

Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)

**Vergleichende Untersuchung umwelt- und
klimarelevanter Wirkungen verschiedener
Verkehrsmittel bei der Erfüllung ausgewählter
Transportaufgaben im Güterverkehr**

von

R. Lampatzer, F.-P. Schäfer, M. Wacker (Universität Stuttgart, Institut für
Straßen- und Verkehrswesen)
U. Fahl, P. Liebscher, J. Stekeler, A. Voß (Universität Stuttgart, Institut für
Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung)
D. Sanftleben, G. Voß (Universität Hannover, Institut für Schienenfahrzeuge
und maschinelle Bahnanlagen)

Förderkennzeichen: PEF 494004

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

April 2000

Inhalt

	Inhalt.....	I
	Zusammenfassung.....	VII
1	Einleitung.....	1
2	Vorgehensweise.....	5
3	Festlegung der Planungsaufgaben, der Transportaufgaben und der Verkehrsmittel.....	9
	3.1 Einführung.....	9
	3.2 Planungsaufgaben.....	10
	3.2.1 Allgemeines.....	10
	3.2.2 Güterverkehr in Ballungsgebieten.....	10
	3.2.3 Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg.....	12
	3.2.4 Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum.....	14
	3.3 Transportaufgaben.....	14
	3.3.1 Allgemeines.....	14
	3.3.2 Art und Gewicht des Transportguts.....	15
	3.3.3 Relationen.....	18
	3.3.4 Zeitpunkt des Transports.....	20
	3.4 Verkehrsmittel.....	20
4	Konkrete Transportaufgaben.....	23
	4.1 Allgemeines.....	23
	4.2 Güterverkehr in Ballungsgebieten.....	23
	4.3 Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg.....	29
	4.4 Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum.....	34
5	Direkter antriebsbedingter Energieaufwand und direkte antriebsbedingte Emissionen.....	43
	5.1 Allgemeines.....	43
	5.2 Straße.....	43
	5.2.1 Routen.....	43
	5.2.1.1 Ballungsgebiet.....	44

5.2.1.2	Transit-Güterverkehr.....	50
5.2.1.3	Ländlich strukturierter Raum.....	51
5.2.2	Energieaufwand und Emissionen.....	55
5.2.3	Zeit und Kosten.....	68
5.3	Bahn.....	74
5.3.1	Routen.....	74
5.3.2	Energieaufwand und Emissionen.....	78
5.3.2.1	Grundlagen der Fahrsimulation.....	78
5.3.2.2	Fahrzeugspezifische Daten.....	81
5.3.2.3	Streckenspezifische Daten.....	83
5.3.2.4	Berechnung und Zuordnung des Energieaufwands und der Emissionen.....	86
5.3.3	Zeit und Kosten.....	87
5.3.3.1	Transportzeiten.....	87
5.3.3.2	Transportkosten.....	89
5.4	Binnenschiff.....	91
5.4.1	Allgemeines.....	91
5.4.2	Routen.....	91
5.4.3	Energieaufwand und Emissionen.....	92
5.4.4	Zeit und Kosten.....	96
6	Energieaufwand und Emissionen des Umschlags.....	99
6.1	Stückgut.....	99
6.2	Wagenladung.....	100
6.3	Massengut.....	101
7	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen.....	103
7.1	Einführung.....	103
7.1.1	Allgemeines.....	103
7.1.2	Definition des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen.....	104
7.1.3	Methodik zur Bestimmung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen.....	106
7.1.4	Bereitstellung der Fertigstoffe.....	108
7.1.5	Energieumwandlungs- und Transportprozesse.....	109
7.1.5.1	Energieumwandlungsprozesse.....	109
7.1.5.2	Transportprozesse.....	110
7.2	Bereitstellung der Energieträger.....	110

7.2.1	Einführende Bemerkungen.....	110
7.2.2	Mineralölprodukte.....	113
7.2.2.1	Einführende Bemerkungen.....	113
7.2.2.2	Rohölförderung, -aufbereitung und -transport.....	114
7.2.2.3	Rohölverarbeitung und Feinverteilung der Mineralölprodukte.....	116
7.2.2.4	Primärenergieaufwand und Emissionen bei der Bereitstellung von Mineralölprodukten.....	119
7.2.3	Elektrische Energie.....	119
7.2.3.1	Einführende Bemerkungen.....	119
7.2.3.2	Primärenergieaufwand und Emissionen bei der Netzstrombereitstellung.....	121
7.2.3.3	Primärenergieaufwand und Emissionen bei der Strombereitstellung der Deutschen Bundesbahn.....	123
7.2.4	Erdgas.....	126
7.3	Herstellung, Betrieb und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur.....	128
7.3.1	Bilanzgrenzen und Methodik.....	128
7.3.2	Straßeninfrastruktur.....	129
7.3.2.1	Technische Grundlagen.....	129
7.3.2.2	Material- und Energieträgereinsatz.....	131
7.3.2.3	Wahl eines geeigneten Zuweisungsschlüssels.....	135
7.3.2.4	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Straßen.....	136
7.3.3	Bahninfrastruktur.....	140
7.3.3.1	Technische Grundlagen.....	140
7.3.3.2	Material- und Energieträgereinsatz.....	143
7.3.3.3	Wahl eines geeigneten Zuweisungsschlüssels.....	147
7.3.3.4	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Schienenstrecken.....	148
7.3.4	Binnenwasserstraßen.....	151
7.3.4.1	Technische Grundlagen.....	151
7.3.4.2	Material- und Energieträgereinsatz.....	152
7.3.4.3	Wahl eines geeigneten Zuweisungsschlüssels.....	153
7.3.4.4	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Binnenwasserstraßen.....	154
7.3.5	Umschlaganlagen.....	154
7.3.5.1	Technische Grundlagen.....	154
7.3.5.2	Material- und Energieträgereinsatz.....	155

7.3.5.3	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Umschlaganlagen.....	156
7.3.6	Zusammenfassende Bemerkungen.....	156
7.4	Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsmittel.....	157
7.4.1	Bilanzgrenzen und Methodik.....	157
7.4.2	Straßenfahrzeuge.....	158
7.4.2.1	Technische Grundlagen.....	158
7.4.2.2	Material- und Energieträgereinsatz.....	158
7.4.2.3	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen der Straßenfahrzeuge.....	160
7.4.3	Schienefahrzeuge.....	161
7.4.3.1	Technische Grundlagen.....	161
7.4.3.2	Material- und Energieträgereinsatz.....	162
7.4.3.3	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen der Schienefahrzeuge.....	164
7.4.4	Binnenschiffe.....	166
7.4.4.1	Technische Grundlagen.....	166
7.4.4.2	Material- und Energieträgereinsatz.....	166
7.4.4.3	Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen der Binnenschiffe.....	168
7.4.5	Vergleichende Darstellung des Primärenergieaufwands und der Emissionen verschiedener Verkehrsmittel.....	169
7.4.6	Zusammenfassende Bemerkungen.....	169
8	Vorstellung der Ergebnispräsentation.....	171
9	Ergebnisse.....	177
9.1	Einführung.....	177
9.2	Güterverkehr in Ballungsgebieten.....	178
9.2.1	Leichtes Stückgut.....	178
9.2.2	Massengut.....	180
9.3	Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg.....	182
9.3.1	Leichtes Stückgut.....	182
9.3.2	Wagenladung.....	183
9.3.3	Massengut.....	188
9.4	Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum.....	191
9.4.1	Leichtes Stückgut.....	191
9.4.2	Wagenladung.....	193

9.4.3	Massengut.....	19 6
9.5	Kombination der Transportaufgaben.....	198
9.5.1	Leichtes Stückgut.....	198
9.5.2	Wagenladung.....	200
9.5.3	Massengut.....	20 4
9.6	Parametervariation.....	206
9.6.1	Güterverkehr in Ballungsräumen.....	206
9.6.2	Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg.....	20 7
9.6.3	Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum.....	210
9.7	Alternative Berechnungsmethoden.....	211
9.8	Zusammenfassung.....	213
Literatur.....		215

Zusammenfassung

Der Straßengüterverkehr ist überproportional an den durch den Straßenverkehr verursachten Umweltbelastungen beteiligt. Besonders deutlich tritt dies in den Ballungsräumen zu Tage. So betrug z. B. im Stadtgebiet Stuttgart 1990 der Anteil des Straßengüterverkehrs an der Fahrleistung aller Kfz nur 8 %, er trug aber zu den NO_x-Emissionen zu 50 % und zu den VOC-Emissionen zu 12 % bei /Hitzler, 1995/. 1995 betrug der Anteil der Emissionen des Güterverkehrs an den gesamten Emissionen des motorisierten Straßenverkehrs in der Region Stuttgart bei den Stickoxiden (NO_x) 37 % und bei den Kohlenwasserstoffen (VOC) 18 % /VRS, 1997/. Auch die Autobahnen lassen sich anhand von Immissionskatastern eindeutig als Emissionsschwerpunkte erkennen /John u.a., 1997/. Wiederum trägt der Lkw überproportional zu den Emissionen bei.

Alle gängigen Prognosen der weiteren Verkehrsentwicklung zeigen, daß für die Zukunft mit einem weiteren Wachstum des Straßengüterverkehrs zu rechnen ist. So geht die Bundesverkehrswegeplanung /BMV, 1992/ von einem Anstieg der Verkehrsleistung im Straßengüterfernverkehr von 1991 bis 2010 um 46 % aus. Der Generalverkehrsplan des Landes Baden-Württemberg /VMBW, 1995/ prognostiziert für den Zeitraum von 1990 bis 2010 in seinem Gestaltungsszenario, das den Anforderungen an eine dauerhaft umweltgerechte Mobilität genügen soll, einen Anstieg der Straßengüterverkehrsleistung im Nah- und Fernverkehr um 23 %. Der Generalverkehrsplan Baden-Württemberg geht dabei trotz dieser absoluten Erhöhung der prognostizierten Güterverkehrsleistung von einer Verringerung des Anteils des Straßengüterverkehrs an der gesamten Güterverkehrsleistung aus, da für die Bahn im gleichen Zeitraum ein Anstieg der Güterverkehrsleistung um 134 % von 9.160 Mio tkm auf 21.390 Mio tkm unterstellt wird.

Die tatsächliche Entwicklung der letzten Jahre hat den prognostizierten Anstieg der Güterverkehrsleistung allerdings noch übertroffen. 1995 wurde bundesweit im Straßengüterfernverkehr eine Verkehrsleistung von 200,1 Mrd tkm erbracht /BMV, 1996/. Damit waren bereits 1995 50 % des in der Bundesverkehrswegeplanung /BMV, 1992/ von 1991 bis 2010 erwarteten Zuwachses erreicht.

Die mit diesem Anstieg des Güterverkehrs verbundene zu erwartende Erhöhung der Umweltbelastungen macht es erforderlich, geeignete Maßnahmen zur Begrenzung dieses Anstiegs bzw. - wenn möglich - gar zu einer Senkung der Umweltbelastungen zu finden. Dabei gilt neben der Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen durch motor- und fahrzeugtechnischen Maßnahmen sowie Maßnahmen zur Effizienzsteigerung innerhalb der Verkehrsmittel insbesondere die Verlagerung von Verkehrsanteilen von stärker umweltbelastenden auf weniger umweltbelastende Verkehrsmittel als eine zentrale Strategie zur Erreichung des genannten Ziels. Dabei wird im Bereich des Güterverkehrs stets davon ausgegan-

gen, daß der Straßengüterverkehr besonders umweltbelastend ist, während die Bahn und das Binnenschiff als umweltfreundlich eingestuft werden. Allerdings stützt sich diese Aussage auf den Vergleich von auf die Verkehrsleistung bezogenen Emissionsfaktoren, die für die Beurteilung konkreter Verkehrsverlagerungen nicht herangezogen werden können, wie die Ergebnisse einiger Forschungsarbeiten zeigen /Steierwald, 1993; Fahl, 1994/.

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben erfolgt eine Beurteilung der Umweltverträglichkeit für die Verkehrsmittel Lkw, Bahn und Binnenschiff anhand von konkreten Transportaufgaben, die beispielhaft für das Verkehrsgeschehen in Baden-Württemberg gelten können. Dieser Vergleich soll allerdings nicht mit Hilfe der kritisierten pauschalen, auf die Verkehrsleistung bezogenen Emissionsfaktoren, sondern auf der Basis einer möglichst exakten Berechnung des notwendigen Energieverbrauchs und der damit verbundenen Schadstoffemissionen für die genannten Verkehrsmittel erfolgen. Dies setzt insbesondere voraus, folgende, die Umweltbelastungen wesentlich bestimmende Faktoren zu berücksichtigen:

- unterschiedliche Transportentfernungen für die einzelnen Verkehrsmittel (Umwege),
- Vor- und Nachläufe bei gebrochenen Verkehren,
- unterschiedliche Auslastungsgrade,
- Differenzierung nach verschiedenen Fahrzeugen und unterschiedlichen Betriebsbedingungen innerhalb der einzelnen Verkehrsmittel,
- Zusammensetzung des Kraftwerkparcs, der der Strombereitstellung zugrunde liegt sowie
- Berücksichtigung des nicht antriebsbedingten Energieverbrauchs z. B. für die Herstellung, Wartung und Entsorgung der Verkehrsmittel oder den Bau und die Unterhaltung der Verkehrswege.

Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens wird ein wichtiger Beitrag zur Beurteilung verkehrstechnischer und verkehrsplanerischer Maßnahmen im Hinblick auf deren Umweltrelevanz geleistet. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Differenzierung nach lokal, regional und global wirkenden Umweltwirkungen, die eine Diskussion der Ergebnisse sowohl vor der lokalen Situation der einzelnen Transportaufgaben als auch vor dem übergeordneten Hintergrund verkehrspolitischer Grundsatzentscheidungen zuläßt.

Zur Beantwortung dieser Fragen werden zunächst die drei Planungsaufgaben

- "Güterverkehr in Ballungsgebieten",
- "Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg" und
- "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum"

definiert, die sich hinsichtlich ihrer verkehrlichen und (güter-)strukturellen Randbedingungen unterscheiden. Jede dieser Planungsaufgaben repräsentiert einen Ausschnitt des gesamten Güterverkehrs in Baden-Württemberg, der jeweils eine spezifische Problemlage repräsentiert.

