
- [Vo08] Vogt, R.: Basisdaten zu THG-Bilanzen für Biogas-Prozessketten und Erstellung neuer THG-Bilanzen. Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg, 2008
- [Wa06] Walter, D.: Untersuchungen zum Gehalt von arbeitsmedizinisch-toxikologisch relevanten Inhaltsstoffen in Bitumen und Bitumen-Emissionen sowie human-experimentelle Versuche zu deren dermalen Resorption. Inauguraldissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Humanbiologie des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut und Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin, Gießen, 2006
- [Wa08] Wannenmetsch, Helmut: Intensivtraining Produktion, Einkauf, Logistik und Dienstleistung. Gabler, 2008

- [Wa10] Wagner, H.-J.; Baack, C.; Eickelkamp, T.; Epe, A.; Kloske, K.; Lohmann, J.; Troy, S.: Die Ökobilanz des Offshore-Windparks alpha ventus. 1. Auflage. LIT Verlag, Berlin, 2010
- [WBN07] Der Wirtschaftsverband Baustoffe - Naturstein e.V. (WBN): Steine und Erden. Asphalt. <http://www.wbn-baustoffe.de> (Stand 12.2007)
- [We05.1] Wells, P. R. A.: Oil supply challenges—1: then on-OPEC decline. *Oil and Gas Journal* 103(7), S. 20–28, 2005
- [We05.2] Wells, P. R. A.: Oil supply challenges—2: What can OPEC deliver? *Oil and Gas Journal* 103(9), S. 20–30, 2005
- [We08] Weise, C.: Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltgemischen unter Verwendung von ein- und mehraxialen Zugschwellversuchen. Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dresden, 2008
- [Wi11] <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/cml-methode.html> (Stand 13.01.2011)
- [Wi71] Wilson, G.T.: Capital Investment for Chemical Plant. *British Chemical Engineering and Process Technology*, 1971
- [WiFiRe04] Wietschel, Martin; Wolf, Fichtner; Rentz, Otto: Konzeption und Anwendung eines Modells zum strategischen Produktionsmanagement bei Energieversorgungsunternehmen. In *Produktion und Umwelt, Festschrift für Otto Rentz*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004
- [Wo09] Wollrab, A.: *Organische Chemie*. Springer-Lehrbuch, 2009
- [Wu11] Wunder, M: Weiterentwicklung der Kaltlogistik und Wiederverflüssigung des Baustoffs Bitumen unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen an der Universität Siegen, Heft 1. Siegen, 2011
- [WuHiStSch12] Wunder, M.; Hiete, M.; Stengel, J.; Schultmann, F.: Potential supply chain cost savings from innovative cold bitumen handling, *International Journal of Logistics Research and Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management*, 15:5. S. 337-350. Wales, 2012
- [WZW11] Wer-zu-wem GmbH: <http://www.wer-zu-wem.de> (Stand 18.03.2011)
- [Za07] Zah, R.; Böni, H.; Gauch, M.; Hischler, R.; Lehmann, M.; Wäger, P.: *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*. Empa, St. Gallen, 2007
- [Zä89] Zäpfel, G.: *Taktisches Produktions-Management*. de Gruyter, Berlin, 1989

[Zi99] Zimmermann, W.: Operations-Research: Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung. 9. Auflage. Oldenbourg, München, 1999

PRODUKTION UND ENERGIE



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

ISSN 2194-2404

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe zu bestellen.

- Band 1** **National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung
umweltpolitischer Instrumente.**
Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung
auf die Bundesrepublik Deutschland. 2012
ISBN 978-3-86644-853-7
- Band 2** **Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und
Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-,
Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE).** 2013
ISBN 978-3-86644-857-5
- Band 3** Frederik Trippe
**Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrens-
konfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL)
Kraftstoffen und Chemikalien.** 2013
ISBN 978-3-7315-0031-5
- Band 4** Dogan Keles
**Uncertainties in energy markets and their
consideration in energy storage evaluation.** 2013
ISBN 978-3-7315-0046-9
- Band 5** Heidi Ursula Heinrichs
**Analyse der langfristigen Auswirkungen von
Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem
im europäischen Energieverbund.** 2013
ISBN 978-3-7315-0131-2



- Band 6** Julian Stengel
Akteursbasierte Simulation der energetischen
Modernisierung des Wohngebäudebestands
in Deutschland. 2014
ISBN 978-3-7315-0236-4
- Band 7** Sonja Babrowski
Bedarf und Verteilung elektrischer Tagesspeicher im
zukünftigen deutschen Energiesystem. 2015
ISBN 978-3-7315-0306-4
- Band 8** Marius Wunder
Integration neuer Technologien der
Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette. 2015
ISBN 978-3-7315-0319-4



Der Baustoff Bitumen wird in jüngster Zeit - neben der konventionellen Heißhandhabung - wieder zunehmend unter Umgebungstemperatur transportiert, gelagert und anschließend wiederverflüssigt, bevor er unter anderem in Asphaltmischanlagen weiterverarbeitet wird. Neue Technologien machen diese Bitumenkalthandhabung möglich. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie und unter Berücksichtigung welcher Parameter es möglich ist die Bitumenkalthandhabung zur Reduktion der Produktionskosten von Asphalt einzusetzen. Die Kosten der benötigten einzelnen möglichen Technologiekombinationen werden hierfür im Detail ermittelt. Anschließend werden diese in ein gemischt ganzzahliges lineares Optimierungsmodell zur Technologie- und Standortwahl sowie Kapazitätsbestimmung integriert. Dieses Modell wird dann genutzt um das Produktionsnetzwerk eines Referenzunternehmens beispielhaft zu optimieren und die kritischen Parameter sowie die Kosteneinsparpotentiale zu ermitteln. Die Technologien werden ebenso einer ökobilanziellen Bewertung unterzogen. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit wird es ermöglicht das Verpacken und Verflüssigen von Bitumen in den unterschiedlichsten Verfahrensketten optimal einzusetzen.