Innerhalb der Planungsaufgabe "Güterverkehr in Ballungsgebieten" werden die vier Beispielräume

- "Stuttgart",
- "Karlsruhe",
- "Oberrhein (Freiburg)" und
- "Ulm"

untersucht.

Innerhalb der Planungsaufgabe "Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg" werden folgende vier Relationen untersucht:

- "Mannheim - Karlsruhe - Basel",
- "Mannheim - Stuttgart - Ulm",
- "Ulm - Ravensburg - Lindau" und
- "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen".

Innerhalb der Planungsaufgabe "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" werden die beiden Beispielräume

- "Oberschwaben (Ravensburg)" und
- "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)"

untersucht.

Da auch in den einzelnen Beispielräumen nicht das gesamte Güterverkehrsgeschehen abgebildet werden kann, müssen ausgewählte Transportaufgaben definiert werden, die geeignet sind, belastbare Aussagen zum Güterverkehrsgeschehen und insbesondere zur Umweltverträglichkeit der einzelnen Verkehrsmittel zu treffen. Dabei ist es angesichts der Vielfalt des Güterverkehrsgeschehens nicht möglich, charakteristische oder prototypische Fälle anzugeben. Vielmehr muß bei der Festlegung der Transportaufgaben versucht werden, markante Eckpfeiler abzubilden, die unterschiedliche Ausprägungen des Güterverkehrs abdecken. Dabei ist zu beachten, daß aufgrund der Sendungsstrukturen die einzelnen Gütertransporte in Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen in unterschiedlichem Maße für die einzelnen

Verkehrsmittel geeignet sind. Auch dieser Aspekt spielt eine wesentliche Rolle bei der Festlegung der Transportaufgaben.

Im einzelnen werden die Transportaufgaben über folgende Eigenschaften definiert:

- Art und Gewicht des Transportguts,
- Relation und
- Zeitpunkt des Transports.

Um der Vielzahl der unterschiedlichen Güterarten gerecht zu werden, werden insgesamt vier Transportgüter festgelegt, die in der Untersuchung berücksichtigt werden sollen. Im einzelnen handelt es sich um folgende Transportgüter:

- "leichtes Stückgut",
- "schweres Stückgut",
- "Wagenladung" und
- "Massengut".

Im Rahmen der Transportaufgaben sind ferner die zu untersuchenden Relationen, die durch die Festlegung der Start- und Zielpunkte definiert werden, von wesentlicher Bedeutung für die Aussagekraft der Ergebnisse.

Wesentliches Kriterium für die Festlegung der Start- und Zielorte in den verschiedenen Planungsaufgaben ist die Verfügbarkeit der Verkehrsmittel. So sollte der Transport auf den Relationen möglichst mit allen in die Untersuchung einbezogenen Verkehrsmitteln möglich sein. Da dies ist für den Lkw immer und mit dem Binnenschiff a priori nur auf den entsprechend ausgewählten Beziehungen zu erfüllen ist, stellt die Verfügbarkeit von Gleisanschlüssen für den Bahntransport das entscheidende Kriterium für die Auswahl der Start- und Zielorte dar. So soll der Bahntransport nicht nur im Hauptlauf, sondern auch bei den gfs. notwendigen Vor- und Nachläufen zu einem Güterverkehrszentrum oder einer Umschlaganlage möglich sein.

Um den Anspruch der Untersuchung einzulösen, eine möglichst realistische Abbildung des Verkehrsgeschehens vorzunehmen, ist es notwendig, den Zeitpunkt der Durchführung des Transports festzulegen. Dadurch ist es möglich, den jeweiligen Transportablauf bei den einzelnen Verkehrsmitteln sowie die jeweiligen Verkehrsverhältnisse im Straßenverkehr abzubilden. Es wird festgelegt, daß die Güter jeweils an einem Donnerstag um 10.00 Uhr beim Empfänger ankommen sollen.

Für die über einzelnen Transportaufgaben stehen nun die Verkehrsmittel Lkw, Bahn und Binnenschiff zur Verfügung. Bei der Bahn wird zusätzlich unterschieden in den heute üblichen,

„konventionellen“ Transport, den Transport mit Hilfe eines Containers sowie zwei fiktive Formen, die sich in unterschiedlichen Phasen der praktischen Erprobung befinden, den automatischen Einzelwagen und den Trailerzug.

Prinzipiell könnten alle Verkehrsmittel für den Transport aller Güter eingesetzt werden. Allerdings ergeben sich aufgrund der Eigenschaften der einzelnen Transportgüter und der einzelnen Verkehrsmittel Randbedingungen, die nicht alle Kombinationen aller Verkehrsmittel mit allen zu befördernden Gütern sinnvoll erscheinen lassen. Unrealistische und unsinnige Kombinationen (z.B. leichtes Stückgut mit dem Binnenschiff), werden in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt.

Die in der Forschungsarbeit durchgeführten Berechnungen basieren auf einer Vielzahl von Transportaufgaben und führen daher zu einer Fülle von Einzelergebnissen. Die auf die jeweilige Transportaufgaben bezogenen Ergebnisse im einzelnen zu diskutieren, würde den Rahmen dieses Berichts sprengen. Daher sind diese Einzelergebnisse auf dem diesem Bericht beigelegten CD-ROM veröffentlicht. Im Bericht selbst erfolgt nur eine kursorische Diskussion der Ergebnisse.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bestätigen den Untersuchungsansatz. Pauschale Aussagen, welches Verkehrsmittel in einer bestimmten Situation als besonders umweltfreundlich oder sogar als "das umweltfreundlichste" bezeichnet werden kann, sind nicht möglich. Vielmehr hängt es tatsächlich von den aktuellen Randbedingungen ab, welchem Verkehrsmittel dieses Prädikat zugesprochen werden kann.

Auch für einzelne planerische Ansätze kann nicht generell gesagt werden, welches Verkehrsmittel konkret im Hinblick auf die Umweltwirkungen davon profitiert. Ein sehr augenfälliges Beispiel hierfür ist die Organisation des Stückgut-Transports über Güterverkehrszentren. Vom planerischen Ansatz einleuchtend, birgt diese Maßnahme ein hohes Bündelungspotenzial und damit ein hohes Potenzial zur Verringerung des notwendigen Energieaufwands und der Schadstoffemissionen. Die auf gegebene lokale Situationen aufbauende Untersuchung zeigt allerdings, dass durch die Bündelung der Transporte in den Güterverkehrszentren gegenüber der heute aktuellen Situation durchaus Mehrwege und daraus abgeleitet konterkarierende Effekte entstehen können. Generell kann gesagt werden, dass die Transportweiten insbesondere dann sehr stark variieren, wenn bei einzelnen Verkehrsmitteln gebrochene Verkehre auftreten. Aber auch auf den langen Transitrouten durch Baden-Württemberg ohne Umschläge gibt es in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen beträchtlichere Unterschiede. Dies betrifft in erster Linie Mehrwege bei der Bahn und beim Binnenschiff.

Die Energieaufwendungen des Umschlags und die damit verbundenen Emissionen spielen insbesondere beim Stückgut eine nennenswerte Rolle. Bei den anderen untersuchten Gütern spielt der Umschlag eine untergeordnete Rolle.

Die Auslastung der einzelnen Verkehrsmittel ist von großer Bedeutung für die den einzelnen Transportgütern zuzurechnenden Energieaufwendungen und Emissionen.

Der Einfluß der Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur sowie der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsmittel ist bei den einzelnen Transportaufgaben und umweltrelevanten Wirkungskomponenten unterschiedlich. Dies bestätigt aber den Untersuchungsansatz, diese Komponenten zu berücksichtigen.

Die untersuchten "neuartigen" Bahn-Alternativen Trailerzug, automatischer Einzelwagen und Massenguttransport mit Abrollcontainern zeigen in aller Regel keine Vorteile gegenüber den bekannten Verfahren des Bahntransports (Einzelwagen, Container), allerdings weisen sie meist günstigere Werte als der reine Lkw-Transport auf. Daher können sie in konkreten Entscheidungen des Einzelfalls durchaus eingebunden werden, da sie bei gegenüber dem konventionellen Bahntransport flexibleren Einsatzmöglichkeiten in aller Regel eine geringere Umweltbelastung als der reine Lkw-Transport bewirken.

Die Berücksichtigung der EURO II - Abgas-Grenzwertstufe im Rahmen der Parametervariation erbrachte im Unterschied zu EURO III keine nennenswerten Veränderungen. Bei Berücksichtigung der Abgas-Grenzwertstufe EURO III ergeben sich Verbesserungen bei den CO-, NO_x- und VOC-Emissionen der Lkw. Welche Wirkung dies auf die umweltrelevante Reihung der Verkehrsmittel hat, ist allerdings wiederum vom Einzelfall abhängig. Die fallweise Untersuchung eines Erdgas-Lkw zeigt für diesen höhere VOC-Emissionen als für den Diesel-Lkw. Auch hier hängt die weitere Wirkung auf die Reihung der Verkehrsmittel von den örtlichen Randbedingungen ab. Deutlich negativ für den Lkw wirkte sich die Untersuchung eines schlechteren Verkehrsablaufs auf den Bundesautobahnen aus. Deutlich wirkt sich auch stets die Umstellung der Dieseltraktion auf Elektrotraktion aus. Dabei zeigen sich eindeutig die Spezifika der Bereitstellung dieser beiden Energieträger. So bleibt der notwendige Energieaufwand zwar gleich, die CO₂-, CO- und NO_x-Emissionen reduzieren sich aber deutlich, während die VOC-Emissionen ansteigen. Die Umstellung des Bahnstrom-Mix auf den in Baden-Württemberg üblichen Strommix zeigte insgesamt keine nennenswerten Effekte. Die Berücksichtigung im Emissionsverhalten verbesserter Diesellokomotiven zeigt nur bei den CO-Emissionen eine deutliche Wirkung. Die ebenfalls im Rahmen der Parametervariationen untersuchte Verringerung der Auslastung der Bahn führt wie zu erwarten zu einer Erhöhung deren notwendigen Energieverbrauchs und Schadstoffemissionen. Inwieweit dies die Reihung der Verkehrsmittel betrifft, hängt wiederum von den örtlichen Gegebenheiten ab.

Wird der Energieaufwand untersucht, der notwendig wäre, wenn nur das jeweils untersuchte Transportgut transportiert würde ("Alleinfahrt"), also auf Bündelungseffekte verzichtet würde, zeigt sich der Lkw als das günstigste Verkehrsmittel, während das Binnenschiff erwartungsgemäß mit großem Abstand am schlechtesten abschneidet. Bei Betrachtung der

Grenzenergie verringern sich der notwendige Energieaufwand und die entsprechenden Schadstoffemissionen der Bahn geringfügig, während sie sich für das Binnenschiff geringfügig erhöhen. Die dritte untersuchte Berechnungsmethode, bei der die herstellungsbedingten Aufwendungen für die Straße nicht berücksichtigt werden, zeigt insgesamt keine nennenswerten Effekte.

1 Einleitung

Der Straßengüterverkehr ist überproportional an den durch den Straßenverkehr verursachten Umweltbelastungen beteiligt. Besonders deutlich tritt dies in den Ballungsräumen zu Tage. So betrug z. B. im Stadtgebiet Stuttgart 1990 der Anteil des Straßengüterverkehrs an der Fahrleistung aller Kfz nur 8 %, er trug aber zu den NO_x-Emissionen zu 50 % und zu den VOC-Emissionen zu 12 % bei /Hitzler, 1995/. 1995 betrug der Anteil der Emissionen des Güterverkehrs an den gesamten Emissionen des motorisierten Straßenverkehrs in der Region Stuttgart bei den Stickoxiden (NO_x) 37 % und bei den Kohlenwasserstoffen (VOC) 18 % /VRS, 1997/. Auch die Autobahnen lassen sich anhand von Immissionskatastern eindeutig als Emissionsschwerpunkte erkennen /John u.a., 1997/. Wiederum trägt der Lkw überproportional zu den Emissionen bei.

Alle gängigen Prognosen der weiteren Verkehrsentwicklung zeigen, daß für die Zukunft mit einem weiteren Wachstum des Straßengüterverkehrs zu rechnen ist. So geht die Bundesverkehrswegeplanung /BMV, 1992/ von einem Anstieg der Verkehrsleistung im Straßengüterfernverkehr von 1991 bis 2010 um 46 % aus. Der Generalverkehrsplan des Landes Baden-Württemberg /VMBW, 1995/ prognostiziert für den Zeitraum von 1990 bis 2010 in seinem Gestaltungsszenario, das den Anforderungen an eine dauerhaft umweltgerechte Mobilität genügen soll, einen Anstieg der Straßengüterverkehrsleistung im Nah- und Fernverkehr um 23 %. Der Generalverkehrsplan Baden-Württemberg geht dabei trotz dieser absoluten Erhöhung der prognostizierten Güterverkehrsleistung von einer Verringerung des Anteils des Straßengüterverkehrs an der gesamten Güterverkehrsleistung aus, da für die Bahn im gleichen Zeitraum ein Anstieg der Güterverkehrsleistung um 134 % von 9.160 Mio tkm auf 21.390 Mio tkm unterstellt wird.

Die tatsächliche Entwicklung der letzten Jahre hat den prognostizierten Anstieg der Güterverkehrsleistung allerdings noch übertroffen. 1995 wurde bundesweit im Straßengüterfernverkehr eine Verkehrsleistung von 200,1 Mrd tkm erbracht /BMV, 1996/. Damit waren bereits 1995 50 % des in der Bundesverkehrswegeplanung /BMV, 1992/ von 1991 bis 2010 erwarteten Zuwachses erreicht.

Die mit diesem Anstieg des Güterverkehrs verbundene zu erwartende Erhöhung der Umweltbelastungen macht es erforderlich, geeignete Maßnahmen zur Begrenzung dieses Anstiegs bzw. - wenn möglich - gar zu einer Senkung der Umweltbelastungen zu finden. Dabei gilt neben der Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen durch motor- und fahrzeugtechnischen Maßnahmen sowie Maßnahmen zur Effizienzsteigerung innerhalb der Verkehrsmittel insbesondere die Verlagerung von Verkehrsanteilen von stärker umweltbelastenden auf weniger umweltbelastende Verkehrsmittel als eine zentrale Strategie zur Erreichung des genannten Ziels. Dabei wird im Bereich des Güterverkehrs stets davon ausgegangen, daß der Straßengüterverkehr

besonders umweltbelastend ist, während die Bahn und das Binnenschiff als umweltfreundlich eingestuft werden. Allerdings stützt sich diese Aussage auf den Vergleich von auf die Verkehrsleistung bezogenen Emissionsfaktoren, die für die Beurteilung konkreter Verkehrsverlagerungen nicht herangezogen werden können, wie die Ergebnisse einiger Forschungsarbeiten zeigen /Steierwald, 1993; Fahl, 1994/.

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben erfolgt eine Beurteilung der Umweltverträglichkeit für die Verkehrsmittel Lkw, Bahn und Binnenschiff anhand von konkreten Transportaufgaben, die beispielhaft für das Verkehrsgeschehen in Baden-Württemberg gelten können. Dieser Vergleich soll allerdings nicht mit Hilfe der kritisierten pauschalen, auf die Verkehrsleistung bezogenen Emissionsfaktoren, sondern auf der Basis einer möglichst exakten Berechnung des notwendigen Energieverbrauchs und der damit verbundenen Schadstoffemissionen für die genannten Verkehrsmittel erfolgen. Dies setzt insbesondere voraus, folgende, die Umweltbelastungen wesentlich bestimmende Faktoren zu berücksichtigen:

- unterschiedliche Transportentfernungen für die einzelnen Verkehrsmittel (Umwege),
- Vor- und Nachläufe bei gebrochenen Verkehren,
- unterschiedliche Auslastungsgrade,
- Differenzierung nach verschiedenen Fahrzeugen und unterschiedlichen Betriebsbedingungen innerhalb der einzelnen Verkehrsmittel,
- Zusammensetzung des Kraftwerkparcs, der der Strombereitstellung zugrunde liegt sowie
- Berücksichtigung des nicht antriebsbedingten Energieverbrauchs z. B. für die Herstellung, Wartung und Entsorgung der Verkehrsmittel oder den Bau und die Unterhaltung der Verkehrswege.

Hierfür steht ein erprobtes Instrumentarium /Steierwald, 1993; Fahl, 1994/ zu Verfügung, mit dem der Einfluß dieser Randbedingungen auf den Energieaufwand und die Schadstoffemissionen (CO, VOC, NO_x, Partikel / Staub, CO₂) untersucht werden kann. Um eine Gesamtbewertung der Verkehrsmittel zu ermöglichen, werden zusätzlich die für die einzelnen Transporte benötigten Kosten und Transportzeiten ermittelt.

Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens wird ein wichtiger Beitrag zur Beurteilung verkehrstechnischer und verkehrsplanerischer Maßnahmen im Hinblick auf deren Umweltrelevanz geleistet. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Differenzierung nach lokal, regional und global wirkenden Umweltwirkungen, die eine Diskussion der Ergebnisse sowohl vor der lokalen Situa-

tion der einzelnen Transportaufgaben als auch vor dem übergeordneten Hintergrund verkehrspolitischer Grundsatzentscheidungen zuläßt.

Nach dieser Einleitung (Teil I des Berichts) gliedert sich der Bericht in drei weitere Hauptteile:

- Teil II: die Beschreibung des methodischen Grundkonzepts (Kap. 2 bis 4),
- Teil III: die Darstellung der Methodik der Berechnungen (Kap. 5 bis 7) sowie
- Teil IV: die Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse (Kap. 8 und 9).

Teil II (Kap. 2 bis 4) des Berichts widmet sich dem methodischen Grundkonzept. In Kapitel 2 wird hierzu zunächst die generelle Vorgehensweise bei der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens beschrieben. Dies betrifft sowohl den inhaltlichen Ansatz des Forschungsvorhabens als auch die formale Aufgliederung in die einzelnen Arbeitspakete und deren Bearbeitung. Die Abkehr von der Verwendung pauschaler Emissionsfaktoren bedingt, daß konkrete Transportaufgaben definiert werden müssen. In Kapitel 3 werden daher zunächst die Planungsaufgaben vorgestellt, innerhalb derer über Art und Gewicht des Transportguts, den Zeitpunkt sowie die Relation des Transports die einzelnen Transportaufgaben festgelegt werden können. In Kapitel 4 werden diese Transportaufgaben konkret vorgestellt.

In Teil III (Kap. 5 bis 7) wird die Methodik der Berechnungen vorgestellt. In Kapitel 5 wird zunächst die Methodik der Berechnung des direkten antriebsbedingten Energieaufwands und der direkten antriebsbedingten Emissionen für die untersuchten Verkehrsmittel Lkw, Bahn und Binnenschiff diskutiert. In Kapitel 6 schließt sich die Methodik der Berechnung des Energieaufwands und der Emissionen des Umschlags sowie in Kapitel 7 die Methodik zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen (Endenergiebereitstellung, Infrastruktur, Fahrzeuge) an.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens finden sich in Teil IV (Kap. 8 und 9). Hierzu wird in Kapitel 8 zunächst die Art der Ergebnispräsentation formal erläutert, während in Kapitel 9 die Ergebnisse für die einzelnen Planungsaufgaben vergleichend diskutiert werden.

Das Forschungsvorhaben wurde gemeinsam bearbeitet vom Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) der Universität Stuttgart (Federführung), dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart und dem Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen (ISB) der Universität Hannover.

2 Vorgehensweise

Aufgabe der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, konkrete Transporte eines Gutes mit alternativen Verkehrsmitteln von einem Ort A zu einem Ort B abzubilden, den mit diesen Transporten verbundenen Energieaufwand und die dazu gehörigen Emissionen für die einzelnen Verkehrsmittel zu bestimmen sowie vergleichend zu bewerten. Dabei sollen allerdings nicht nur der direkte antriebsbedingte Energieaufwand und die direkten antriebsbedingten Emissionen berücksichtigt werden, sondern es sollen auch der Energieaufwand und die Emissionen aus der Bereitstellung der Endenergie, aus der Herstellung, dem Betrieb und der Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur sowie aus der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsmittel betrachtet werden. Ergänzend werden Energieaufwand und Emissionen aus einem gfs. notwendigen Umschlag des Transportguts berücksichtigt.

Dieses Anforderungsprofil kann mit allgemeinen, auf die Verkehrsleistung bezogenen Emissionsfaktoren nicht erfüllt werden. Vielmehr muß eine Methodik gewählt werden, mit der die einzelnen Transporte so exakt wie möglich abgebildet werden können. Dabei müssen insbesondere die folgenden, den Energieverbrauch und die Emissionen wesentlich bestimmenden Einflußgrößen berücksichtigt werden können:

- Transportentfernung, differenziert nach den jeweils eingesetzten Verkehrsmitteln,
- Fahrtverlauf der jeweiligen Verkehrsmittel,
- gfs. notwendiger Umschlag zwischen einzelnen Verkehrsmitteln,
- Auslastung der jeweiligen Verkehrsmittel,
- tatsächlich eingesetztes Fahrzeug,
- Kraftwerkspark, der der Stromerzeugung zugrunde liegt,
- Bereitstellung der Endenergie für die verschiedenen Energieträger,
- Herstellung, Betrieb und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur sowie
- Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsmittel.

Hierfür steht ein in vorausgegangenen Forschungsprojekten erprobtes Instrumentarium zur Verfügung /Steierwald, 1993; Fahl, 1994/, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens partiell weiterentwickelt wird.

Abbildung 2-1 zeigt den grundsätzlichen methodischen Aufbau dieses Forschungsvorhabens und die Aufgabenteilung zwischen den beteiligten Projektpartnern Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV), Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart sowie Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen (ISB), Universität Hannover.

Die Projektleitung und Gesamtkoordination obliegt dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, das ferner für die Berechnungen im Bereich der Verkehrsmittel Lkw und Binnenschiff sowie für den Umschlag der Transportgüter verantwortlich ist. Das Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen führt die Berechnungen im Bereich der Bahn durch. Das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung bestimmt den Energieaufwand und die damit verbundenen Emissionen für die Bereitstellung der Endenergieträger und für die sog. indirekten Effekte, die Herstellung, den Betrieb und die Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur sowie die Herstellung, die Instandhaltung und die Entsorgung der Verkehrsmittel. Ferner ist das IER bei der Zusammenführung und der Diskussion der Ergebnisse beteiligt.

Den Beginn der Arbeiten bildet die Auswahl und Festlegung der Transportaufgaben in den Beispielräumen. Hierzu werden zunächst Planungsaufgaben definiert, die sich in ihren verkehrlichen Randbedingungen grundsätzlich unterscheiden. Für diese Planungsaufgaben werden dann Beispielräume ausgewählt, innerhalb derer die Untersuchungen durchgeführt werden. Da es aber nicht möglich ist, den Güterverkehr innerhalb dieser Beispielräume vollständig abzubilden, werden letztlich innerhalb der Beispielräume einzelne Transportaufgaben definiert, für die die vergleichenden Berechnungen durchgeführt werden. Diese Transportaufgaben sind über die Art und das Gewicht des Transportguts, ihren Start- und Zielpunkt sowie den Ankunftszeitpunkt am Ziel exakt definiert.

In einem nächsten Arbeitsschritt werden für die nunmehr feststehenden Transportaufgaben die Routen für die einzelnen Transporte und die bei diesen Transporten eingesetzten Fahrzeuge bestimmt.

Damit liegen alle Randbedingungen vor, um zum einen den direkten antriebsbedingten Energieaufwand und die damit verbundenen Emissionen für die einzelnen Verkehrsmittel und die bei gebrochenen Verkehren notwendigen Umschläge und zum anderen den indirekten Energieaufwand und die damit verbundenen Emissionen (Herstellung, Betrieb und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur, Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsmittel) für die einzelnen Transporte zu bestimmen.

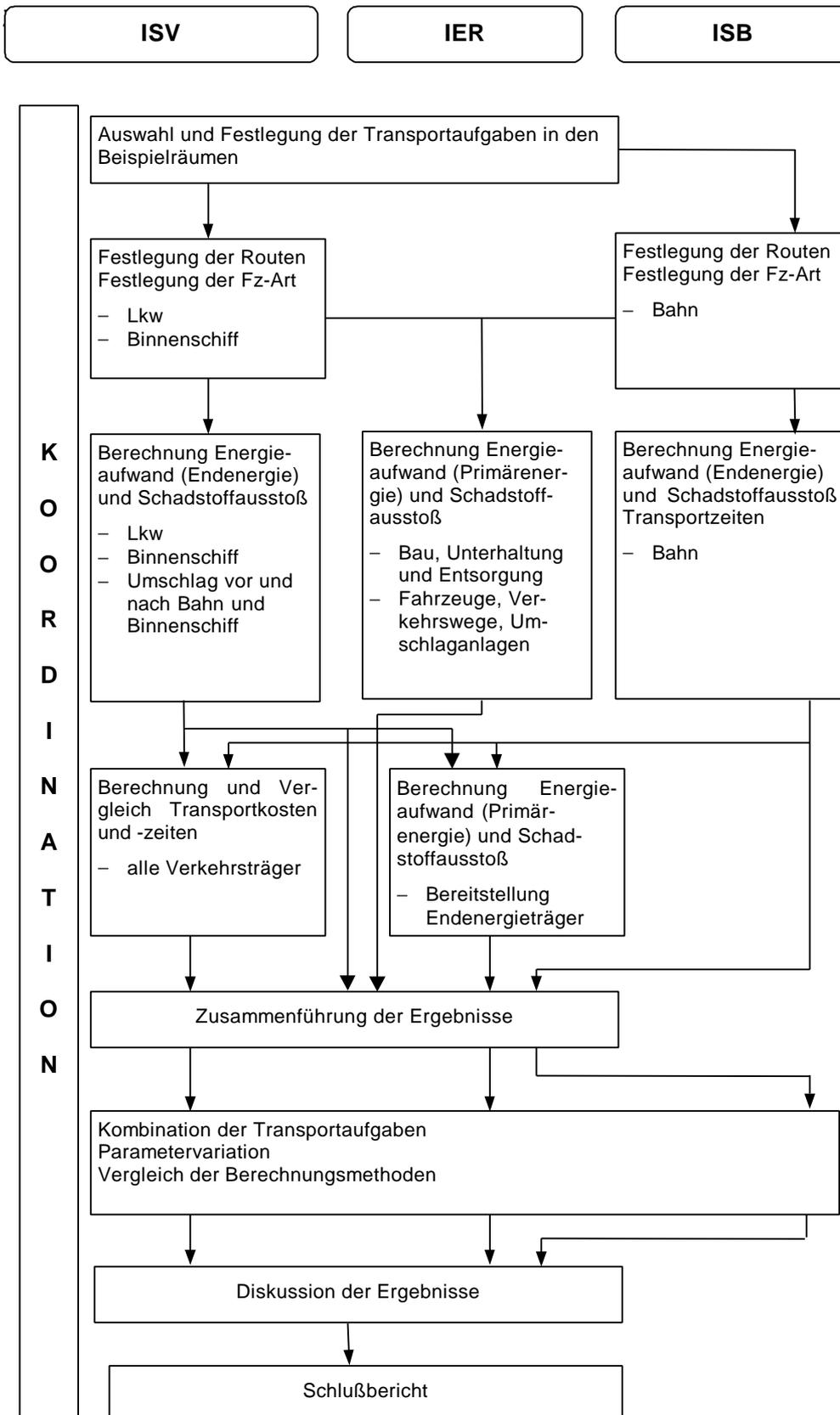


Abbildung 2-1: Methodischer Aufbau und Projektorganisation

Im Anschluß an die Berechnung des direkten antriebsbedingten Energieaufwands und der damit verbundenen Emissionen können Energieaufwand und Emissionen für die Bereitstellung der Endenergieträger bestimmt werden. Parallel hierzu erfolgt die Berechnung der notwendigen Transportzeiten und der mit den Transporten verbundenen Kosten für die einzelnen Transportaufgaben.

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Zusammenführung der Ergebnisse, um den umfassenden Vergleich der für eine Transportaufgabe möglichen Verkehrsmittel durchführen zu können.

Aufbauend auf einem ersten Vergleich dieser Ergebnisse werden diejenigen Transportaufgaben ausgewählt, die in den Bearbeitungspunkten "Kombination der Transportaufgaben", "Parametervariation" und "Vergleich der Berechnungsmethoden" untersucht werden. Im Bearbeitungspunkt "Kombination der Transportaufgaben" werden einzelne Transportaufgaben auch planungsaufgabenübergreifend kombiniert, so daß ohne nennenswerten weiteren Bearbeitungsaufwand zusätzliche Vergleiche und Analysen möglich sind. Im Rahmen der "Parametervariation" werden einzelne Randbedingungen und Einflußgrößen variiert, um deren Einfluß auf das Gesamtergebnis abschätzen zu können. Damit ist es auch möglich, sich in der nahen Zukunft abzeichnende Einflüsse zu berücksichtigen. Mit dem Bearbeitungspunkt "Vergleich der Berechnungsmethoden" werden unterschiedliche Ansätze einer vergleichenden Bewertung der Verkehrsmittel analysiert.

Nach Abschluß dieses Arbeitsschritts erfolgt die Diskussion der Ergebnisse und abschließend die Erstellung des Schlußberichts.

3 Festlegung der Planungsaufgaben, der Transportaufgaben und der Verkehrsmittel

3.1 Einführung

Wie bereits in Kapitel 2 dargelegt, baut das Forschungsvorhaben auf dem methodischen Ansatz auf, einzelne Transportaufgaben, die mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln erbracht werden können, so exakt wie möglich abzubilden. Für eine derartige Aufgabe prädestiniert wäre der Einsatz eines umfassenden Simulationsprogramms, das flächendeckend für Baden-Württemberg sowohl die Nachfrage im Güterverkehr als auch den Verkehrsablauf für alle denkbaren Verkehrsmittel (Straße, Schiene, Wasserstraße) abbilden können müßte. Da ein derart komplexes Simulationsprogramm aber weder derzeit noch in absehbarer Zukunft verfügbar ist, können zwangsläufig nur ausgewählte Beispiele betrachtet werden.

Dabei kommt der Auswahl dieser Beispiele, die bei der gegebenen Vielfältigkeit des Güterverkehrs nicht repräsentativ sein kann, eine sehr hohe Bedeutung zu, da sie zum einen die unterschiedlichen verkehrlichen Randbedingungen des Güterverkehrs in Baden-Württemberg und zum anderen die möglichen Spannweiten der vermuteten Einflußgrößen auf den Energieaufwand sowie die damit verbundenen Emissionen abdecken soll. Daher wird diese Auswahl der zu untersuchenden Transportaufgaben systematisiert, ohne daß damit ein Anspruch auf Repräsentativität oder Vollständigkeit verbunden wäre.

Im einzelnen werden drei Planungsaufgaben festgelegt, die über unterschiedliche verkehrliche und (güter-)strukturelle Randbedingungen definiert sind. Innerhalb dieser Planungsaufgaben werden unterschiedliche Beispielräume ausgewählt, die sich nochmals insbesondere hinsichtlich der verkehrlichen Randbedingungen unterscheiden.

Innerhalb der Planungsaufgaben werden nunmehr Transportaufgaben definiert, die in den verschiedenen Beispielräumen durchgeführt werden. Diese Transportaufgaben werden beschrieben über die Art und das Gewicht des Transportguts, die Quelle und das Ziel des Transports sowie den Zeitpunkt des Transports.

In Abhängigkeit von den gesetzten Randbedingungen kommen dann zur Durchführung der Transporte verschiedene Verkehrsmittel in Betracht, wobei nach der grundsätzlichen Festlegung des Verkehrsmittels das konkret zum Einsatz kommende Fahrzeug bestimmt wird.

Abbildung 3.1-1 zeigt die theoretische Vorgehensweise bei der Planung von

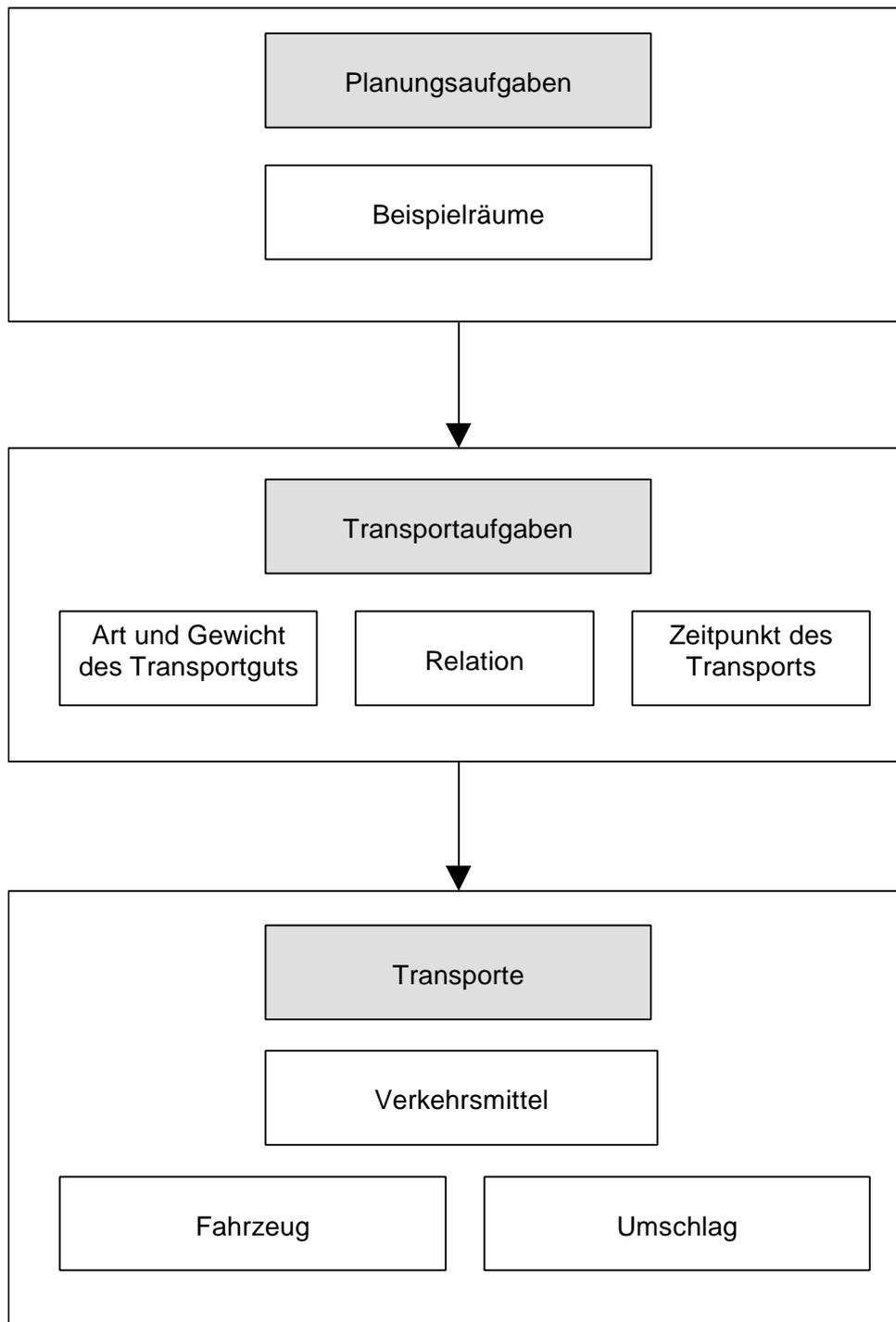


Abbildung 3.1-1: Vorgehensweise bei der Planung

3.2 Planungsaufgaben

3.2.1 Allgemeines

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, ist es nicht möglich, anhand weniger Beispiele den gesamten Güterverkehr in Baden-Württemberg abzudecken. Es werden daher die drei Planungsaufgaben

- "Güterverkehr in Ballungsgebieten",
- "Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg" und
- "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum"

definiert, die sich hinsichtlich ihrer verkehrlichen und (güter-)strukturellen Randbedingungen unterscheiden. Jede dieser Planungsaufgaben repräsentiert einen Ausschnitt des gesamten Güterverkehrs in Baden-Württemberg, der jeweils eine spezifische Problemlage repräsentiert.

3.2.2 Güterverkehr in Ballungsgebieten

In Ballungsgebieten trägt der Verkehr wesentlich zu den teilweise sehr hohen Schadstoffkonzentrationen bei. An dieser hohen verkehrsbedingten Schadstoffbelastung ist wiederum der Güterverkehr überdurchschnittlich beteiligt /Hitzler, 1995/. Dabei sind allerdings die Möglichkeiten zur Reduzierung dieser Umweltbelastungen begrenzt, da städtischer Güterverkehr überwiegend Straßengüterverkehr ist, der nur in begrenztem Umfang auf andere Verkehrsmittel verlagert werden kann. Andererseits kann auf den städtischen Güterverkehr auch nicht verzichtet werden, da er zur Aufrechterhaltung der Ver- und Entsorgung der städtischen Nutzungen unabweisbar notwendig ist. So bleibt neben technischen Maßnahmen am Fahrzeug allein die Möglichkeit, durch diverse logistische Konzepte den Güterverkehr im Ballungsraum zu verbessern. Daher werden im Rahmen der Planungsaufgabe "Güterverkehr in Ballungsgebieten" Transporte jeweils zwischen Industrie- bzw. Gewerbegebieten innerhalb eines Ballungsraums abgebildet, und zwar zum einen in der Form, wie diese heute durchgeführt werden, und zum anderen unter Einbezug neuer Logistikkonzepte, wie z. B. Güterverteiler- oder Güterverkehrszentren.

Innerhalb der Planungsaufgabe "Güterverkehr in Ballungsgebieten" werden die vier Beispielräume

- "Stuttgart",

- "Karlsruhe",
- "Oberrhein (Freiburg)" und
- "Ulm"

untersucht.

Der Beispielraum "Stuttgart" wurde ausgewählt, da er den größten Ballungsraum Baden-Württembergs mit ca. 2 Mio Einwohnern repräsentiert. Allein in Stuttgart leben 585.604 Einwohner (01.01.1996 /DST, 1996/). Daneben verfügen die Forschungsnehmer für den Beispielraum "Stuttgart" über umfangreiche Vorkenntnisse aus anderen Forschungsarbeiten, u.a. aus einer methodisch vergleichbaren Studie zum Personenverkehr /Fahl, 1994/ oder aus dem PEF-Projekt "Strategien zur Verminderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen in Ballungsgebieten" /Hitzler, 1995/, das am Beispiel des Güterverkehrs in Stuttgart durchgeführt wurde.

Mit dem Beispielraum "Karlsruhe" kann dem Beispielraum "Stuttgart" ein Ballungsraum gegenüber gestellt werden, der sich hinsichtlich der Größe der zentralen Stadt (Karlsruhe: 275.690 Einwohner, Stand: 01.01.1996 /DST, 1996/) und vor allem auch hinsichtlich der Topographie unterscheidet. Karlsruhe liegt im nahezu ebenen Gelände des Rheintals, während Stuttgart erhebliche Höhenunterschiede aufweist. Dies erlaubt es, den Einfluß der Topographie auf die Ergebnisse herauszuarbeiten.

Mit dem Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" wird ein polyzentraler Verdichtungsraum ausgewählt, der von den beiden Zentren Freiburg mit 199.273 Einwohnern (01.01.1996 /DST, 1996/) und Lörrach mit 44.617 Einwohnern (01.01.1996 /DST, 1996/) geprägt wird. Mit diesem Beispiel soll der Güteraustausch zwischen zwei benachbarten Zentren untersucht werden. Daneben kann im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" auf Vorarbeiten aus dem PEF-Projekt "Ermittlung von Ozonvorläufersubstanzen in Baden-Württemberg" /John, 1997/ zurückgegriffen werden, in dem ebenfalls schwerpunktmäßig dieser Raum untersucht wurde.

Der Beispielraum "Ulm" (Ulm: 115.721 Einwohner, Stand: 01.01.1996 /DST, 1996/) wurde ausgewählt, da hier mit dem Projekt CLOU (City-Logistik Ulm) eine der bundesweit ersten City-Logistik-Aktivitäten besteht. Für den Beispielraum "Ulm" wird daher konkret untersucht, welche Wirkungen die Abwicklung der Innenstadtbelieferung mit CLOU hat.

3.2.3 Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg

Der Transit-Güterverkehr trägt ebenfalls in erheblichem Maße zu den verkehrsbedingten Umweltbelastungen in Baden-Württemberg bei. Laut Generalverkehrsplan Baden-Württemberg /VMBW, 1995/ wird gerade im Transit-Güterverkehr bis 2010 aufgrund der zentralen Lage des Landes Baden-Württemberg in Europa mit 77 % der größte Aufkommenszuwachs erwartet. Da dieser Verkehr weder Quelle noch Ziel in Baden-Württemberg hat, erscheint er besonders prädestiniert für die Überlegung, ihn zur Entlastung des Straßennetzes auf die Verkehrsträger Bahn und - wo möglich - Binnenschiff zu verlagern. Dies entspricht auch den konzeptionellen Planungen der Landesregierung von Baden-Württemberg /VMBW, 1995/. So soll der Transit-Straßengüterverkehr nach dem Gestaltungsszenario des Generalverkehrsplans Baden-Württemberg von 763 Mio Fzkm (13 % der gesamten Lkw-Fahrleistung) nur um 15 % auf 875 Mio Fzkm (12 % der gesamten Lkw-Fahrleistung) ansteigen /IVT, 1995/.

Auf den einzelnen Relationen wird jeweils der Straßengüterverkehr mit Transporten mit der Bahn oder dem Binnenschiff verglichen. Teilweise können kombinierte Transporte Binnenschiff/ Lkw oder Binnenschiff/ Bahn untersucht werden.

Innerhalb der Planungsaufgabe "Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg" werden folgende vier Relationen untersucht:

- "Mannheim - Karlsruhe - Basel",
- "Mannheim - Stuttgart - Ulm",
- "Ulm - Ravensburg - Lindau" und
- "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen".

Die Relation "Mannheim - Karlsruhe - Basel" stellt die derzeit klassische Nord- Süd - Magistrale durch Baden-Württemberg dar. Sie verbindet das Ruhrgebiet, Nordeuropa und große Teile Osteuropas mit dem Süden der europäischen Gemeinschaft. Der Straßengüterverkehr wird über die teilweise überlastete Autobahn A 5 abgewickelt, die allerdings sukzessive im gesamten Bereich auf drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung ausgebaut wird. Die Verlagerungsmöglichkeiten auf den Güterverkehr sind begrenzt, da die Bahnstrecke insbesondere zwischen Karlsruhe und Basel am Rande ihrer Kapazität ausgelastet ist. Gleichwohl ist diese Bahnverbindung bereits heute die wichtigste Zulaufstrecke im Güterverkehr der Bahn auf die Bahn-Alpenquerung am Gotthard in der Schweiz. Entsprechend dieser hohen Verkehrsbedeutung soll diese Verbindung durchgängig auf vier Gleise ausgebaut werden /VMBW, 1995/. Ferner steht auf dieser Relation das Binnen-

schiff als weitere Alternative zur Verfügung. Bei Bedarf kann diese Relation mit Untersuchungen in den Beispielräumen "Karlsruhe" und "Oberrhein (Freiburg)" kombiniert werden.

Die Relation "Mannheim - Stuttgart - Ulm" ist die wichtigste West-Ost-Magistrale durch Baden-Württemberg. Im Straßenverkehr wird sie gebildet durch den Streckenzug A5 von Mannheim nach Karlsruhe und A8 von Karlsruhe über Stuttgart nach Ulm. Alternativ kann die Strecke A6 von Mannheim zum Autobahnkreuz Weinsberg und A81 vom Autobahnkreuz Weinsberg nach Stuttgart gefahren werden, die sich in ihrer Länge nur unwesentlich unterscheidet. Bei der Bahn stellt diese Relation ebenfalls eine Hauptverbindung von Mannheim über Bruchsal nach Kornwestheim und weiter über Stuttgart entlang des Filstals und über die Schwäbische Alb nach Ulm dar. Auf dieser Relation kann die Kapazität im Güterverkehr wesentlich erweitert werden, wenn nach der bereits erfolgten Fertigstellung der Neubaustrecke von Mannheim nach Stuttgart auch deren Weiterführung von Stuttgart nach Ulm in Betrieb ist. Als ergänzende Verkehrsmittelalternative steht auf dem Teilabschnitt Mannheim - Plochingen das Binnenschiff zur Verfügung. Dies ermöglicht den Vergleich reiner Transporte mit Lkw oder Bahn mit gebrochenen Verkehren unter Einbezug des Binnenschiffs mit Umschlag in Plochingen. Im Gegensatz zur Relation "Mannheim - Karlsruhe - Basel" führt die Relation "Mannheim - Stuttgart - Ulm" durch topographisch bewegtes Gelände. Dadurch sind weitere Quervergleiche zur Evaluation des Einflusses der Topographie möglich. Die Relation "Mannheim - Stuttgart - Ulm" erlaubt Verknüpfungen mit den Untersuchungen in den Beispielräumen "Stuttgart" und "Ulm".

Die Relationen "Ulm - Ravensburg - Lindau" und "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen" stellen beide Nord-Süd-Verbindungen dar, die derzeit noch eine geringere Verkehrsbedeutung im Transit-Güterverkehr haben. Gleichwohl bilden sie sowohl auf der Straße als auch auf der Schiene wichtige Verbindungen von Baden-Württemberg nach Österreich (nur "Ulm - Ravensburg - Lindau"), die Schweiz und von dort weiter nach Italien. Diese Relationen werden im Schienengüterverkehr an Bedeutung gewinnen, wenn in der Schweiz die NEAT-Projekte (Neue Alpen-Transversalen) mit jeweils dem Neubau eines Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg abgeschlossen sind. Nach den derzeitigen Planungen zu diesem Projekt stellen diese beiden Relationen in Ergänzung der Rheinschiene "Mannheim - Karlsruhe - Basel" wichtige Zulaufstrecken aus dem Norden zu diesen Alpenquerungen dar /VMBW, 1995/. So sind auch für beide Strecken künftige Ausbaumaßnahmen vorgesehen /VMBW, 1995/. Beide Relationen führen durch topographisch bewegtes Gelände. Besonders interessant ist die Tatsache, daß die Relation "Ulm - Ravensburg - Lindau" nicht elektrifiziert ist, während die Relation "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen" elektrifiziert ist. Im Straßenverkehr stehen auf beiden Relationen durchgängige Autobahnverbindungen zur Verfügung. Transporte mit dem Binnenschiff sind nicht möglich.

3.2.4 Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum

Die Struktur des Bundeslandes Baden-Württemberg wird auch durch zahlreiche ländliche Räume geprägt. Daher werden auch zwei Beispierräume ausgewählt, mit denen der Güterverkehr in diesen Räumen abgebildet werden soll. In diesen Beispierräumen, die jeweils eine Kernstadt und zwei Städte aus deren weiterem Umfeld umfassen, werden Transporte zwischen diesen drei Städten untersucht, wobei unterschiedliche Logistikkonzepte zur Anwendung kommen, in die auch die Bahn einbezogen wird. Dabei wird der heute überwiegend übliche Transport mit dem Lkw verglichen mit Transporten, die über ein zentrales Güterverteilzentrum abgewickelt werden.

Innerhalb der Planungsaufgabe "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" werden die beiden Beispierräume

- "Oberschwaben (Ravensburg)" und
- "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)"

untersucht.

Für beide Beispierräume liegen konzeptionelle Überlegungen für regionale Güterverkehrszentren vor. Dies war ausschlaggebend für die Wahl dieser beiden Beispierräume. Ferner können der Beispierraum "Oberschwaben (Ravensburg)" mit der Transitrelation "Ulm - Ravensburg - Lindau" und der Beispierraum "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)" mit der Transitrelation "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen" verknüpft werden, so daß auch Vergleiche über die Transportaufgaben hinweg möglich sind.

3.3 Transportaufgaben

3.3.1 Allgemeines

Da auch in den einzelnen Beispierräumen nicht das gesamte Güterverkehrsgeschehen abgebildet werden kann, müssen ausgewählte Transportaufgaben definiert werden, die geeignet sind, belastbare Aussagen zum Güterverkehrsgeschehen und insbesondere zur Umweltverträglichkeit der einzelnen Verkehrsmittel zu treffen. Dabei ist es angesichts der Vielfalt des Güterverkehrsgeschehens nicht möglich, charakteristische oder prototypische Fälle anzugeben. Vielmehr muß bei der Festlegung der Transportaufgaben versucht werden, markante Eckpfeiler abzubilden, die unterschiedliche Ausprägungen des Güterverkehrs abdecken. Dabei ist zu beachten, daß aufgrund

der Sendungsstrukturen die einzelnen Gütertransporte in Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen in unterschiedlichem Maße für die einzelnen Verkehrsmittel geeignet sind. Auch dieser Aspekt spielt eine wesentliche Rolle bei der Festlegung der Transportaufgaben.

Im einzelnen werden die Transportaufgaben über folgende Eigenschaften definiert:

- Art und Gewicht des Transportguts,
- Relation und
- Zeitpunkt des Transports.

3.3.2 Art und Gewicht des Transportguts

Das Spektrum der im Güterverkehr untersuchten Güter reicht von einer einzelnen Briefsendung, die nur einmal von einer bestimmten Quelle zu einem bestimmten Ziel transportiert wird, bis hin zu kontinuierlichen Stoffströmen, z.B. im Pipeline-Transport von Mineralöl. Die Güter unterscheiden sich demnach

- in ihrer stofflichen Ausformung,
- in ihrem Gewicht,
- in der Art ihrer Verpackung und
- in der Häufigkeit ihres Auftretens.

Entsprechend ist auch der Güterverkehr organisiert. Paketdienste kümmern sich um den Transport kleiner und leichter Sendungen mit einem ständig wechselnden Sendungsaufkommen. Speditionen transportieren im Liniendienst oder auch in Abhängigkeit der tatsächlichen Nachfrage größere und schwerere Güter, die teilweise zusammen geladen werden können, teilweise aber auch ein Transportgefäß für sich alleine beanspruchen. Von sogenannten Massengütern spricht man, wenn große Stoffmengen in mehr oder weniger kontinuierlichen Materialflüssen transportiert werden, wobei keine gesonderte Transportverpackung zum Transport in den Transportgefäßen notwendig ist.

Als spezielle Ladungsform im Güterverkehr tritt ferner die Leerfahrt auf, bei der kein Gut transportiert wird, die aber zur Bereitstellung der Transportgefäße notwendig ist.

Je nach Art und Gewicht des Transportguts sind auch bei einem evtl. Umladen unterschiedliche Behandlungsformen notwendig. Leichte Güter können von Hand, teilweise mit Unterstützung automatischer Anlagen umgeladen und sortiert werden. Größere und schwerere Güter benötigen Hilfsmittel (z.B. Gabelstapler), Massengüter entsprechend ihrer Beschaffenheit Pump- oder Kranlagen.

Um der Vielzahl der unterschiedlichen Güterarten gerecht zu werden, werden insgesamt vier Transportgüter festgelegt, die in der Untersuchung berücksichtigt werden sollen. Im einzelnen handelt es sich um folgende Transportgüter:

- "leichtes Stückgut",
- "schweres Stückgut",
- "Wagenladung" und
- "Massengut".

Das Transportgut "leichtes Stückgut" repräsentiert ein Paket mit einem Gewicht von 5 kg. Es stellt damit ein Transportgut dar, das zunächst über Sammelverkehre in einem Vorlauf eingesammelt werden muß, dann über seinen Hauptlauf gebündelt mit anderen in Größe und Gewicht vergleichbaren Gütern transportiert wird, um dann schließlich in einem Nachlauf an sein eigentliches Ziel gebracht zu werden. Aufgrund seines Gewichts kann dieses Transportgut von Hand, gfs. mit Unterstützung einer automatischen Verteil- und Sortieranlage umgeladen werden. Eine Leerfahrt tritt, zumindest im Hauptlauf, nicht auf, da die Transportverpackung nicht zum Empfänger zurückgebracht werden muß und aufgrund der Vielfältigkeit der Transportrelationen bei dieser Gütergruppe die Logistik bei allen Verkehrsträgern derart optimiert ist, daß die Transportgefäße in beiden Richtungen beladen verkehren. Gewisse Leerfahrtenanteile werden sich allerdings bei den notwendigen Vor- und Nachläufen nicht vermeiden lassen.

Als "schweres Stückgut" wird eine mit 500 kg beladene Euro-Palette bezeichnet, die mit einem dem Paketdienst vergleichbaren Sammel- und Verteilservice (Vor- und Nachlauf) bei einem dazwischengeschalteten Hauptlauf transportiert wird. Zum Umladen dieses Transportguts ist ein Gabelstapler notwendig. Auch hier ist es nicht notwendig, das Transportgefäß (Euro-Palette) in einer Leerfahrt zurück zu transportieren, da über einen gemeinsamen Pool ein flexibler Einsatz der Euro-Paletten möglich ist. Allerdings werden bei den Sammel- und Verteilverkehren wiederum gewisse Leerfahrtenanteile nicht zu vermeiden sein.

Entsprechend der gängigen Praxis wurden die Transporte für das "leichte Stückgut" und das "schwere Stückgut" gemeinsam mit den jeweils gleichen Randbedingungen durchgeführt. Dies

führt dazu, daß sich aufgrund der gewählten Berechnungsmethoden (vgl. Kap. 5 und 6) identische Ergebnisse für diese beiden Transportgüter ergeben. Daher wird im weiteren auf eine separate Diskussion des Transportguts "schweres Stückgut" verzichtet, auch wenn die Basisberechnungen für dieses Transportgut vollständig durchgeführt wurden.

Das Transportgut "leichtes Stückgut" wird in allen Planungsaufgaben untersucht.

Mit dem Transportgut "Wagenladung" werden Güter abgebildet, die aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts in einem Transportgefäß vom Versender zum Empfänger transportiert werden. Treten dabei gebrochene Verkehre auf, die ein Umladen erforderlich machen, so wird nicht das Gut an sich umgeladen, sondern das Transportgefäß wird insgesamt umgeladen (z.B. Container, Wechselbrücke) oder umgestellt (Rangiervorgang im Einzelwagenverkehr der Bahn). Da derartige Güter sehr unterschiedliche Gewichte haben können, werden für das Transportgut "Wagenladung" die zwei Gewichtsklassen 15 t und 25 t untersucht. Die Auswahl dieser Gewichtsklassen orientiert sich an markanten Auslastungen eines Lastzugs mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t. Für einen derartigen Lastzug beträgt die maximale Zuladung 25 t. Im Bundesdurchschnitt sind derartige Lkw aber nur zu 60 % ausgelastet, was einer Zuladung von 15 t entspricht. Mit dem "Transportgut" Wagenladung ist keine stoffliche Vorstellung verbunden. Es kann dies eine einzelne schwere Maschine sein, aber auch eine Sendung, die aus mehreren Kisten und Euro-Paletten besteht. Wichtig ist, daß diese Sendung ohne Umladen in einem Transportgefäß vom Versender zum Empfänger transportiert wird. Da es bei dieser Transportform durchaus üblich ist, daß die Transportgefäße leer zu ihrem Ausgangspunkt einer Fahrt zurückkehren wird zusätzlich zu den beiden beschriebenen Gewichtsklassen auch eine Leerfahrt (Transportgewicht 0t) berücksichtigt.

Das Transportgut "Wagenladung" wird nur in den Planungsaufgaben "Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg" und "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" untersucht.

Mit dem Transportgut "Massengut" sollen Güter abgebildet werden, die in großen Mengen quasi kontinuierlich von einer bestimmten Quelle zu einem bestimmten Ziel transportiert werden. Typische Massengüter sind Rohöl und Mineralölprodukte, Kohle oder Mineralstoffe. In der vorliegenden Untersuchung wird der Transport von Kies untersucht, da dieses Transportgut als Baumaterial von seinen Gewinnungsstätten in großen Mengen überall hin transportiert werden muß. Damit ist auch eine Abgrenzung zu der Studie /Steierwald, 1993/ möglich, in der als Massengut der Transport von Mineralölprodukten untersucht wurde. Da Massengüter in großen Mengen transportiert werden müssen und ihr Transport, zumindest über längere Distanzen, nicht zeitkritisch ist, kann davon ausgegangen werden, daß die Transportgefäße immer voll ausgelastet sind. Die Festlegung der zu transportierenden Menge orientiert sich daher an der üblichen Zuladung

eines vollbeladenen Lastzugs. Dies entspricht einem Transportgewicht von 15 t. Da Massengüter ohne spezielle Transportverpackungen versendet werden, können die Transportgefäße in aller Regel auf dem Rückweg keine anderen Güter transportieren. Daher wird zusätzlich zum Transportgewicht von 15 t eine zurückführende Leerfahrt mit einem Ladungsgewicht von 0 t untersucht. Aufgrund der eindeutigen Transportrichtung bei Massengütern (von der Raffinerie zum Verbraucher, von der Kiesgrube zur Baustelle) werden daher der Transport mit dem Transportgewicht von 15 t nur in der Lastrichtung und die Leerfahrt nur in der Gegenrichtung berechnet.

Das Transportgut "Massengut" wird in allen Planungsaufgaben untersucht.

3.3.3 Relationen

Im Rahmen der Transportaufgaben sind ferner die zu untersuchenden Relationen, die durch die Festlegung der Start- und Zielpunkte definiert werden, von wesentlicher Bedeutung für die Aussagekraft der Ergebnisse.

Wesentliches Kriterium für die Festlegung der Start- und Zielorte in den verschiedenen Planungsaufgaben ist die Verfügbarkeit der Verkehrsmittel. So sollte der Transport auf den Relationen möglichst mit allen in die Untersuchung einbezogenen Verkehrsmitteln möglich sein. Da dies für den Lkw immer und mit dem Binnenschiff a priori nur auf den entsprechend ausgewählten Beziehungen zu erfüllen ist, stellt die Verfügbarkeit von Gleisanschlüssen für den Bahntransport das entscheidende Kriterium für die Auswahl der Start- und Zielorte dar. So soll der Bahntransport nicht nur im Hauptlauf, sondern auch bei den gfs. notwendigen Vor- und Nachläufen zu einem Güterverkehrszentrum oder einer Umschlaganlage möglich sein.

Die konkrete Festlegung der Start- und Zielorte für die Planungsaufgaben "Güterverkehr in Ballungsgebieten" und "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" orientiert sich zunächst an den bestehenden örtlichen Planungen für ein Güterverkehrszentrum. Existieren derartige Planungen nicht, werden bestehende Standorte eines Containerterminals, eines großen Güterbahnhofs oder eines Hafens als fiktiver Standort eines Güterverkehrszentrums angenommen. Die adressenscharfe Auswahl des eigentlichen Start- und Zielorts erfolgt nun unter Beachtung des ausgewählten Standorts für diesen Güterumschlag. Dabei sollen für jede Planungsaufgabe ein kürzerer und ein längerer Vor- bzw. Nachlauf möglich sein, um den entsprechend unterschiedlichen Einfluß des Vor- und Nachlaufs auf das Gesamtergebnis untersuchen zu können. Die Start- und Zielpunkte sollen nicht zu dicht beieinander liegen, damit die Nutzung der Güterverkehrszentren nicht offensichtlich unrealistisch ist. Vor- bzw. Nachläufe entgegen der Hauptrichtung des Transports sind dagegen zulässig.

Für die Planungsaufgabe "Güterverkehr in Ballungsgebieten" werden jeweils zwei Güterverkehrszentren festgelegt, denen jeweils ein Start- / Zielort zugeordnet ist.

Bei der Planungsaufgabe "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" wird jeweils nur ein Güterverkehrszentrum in der Kernstadt des jeweiligen Beispielraums angenommen. Dagegen werden drei Start- / Zielorte ausgewählt, von denen einer in der Kernstadt und zwei in der diese umgebenden Region liegen. Tabelle 3.3-1 nennt für die Planungsaufgaben "Güterverkehr in Ballungsgebieten" und "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" die Standorte der ausgewählten Güterverkehrszentren und die jeweils zugeordneten Start- bzw. Zielorte.

Tabelle 3.3-1: Güterverkehrszentren und Start- bzw. Zielorte für die Planungsaufgaben "Güterverkehr in Ballungsgebieten" und "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum"

Beispielraum	Güterverkehrszentrum	Start- / Zielort
Stuttgart	Hafen	Esslingen-Mettingen
	Stuttgart-Vaihingen	LE-Oberaichen
Karlsruhe	Umschlagbahnhof	Ettlingen-West
	Hafen	Wörth am Rhein
Oberrhein (Freiburg)	Weil am Rhein	Lörrach
	Freiburg, Güterbahnhof	Staufen im Breisgau
Oberschwaben (Ravensburg)	Ravensburg	Ravensburg
		Pfullendorf
		Meckenbeuren
Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)	VS-Villingen	VS-Schwenningen
		Donaueschingen
		St. Georgen

LE: Leinfelden-Echterdingen / VS: Villingen-Schwenningen

Für die beiden Planungsaufgaben "Güterverkehr in Ballungsgebieten" und "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" werden nun die Transporte für die Transportgüter "Leichtes Stückgut" und "Wagenladung" (nur Planungsaufgabe "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum") zwischen den jeweiligen Start- und Zielorten innerhalb einer Planungsaufgabe durchgeführt. Das Transportgut "Massengut" wird demgegenüber in aller Regel nicht dispers im Raum verteilt, sondern in einer eindeutigen Lastrichtung transportiert. Daher erfolgen hier innerhalb der einzelnen Planungsaufgaben nur Transporte vom Güterverkehrszentrum zu den einzelnen Zielorten. Für die Planungsaufgabe "Güterverkehr in Ballungsgebieten" erfolgen diese Transporte nur vom jeweils bedeutenderen Güterverkehrszentrum zum von diesem entfernter gelegenen Zielort.

Die Berechnungen für den Beispielraum "Ulm" erfolgen abweichend von der beschriebenen Vorgehensweise, da dort zwei unterschiedliche Logistik-Konzepte in der Feinverteilung von Stückgütern untersucht werden. Dabei bildet das reale Güteraufkommen eines Tages die Bezugsbasis für die Berechnungen.

Für die Planungsaufgabe "Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg" müssen aus methodischen Gründen ebenfalls Start- und Zielorte festgelegt werden, auch wenn es sich entsprechend der Definition dieser Planungsaufgabe um reinen Durchgangsverkehr durch Baden-Württemberg handelt. Hier dienen entsprechende Umschlaganlagen (Containerhafen oder Containerterminals der DB) in den Anfangs- und Endorten der Relationen direkt als Start- und Zielorte. Zusätzlich wird der Hafen in Plochingen auf der Relation "Mannheim - Stuttgart - Ulm" als Umschlagestelle im kombinierten Verkehr Binnenschiff - Lkw oder Binnenschiff - Bahn eingeführt.

3.3.4 Zeitpunkt des Transports

Um den Anspruch der Untersuchung einzulösen, eine möglichst realistische Abbildung des Verkehrsgeschehens vorzunehmen, ist es notwendig, den Zeitpunkt der Durchführung des Transports festzulegen. Dadurch ist es möglich, den jeweiligen Transportablauf bei den einzelnen Verkehrsmitteln sowie die jeweiligen Verkehrsverhältnisse im Straßenverkehr abzubilden.

Es wird festgelegt, daß die Güter jeweils an einem Donnerstag um 10.00 Uhr beim Empfänger ankommen sollen.

3.4 Verkehrsmittel

Für die über einzelnen Transportaufgaben stehen nun die Verkehrsmittel Lkw, Bahn und Binnenschiff zur Verfügung. Bei der Bahn wird zusätzlich unterschieden in den heute üblichen, „konventionellen“ Transport, den Transport mit Hilfe eines Containers sowie die beiden fiktiven Formen, die sich in unterschiedlichen Phasen der praktischen Erprobung befinden, den automatischen Einzelwagen und den Trailerzug.

Prinzipiell könnten alle Verkehrsmittel für den Transport aller Güter eingesetzt werden. Allerdings ergeben sich aufgrund der Eigenschaften der einzelnen Transportgüter und der einzelnen Verkehrsmittel Randbedingungen, die nicht alle Kombinationen aller Verkehrsmittel mit allen zu befördernden Gütern sinnvoll erscheinen lassen. Unrealistische und unsinnige Kombinationen (z.B. leichtes Stückgut mit dem Binnenschiff), werden in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt.

Folgende Verkehrsmittel werden für die einzelnen Transportaufgaben eingesetzt:

Güterverkehr in Ballungsgebieten:

- | | |
|--------------------------------|---|
| leichtes Stückgut (Paket 5 kg) | <ul style="list-style-type: none">- Konventioneller Lkw-Transport- Lkw-Transport über GVZ (Vor-, Haupt- und Nachlauf mit dem Lkw)- Konventioneller Bahntransport über GVZ (Vor-Nachlauf mit dem Lkw, Hauptlauf mit der Bahn)- Automatischer Einzelwagen über GVZ (Vor-Nachlauf mit dem Lkw, Hauptlauf mit dem automatischen Einzelwagen) |
| Massengut (0t und 15t) | <ul style="list-style-type: none">- Konventioneller Lkw-Transport- Konventioneller Bahntransport- Kombiniertes Transport Bahn und Lkw mit dem Abrollcontainer |

Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg:

- | | |
|--------------------------------|--|
| leichtes Stückgut (Paket 5 kg) | <ul style="list-style-type: none">- Konventioneller Lkw-Transport- Konventioneller Bahntransport |
| Wagenladung (0t, 15t und 25t) | <ul style="list-style-type: none">- Konventioneller Lkw-Transport- Konventioneller Bahntransport- Bahntransport mit Container- Bahntransport mit Trailerzug- Binnenschiff (Mannheim-Weil am Rhein)- Kombiniertes Transport Binnenschiff (Mannheim-Plochingen) und Bahn- Kombiniertes Transport Binnenschiff (Mannheim-Plochingen) und Lkw |
| Massengut (0t und 15t) | <ul style="list-style-type: none">- Konventioneller Lkw-Transport- Konventioneller Bahntransport |

- Bahntransport mit Abrollcontainer
- Binnenschiff (Mannheim-Weil am Rhein)
- Kombiniertes Transport
Binnenschiff (Mannheim-Plochingen) und Bahn
- Kombiniertes Transport
Binnenschiff (Mannheim-Plochingen) und Lkw

Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum:

- | | |
|--------------------------------|---|
| leichtes Stückgut (Paket 5 kg) | <ul style="list-style-type: none">- Lkw-Transport über GVZ- Konventioneller Bahntransport (Vorlauf mit dem Lkw vom Startpunkt zum nächstgelegenen Bahnhof und Nachlauf mit dem Lkw vom ziernächsten Bahnhof zum Zielpunkt) |
| Wagenladung (0t, 15t und 25t) | <ul style="list-style-type: none">- Konventioneller Lkw-Transport- Konventioneller Bahntransport über das GVZ Villingen-Schwenningen Villingen bzw. GVZ Ravensburg |
| Massengut (0t und 15t) | <ul style="list-style-type: none">- Konventioneller Lkw-Transport- Konventioneller Bahntransport |

4 Konkrete Transportaufgaben

4.1 Allgemeines

Aufbauend auf den in Kapitel 3 beschriebenen Festlegungen können nun die konkreten Transportaufgaben in den einzelnen Beispielflächen der Planungsaufgaben beschrieben werden.

4.2 Güterverkehr in Ballungsgebieten

Beispielfläche "Stuttgart"

Im Beispielfläche "Stuttgart" liegt das Güterverkehrszentrum 1 am östlichen Rand der Stadt im Hafen Stuttgart-Obertürkheim. Das Güterverkehrszentrum 2 ist am südwestlichen Stadtrand am Bahnhof in Stuttgart-Vaihingen gelegen.

Das Güterverkehrszentrum 1 "Hafen" (heutiger Umschlagbahnhof der DB) liegt mit Gleisanschluß am Hafenbecken 2 östlich der Bundesstraße 10 und ist direkt mit dieser verbunden. Es verfügt über einen kurzen Vorlauf bzw. Nachlauf zum Start-/Zielpunkt 1 in Esslingen-Mettingen, welcher sich am südlichen Ende der Hafenbahnstraße (Kreuzung Hafenbahnstraße und Hafenbahn) am Zugang zum Werk der DaimlerChrysler AG befindet. Ein Gleisanschluß ist vorhanden. Das Güterverkehrszentrum "Hafen" dient auch als Startpunkt für den Massenguttransport nach LE-Oberaichen.

Das Güterverkehrszentrum 2 für den Beispielfläche "Stuttgart" liegt ca. 500 m südlich des Bahnhofs Vaihingen und ist über einen langen Vor- bzw. Nachlauf mit dem Start-/Zielpunkt 2 in LE-Oberaichen verbunden. Dieser ist in ca. 200 m Abstand zu einem Gleisanschluß an der Kreuzung Raiffeisenstraße / Im Spitzhau gelegen.

Für den Beispielfläche "Stuttgart" werden die in Tabelle 4.2-1 aufgeführten Transporte untersucht.

Tabelle 4.2-1: Transportaufgaben im Beispielraum "Stuttgart"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
Planungsaufgabe "Güterverkehr im Ballungsgebiet", Beispielraum "Stuttgart"	leichtes Stückgut (5 kg)	Esslingen-Mettingen nach LE-Oberaichen <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Esslingen-Mettingen nach LE-Oberaichen (Verteilfahrt Spedition) - Per Lkw von Esslingen-Mettingen nach GVZ 1 "Hafen" Per Lkw von GVZ 1 "Hafen" nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Lkw von GVZ 2 "Vaihingen" nach LE-Oberaichen (fiktiv) - Per Lkw von Esslingen-Mettingen nach GVZ 1 "Hafen" Per Bahn (konventionell) von GVZ 1 "Hafen" nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Lkw von GVZ 2 "Vaihingen" nach LE-Oberaichen (fiktiv) - Per Lkw von Esslingen-Mettingen nach GVZ 1 "Hafen" Per Bahn (autom. Einzelwagen) von GVZ 1 "Hafen" nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Lkw von GVZ 2 "Vaihingen" nach LE-Oberaichen (fiktiv) LE-Oberaichen nach Esslingen-Mettingen <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von LE-Oberaichen nach Esslingen-Mettingen (Verteilerfahrt Spedition) - Per Lkw von LE-Oberaichen nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Lkw von GVZ 2 "Vaihingen" nach GVZ 1 "Hafen" Per Lkw von GVZ 1 "Hafen" nach Esslingen-Mettingen (fiktiv) - Per Lkw von LE-Oberaichen nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Bahn (konventionell) von GVZ 2 "Vaihingen" nach GVZ 1 "Hafen" Per Lkw von GVZ 1 "Hafen" nach Esslingen-Mettingen (fiktiv) - Per Lkw von LE-Oberaichen nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Bahn (autom. Einzelwagen) von GVZ 2 "Vaihingen" nach GVZ 1 "Hafen" Per Lkw von GVZ 1 "Hafen" nach Esslingen-Mettingen (fiktiv) - Per Lkw von LE-Oberaichen nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Bahn (autom. Einzelwagen) von GVZ 2 "Vaihingen" nach GVZ 1 "Hafen" Per Lkw von GVZ 1 "Hafen" nach Esslingen-Mettingen (fiktiv)

	Massengut 0 t und 15 t	GVZ 1 "Hafen" nach LE-Oberaichen - Per Lkw von GVZ 1 "Hafen" nach LE-Oberaichen - Per Bahn (konventionell) von GVZ 1 "Hafen" nach LE-Oberaichen - Per Bahn (Abrollcontainer) von GVZ 1 "Hafen" nach GVZ 2 "Vaihingen" Per Lkw (Abrollcontainer) von GVZ 2 "Vaihingen" nach LE-Oberaichen (fiktiv)
--	------------------------	--

Beispielraum "Karlsruhe"

Das Güterverkehrszentrum 1 im Ballungsgebiet Karlsruhe liegt am heutigen Umschlagbahnhof an der Wolfartsweierer Straße im Südosten der Stadt. Ihm zugeordnet befindet sich der Start-/ Zielpunkt 1 in Ettlingen-West an der Kreuzung Otto-Hahn-Straße / Hertzstraße südlich von Karlsruhe. Westlich des Stadtkerns liegt am östlichen Ende des Beckens 2 des Karlsruher Hafens an der Werftstraße das Güterverkehrszentrum 2. Nordwestlich davon befindet sich der Start-/Zielpunkt 2 in Wörth am Rhein an der Einmündung Eisenbahnstraße / Maximilianstraße. Das GVZ 2 ist gleichzeitig Ausgangspunkt für den Massenguttransport nach Ettlingen-West. Die Relation Ettlingen-West nach Hafen Karlsruhe wird beim Massengut als Leerfahrt abgebildet. Alle Güterverkehrszentren und Start-/Zielpunkte verfügen über einen Gleisanschluß. Wie bereits im Ballungsgebiet Stuttgart ist auch hier der Speditions-Transport des leichten Stückguts als Sammel- und Verteilfahrten durch eine Spedition (Vetter in Ettlingen südlich von Karlsruhe) dargestellt. Für diesen Transport gelten dieselben Randbedingungen wie im Ballungsgebiet Stuttgart.

In Tabelle 4.2-2 sind die für den Beispielraum "Karlsruhe" vorgesehenen Transportaufgaben aufgeführt.

Tabelle 4.2-2: Transportaufgaben im Beispielraum "Karlsruhe"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
Planungsaufgabe "Güterverkehr im Ballungsgebiet", Beispielraum "Karlsruhe"	leichtes Stückgut (5 kg)	Ettlingen-West nach Wörth am Rhein - Per Lkw von Ettlingen-West nach Wörth am Rhein (Verteilerfahrt Spedition) - Per Lkw von Ettlingen-West nach GVZ 1 "Umschlagbahn- hof" Per Lkw von Karlsruhe-Mitte nach GVZ 2 "Hafen" Per Lkw von GVZ 2 "Hafen" nach Wörth am Rhein (fiktiv) - Per Lkw von Ettlingen-West nach GVZ 1 "Umschlagbahn- hof" Per Bahn (konventionell) von GVZ 1 "Umschlagbahnhof" nach GVZ 2 "Hafen" Per Lkw von GVZ 2 "Hafen" nach Wörth am Rhein (fiktiv) - Per Lkw von Ettlingen-West nach GVZ 1 "Umschlagbahn- hof" Per Bahn (autom. Einzelwagen) von GVZ 1 "Umschlagbahn- hof" nach GVZ 2 "Hafen" Per Lkw von GVZ 2 "Hafen" nach Wörth am Rhein (fiktiv) Wörth am Rhein nach Ettlingen-West - Per Lkw von Wörth am Rhein nach Ettlingen-West (Verteilerfahrt Spedition) - Per Lkw von Wörth am Rhein nach GVZ 2 "Hafen" Per Lkw von GVZ 2 "Hafen" nach GVZ 1 "Umschlagbahn- hof" Per Lkw von GVZ 1 "Umschlagbahnhof" nach Ettlingen- West (fiktiv) - Per Lkw von Wörth am Rhein nach GVZ 2 "Hafen" Per Bahn (konventionell) von GVZ 2 "Hafen" nach GVZ 1 "Umschlagbahnhof" Per Lkw von GVZ 1 "Umschlagbahnhof" nach Ettlingen- West (fiktiv) - Per Lkw von Wörth am Rhein nach GVZ 2 "Hafen" Per Bahn (autom. Einzelwagen) von GVZ 2 "Hafen" nach GVZ 1 "Umschlagbahnhof" Per Lkw von GVZ 1 "Umschlagbahnhof" nach Ettlingen- West (fiktiv)

	Massengut 0 t und 15 t	GVZ 2 "Hafen" nach Ettlingen-West - Per Lkw von GVZ 2 "Hafen" nach Ettlingen-West - Per Bahn (konventionell) von GVZ 2 "Hafen" nach Ettlingen-West - Per Bahn (Abrollcontainer) von GVZ 2 "Hafen" nach GVZ 1 "Umschlagbahnhof" Per Lkw (Abrollcontainer) von GVZ 1 "Umschlagbahnhof" nach Ettlingen-West (fiktiv)
--	------------------------	--

Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)"

Das erste Güterverkehrszentrum im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" ist das geplante Güterverkehrszentrum in Weil am Rhein, ca. 1 km nördlich des Bahnhofs in der Gleisschleife Weil am Rhein. Es ist gleichzeitig Startpunkt für den Massenguttransport nach Staufen im Breisgau (Start-/Zielpunkt 2). Die Leerfahrt wird in der Gegenrichtung von Staufen im Breisgau nach Weil am Rhein berechnet. Als zweites Güterverkehrszentrum dient der Freiburger Güterbahnhof am Südwestende der Siemensstraße, an dem sich ein Containerterminal befindet. Als Start-/ Zielpunkt 1 mit kurzem Vorlauf zum Güterverkehrszentrum in Weil am Rhein dient das Gewerbegebiet in Lörrach, ca. 1 km westlich des Hauptbahnhofs Lörrach am Bahnübergang der Ötlinger Straße. Ein Gleisanschluß ist vorhanden. Als Start-/Zielpunkt 2 mit langem Vorlauf zum Güterverkehrszentrum in Freiburg dient das Gewerbegebiet in Staufen im Breisgau, welches am nördlichen Stadtrand liegt (Kreuzung Gewerbestraße / Im Gaisgraben). Ein Gleisanschluß ist hier nicht vorhanden, das Gewerbegebiet liegt aber in ca. 500 m Abstand zur Bahnlinie in ebenem Gelände, so daß fiktiv ein Bahnanschluß angenommen werden kann. Bei der für den Transport des leichten Stückguts eingesetzte Spedition handelt es sich um die Spedition Streck in Freiburg. Ansonsten gelten für den Speditions-Transport des leichten Stückguts die schon in den Ballungsgebieten Stuttgart und Karlsruhe erwähnten Randbedingungen.

In Tabelle 4.2-3 sind die einzelnen Transportaufgaben aufgeführt.

Tabelle 4.2-3: Transportaufgaben im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
<p>Planungsaufgabe "Güterverkehr im Ballungsgebiet", Beispielraum "Oberrhein (Frei- burg)"</p>	<p>leichtes Stückgut (5 kg)</p>	<p>Lörrach nach Staufen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Lörrach nach Staufen (Verteilfahrt Spedition) - Per Lkw von Lörrach nach GVZ 1 "Weil am Rhein" Per Lkw von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" Per Lkw von GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" nach Staufen (fiktiv) - Per Lkw von Lörrach nach GVZ 1 "Weil am Rhein" Per Bahn (konventionell) von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" Per Lkw von GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" nach Staufen (fiktiv) - Per Lkw von Lörrach nach GVZ 1 "Weil am Rhein" Per Bahn (automatischer Einzelwagen) von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" Per Lkw von GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" nach Staufen (fiktiv) <p>Staufen nach Lörrach</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Staufen nach Lörrach (Verteilfahrt Spedition) - Per Lkw von Staufen nach GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" Per Lkw von GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" nach GVZ 1 "Weil am Rhein" Per Lkw von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach Lörrach (fiktiv) - Per Lkw von Staufen nach GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" Per Bahn (konventionell) von GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" nach GVZ 1 "Weil am Rhein" Nach GVZ 1 "Weil am Rhein" Per Lkw von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach Lörrach (fiktiv) - Per Lkw von Staufen nach GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" Per Bahn (autom. Einzelwagen) von GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" nach GVZ 1 "Weil am Rhein" Per Lkw von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach Lörrach (fiktiv)

	Massengut 0 t und 15 t	GVZ 1 "Weil am Rhein" nach Staufen - Per Lkw von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach Staufen - Per Bahn von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach Staufen - Per Bahn (Abrollcontainer) von GVZ 1 "Weil am Rhein" nach GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" Per Lkw (Abrollcontainer) von GVZ 2 "Freiburg Güterbahnhof" nach Staufen (fiktiv)
--	------------------------	--

Beispielraum "Ulm"

Der Beispielraum "Ulm" dient als Beispiel für den Einsatz von unterschiedlichen Logistik-Konzepten. Hierbei wird die Belieferung dieses Ballungsraums durch zwei Speditionen für den Fall ohne Koordination der Verteilfahrten und für den Fall einer City-Logistik (CLOU City-Logistik Ulm) anhand der Speditionen Noerpel und Botzenhart sowie Bosch mit Sitz im Industriegebiet Donautal im Süden Ulms untersucht. Konkret geht es dabei um den Vergleich gebündelter und ungebündelter Sammelgutfahrten für das leichte Stückgut. Massengut und Wagenladung entfallen in diesen Betrachtungen. Als Grundlage für die Berechnungen des Ohne-Falls dienten Touren der beiden Speditionen, wie sie am 7.11.1994 gefahren wurden. Die Tour der Firma Noerpel bestand dabei aus 21 angefahrenen Punkten, wobei im Verlauf der Fahrt einmal der Speditionshof zum Laden angefahren wurde. Somit ergeben sich 20 Abladestellen innerhalb einer Gesamtfahrtstrecke von ca. 40 km. Die Tour der Firma Botzenhart und Bosch bestand aus 13 angefahrenen Punkten, wobei nur einmal geladen wurde. Die gesamte Fahrstrecke beträgt ebenfalls ca. 40 km. Insgesamt weisen die beiden Touren 4 Punkte auf, die von beiden Lkws angefahren wurden. Durch die Einführung der City-Logistik-Ulm wird die gesamte Fahrstrecke zur Bedienung aller Abladestellen nur noch 58 km betragen und könnte von einem Lkw mit verbessertem Auslastungsgrad in zwei Touren bewältigt werden. Sie besteht aus 31 angefahrenen Punkten, wobei durch zweimaliges Beladen des Lkw 29 Abladestellen verbleiben. Neben den Berechnungen für die eben genannten Fälle wird die Einbindung von 2 Güterverkehrszentren in die City-Logistik untersucht. Dabei handelt es sich um die Güterverkehrszentren Güterbahnhof und Ulm-West, das sich noch in der Planung befindet. Das Güterverkehrszentrum Güterbahnhof liegt im Zentrum von Ulm. Das Güterverkehrszentrum Ulm-West hat seinen Standort an der Anschlußstelle Ulm-West der Bundesstraße 10 an die A 8. Alternativ werden nun die Routen der City-Logistik Ulm mit Ausgangspunkt nicht bei den Speditionen sondern in jeweils einem der beiden GVZs gefahren. Die Belieferung findet in allen untersuchten Fällen nur mit dem Lkw statt. Alternative Verkehrsmittel werden im Beispielraum "Ulm" nicht untersucht.

4.3 Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg

Die Berechnungen für die Planungsaufgabe "Transitgüterverkehr durch Baden-Württemberg" werden anhand der Beispielrelationen "Mannheim - Karlsruhe - Basel", "Mannheim - Stuttgart - Ulm", "Ulm - Ravensburg - Lindau" und "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen" durchgeführt. Untersucht werden für das leichte Stückgut und die Wagenladung die Transportvorgänge in beiden Richtungen zwischen den Start- und Zielpunkten. Das Massengut wird demgegenüber nur in einer Richtung transportiert. In der Gegenrichtung wird eine Leerfahrt untersucht. Die genannten Relationen decken in ihrer Bandbreite den Transit-Güterverkehr entlang der Magistralen in Baden-Württemberg ab und ermöglichen durch den Anschluß einiger Start- und Zielpunkte an das Netz der Binnenwasserstraßen den Vergleich der Wirkungen des Einsatzes des Binnenschiffs mit den Verkehrsmitteln Straße und Schiene.

Beispielrelation "Mannheim - Karlsruhe – Basel"

Der Start-/Zielpunkt 1 der Beispielrelation "Mannheim - Karlsruhe - Basel" ist das Containerterminal der Rhenania am Handelshafen in Mannheim (Kreuzung Binnenhafenstraße / Werfthallenstraße). Start-/Zielpunkt 2 befindet sich am Containerterminal der DB am Hafen in Weil am Rhein. Der Massenguttransport wird von Mannheim nach Basel durchgeführt. Für die Relation Basel nach Mannheim wird im Falle des Massenguts ein Leertransport angenommen. Auf dieser Relation kann für Wagenladung und Massengut aufgrund des Anschlusses der Start-/ Zielpunkte an das Wasserstraßennetz das Binnenschiff ohne Umladevorgang vom Startpunkt zum Zielpunkt eingesetzt werden. Der Transport mit dem Binnenschiff findet somit ohne Vor- und Nachläufe mit anderen Verkehrsmitteln statt.

Tabelle 4.3-1 zeigt die Transportaufgaben der Beispielrelation "Mannheim - Karlsruhe - Basel".

Tabelle 4.3-1: Transportaufgaben der Beispielrelation "Mannheim - Karlsruhe - Basel"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
Planungsaufgabe "Transit- Güterverkehr durch Baden- Württemberg", Beispielrelation "Mannheim – Karlsruhe - Basel"	leichtes Stückgut (5 kg)	Mannheim nach Weil am Rhein - Per Lkw von Mannheim nach Weil am Rhein - Per Bahn (konventionell) von Mannheim nach Weil am Rhein Weil am Rhein nach Mannheim - Per Lkw von Weil am Rhein nach Mannheim - Per Bahn (konventionell) von Weil am Rhein nach Mannheim
	Wagenladung 0 t, 15 t und 25 t	Mannheim nach Weil am Rhein - Per Lkw von Mannheim nach Weil am Rhein - Per Bahn (konventionell) von Mannheim nach Weil am Rhein - Per Bahn (Container) von Mannheim nach Weil am Rhein - Per Bahn (Trailerzug) von Mannheim nach Weil am Rhein (fiktiv) - Per Binnenschiff von Mannheim nach Weil am Rhein Weil am Rhein nach Mannheim - Per Lkw von Weil am Rhein nach Mannheim - Per Bahn (konventionell) von Weil am Rhein nach Mannheim - Per Bahn (Container) von Weil am Rhein nach Mannheim - Per Bahn (Trailerzug) von Weil am Rhein nach Mannheim (fiktiv) - Per Binnenschiff von Weil am Rhein nach Mannheim
	Massengut 0 t und 15 t	Mannheim nach Weil am Rhein - Per Lkw von Mannheim nach Weil am Rhein - Per Bahn (konventionell) von Mannheim nach Weil am Rhein - Per Bahn (Abrollcontainer) von Mannheim nach Weil am Rhein (fiktiv) - Per Binnenschiff von Mannheim nach Weil am Rhein

Beispielrelation "Mannheim- Stuttgart - Ulm"

Der Start-/Zielpunkt 1 der Beispielrelation "Mannheim- Stuttgart - Ulm" ist in Mannheim wiederum das Containerterminal der Rhenania am Handelshafen (Kreuzung Binnenhafenstraße/ Werfthallenstraße) (vgl. Beispielrelation "Mannheim- Karlsruhe - Basel"). Der Start-/ Zielpunkt 2 in Ulm ist das Containerterminal in Neu-Ulm. Da diese Transitverbindung über einen Anschluß an das Binnenschiffahrtsnetz verfügt, wird auf dieser Relation auch das Binnenschiff im

gebrochenen Verkehr eingesetzt. Dabei wird durch die nicht vollständig mit dem Binnenschiff befahrbare Relation ein Umladevorgang notwendig. Als Umladepunkt ist das Containerterminal "Am Nordseekai" auf Höhe der Otto-Konz-Brücken im Hafen Plochingen definiert. Da der Start-/Zielpunkt in Mannheim durch das Binnenschiff erschlossen ist, werden keine weiteren Vor- bzw. Nachläufe durch andere Verkehrsmittel notwendig. Das Massengut wird nur von Mannheim nach Ulm befördert, in der Rückrichtung wird eine Leerfahrt angenommen.

In Tabelle 4.3-2 sind die Transportaufgaben für die Beispielrelation "Mannheim- Stuttgart - Ulm" aufgelistet.

Tabelle 4.3-2: Transportaufgaben der Beispielrelation "Mannheim- Stuttgart - Ulm"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
Planungsaufgabe	leichtes Stückgut (5 kg)	Mannheim nach Ulm - Per Lkw von Mannheim nach Ulm - Per Bahn (konventionell) von Mannheim nach Ulm Ulm nach Mannheim - Per Lkw von Ulm nach Mannheim - Per Bahn (konventionell) von Ulm nach Mannheim
	Wagenladung 0 t, 15 t und 25 t	Mannheim nach Ulm - Per Lkw von Mannheim nach Ulm - Per Bahn (konventionell) von Mannheim nach Ulm - Per Bahn (Container) von Mannheim nach Ulm - Per Bahn (Trailerzug) von Mannheim nach Ulm (fiktiv) - Per Binnenschiff (Container) von Mannheim nach Hafen Plochingen Per Bahn (Container) von Hafen Plochingen nach Ulm - Per Binnenschiff (Container) von Mannheim nach Hafen Plochingen Per Lkw (Container) von Hafen Plochingen nach Ulm Ulm nach Mannheim - Per Lkw von Ulm nach Mannheim - Per Bahn (konventionell) von Ulm nach Mannheim - Per Bahn (Container) von Ulm nach Mannheim - Per Bahn (Trailerzug) von Ulm nach Mannheim (fiktiv) - Per Bahn (Container) von Ulm nach Hafen Plochingen Per Binnenschiff (Container) von Hafen Plochingen nach Mannheim - Per Lkw (Container) von Ulm nach Hafen Plochingen Per Binnenschiff (Container) von Hafen Plochingen nach Mannheim
"Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg", Beispielrelation "Mannheim - Stuttgart - Ulm"		

	Massengut 0 t und 15 t	Mannheim nach Ulm - Per Lkw von Mannheim nach Ulm - Per Bahn (konventionell) von Mannheim nach Ulm - Per Bahn (Abrollcontainer) von Mannheim nach Ulm (fiktiv) - Per Binnenschiff von Mannheim nach Hafen Plochingen Per Bahn (konventionell) von Hafen Plochingen nach Ulm - Per Binnenschiff von Mannheim nach Hafen Plochingen Per Lkw von Hafen Plochingen nach Ulm
--	------------------------	--

Beispielrelation "Ulm - Ravensburg - Lindau"

Die Beispielrelation "Ulm - Ravensburg - Lindau" hat ihren Start-/Zielpunkt 1 am Containerterminal in Neu-Ulm (vgl. Beispielrelation "Mannheim - Stuttgart - Ulm"). Da in Lindau kein Umschlagpunkt vorhanden ist, wird als Start-/Zielpunkt 2 ein fiktives Containerterminal an der Einmündung der Von-Bahring-Straße in die Bundesstraße 31 angenommen. Das Massengut wird von Ulm nach Lindau transportiert, wobei die Rückrichtung als Leerfahrt betrachtet wird. Im Rahmen dieser Transportaufgaben muß aufgrund der Lage des Start- und Zielpunktes Lindau davon abgegangen werden, die Güter lediglich auf dem Straßennetz des Landes Baden-Württemberg zu befördern. Zur Erfüllung müssen hier auch Straßen auf dem Gebiet des Landes Bayern in die Berechnungen einbezogen werden.

Tabelle 4.3-3 listet die Transportaufgaben für die Beispielrelation "Ulm - Ravensburg - Lindau" auf.

Tabelle 4.3-3: Transportaufgaben der Beispielrelation "Ulm - Ravensburg - Lindau"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
Planungsaufgabe	leichtes Stückgut (5 kg)	Ulm nach Lindau - Per Lkw von Ulm nach Lindau - Per Bahn (konventionell) von Ulm nach Lindau Lindau nach Ulm - Per Lkw von Lindau nach Ulm - Per Bahn (konventionell) von Lindau nach Ulm

"Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg",
 Beispielrelation
 "Ulm - Ravensburg - Lindau"

Konkrete Transportaufgaben

	Wagenladung 0 t, 15 t und 25 t	Ulm nach Lindau - Per Lkw von Ulm nach Lindau - Per Bahn (konventionell) von Ulm nach Lindau - Per Bahn (Container) von Ulm nach Lindau - Per Bahn (Trailerzug) von Ulm nach Lindau (fiktiv) Lindau nach Ulm - Per Lkw von Lindau nach Ulm - Per Bahn (konventionell) von Lindau nach Ulm - Per Bahn (Container) von Lindau nach Ulm - Per Bahn (Trailerzug) von Lindau nach Ulm (fiktiv)
	Massengut 0 t und 15 t	Ulm nach Lindau - Per Lkw von Ulm nach Lindau - Per Bahn (konventionell) von Ulm nach Lindau - Per Bahn (Abrollcontainer) von Ulm nach Lindau (fiktiv)

Beispielrelation "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen"

Die Lage des Start-/Zielpunkts 1 der Beispielrelation "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen" ist durch das Containerterminal im Stuttgarter Hafen an der Überführung der Otto-Hirsch-Brücken über die Hafenbahn bestimmt. Als Start-/Zielpunkt 2 dient das Containerterminal in Singen an der Pfaffenhäule. Analog zu den zuvor beschriebenen Transportaufgaben wird das Massengut nur von Stuttgart nach Singen transportiert und in der Gegenrichtung eine Leerfahrt angenommen.

Tabelle 4.3-4 können die Transportaufgaben für die Beispielrelation "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen" entnommen werden.

Tabelle 4.3-4: Transportaufgaben der Beispielrelation "Stuttgart – Rottweil – Tuttlingen - Singen"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
Planungsaufgabe "Transit- Güterverkehr durch Baden- Württemberg", Beispielrelation "Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen"	leichtes Stückgut (5 kg)	Stuttgart nach Singen - Per Lkw von Stuttgart nach Singen - Per Bahn (konventionell) von Stuttgart nach Singen Singen nach Stuttgart - Per Lkw von Singen nach Stuttgart - Per Bahn (konventionell) von Singen nach Stuttgart
	Wagenladung 0 t, 15 t und 25 t	Stuttgart nach Singen - Per Lkw von Stuttgart nach Singen - Per Bahn (konventionell) von Stuttgart nach Singen - Per Bahn (Container) von Stuttgart nach Singen - Per Bahn (Trailerzug) von Stuttgart nach Singen (fiktiv) Singen nach Stuttgart - Per Lkw von Singen nach Stuttgart - Per Bahn (konventionell) von Singen nach Stuttgart - Per Bahn (Container) von Singen nach Stuttgart - Per Bahn (Trailerzug) von Singen nach Stuttgart (fiktiv)
	Massengut 0 t und 15 t	Stuttgart nach Singen - Per Lkw von Stuttgart nach Singen - Per Bahn (konventionell) von Stuttgart nach Singen - Per Bahn (Abrollcontainer) von Stuttgart nach Singen (fiktiv)

4.4 Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum

Die Berechnungen für die Planungsaufgabe "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum" werden anhand der Beispielräume "Oberschwaben (Ravensburg)" und "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)" durchgeführt. Es werden für jeden ländlichen Raum ein Güterverkehrszentrum und drei Start-/Zielpunkte festgelegt, von denen zwei in der Region liegen und einer in der Kernstadt. Im ländlich strukturierten Raum soll - im Gegensatz zum Ballungsgebiet - auch die Bahn Transporte im Vor- und Nachlauf durchführen. Lediglich das leichte Stückgut wird von der Bahn nur vom Bahnhof des Startortes zum Bahnhof des Zielortes transportiert. Die Transporte vom und zum Bahnhof werden vom Lkw als Vor- bzw. Nachläufe durchgeführt. Dabei handelt es sich bei den Bahntransporten zwischen den Bahnhöfen nicht um einen durchgängigen Hauptlauf, sondern jeweils um einen geteilten Hauptlauf über die Güterverkehrszentren VS-Villingen und Ravensburg, inklusive eines Umschlages Bahn auf Bahn. Die Ausnahme hiervon bilden die Transporte des leichten Stückguts mit Quelle und / oder Ziel in Ravensburg. In diesen Fällen wird das Güterverkehrszentrum in Ravensburg vom Lkw im Vor- oder Nachlauf direkt angefahren. Untersucht werden die Transportvorgänge von jedem Start- und Zielpunkt zu jedem Start-/Zielpunkt. Das Massengut bildet einen Sonderfall. Es wird nur vom Güterverkehrszentrum zu allen drei Start-/Zielpunkten transportiert. In der Gegenrichtung wird dann von einer Leerfahrt ausgegangen.

Beispielraum "Oberschwaben (Ravensburg)"

Im Beispielraum "Oberschwaben (Ravensburg)" liegt der Start-/Zielpunkt in Ravensburg an der Kreuzung der Goethestraße mit dem Industriegleis südlich des Bahnhofs. In Pfullendorf befindet sich der Start-/Zielpunkt an der Kreuzung zwischen Industriestammgleis-Ost und Werkstraße am südöstlichen Stadtrand. Diese Start-/Zielpunkte verfügen über einen Gleisanschluß. Der Start-/Zielpunkt in Meckenbeuren hat aufgrund seiner Lage an der Einmündung Benzstraße / Dieselstraße lediglich einen Anschluß an das Straßennetz. Er liegt jedoch in unmittelbarer Nachbarschaft zu der von Südwesten nach Meckenbeuren-Bahnhof verlaufenden Bahnstrecke, so daß ein fiktiver Gleisanschluß angenommen werden kann. Den Umschlagpunkt für das leichte Stückgut und die Wagenladung sowie den Ausgangspunkt für die Massenguttransporte bildet das GVZ Ravensburg nördlich des Bahnhofs in Ravensburg. Sämtliche Transporte des leichten Stückguts und der mit der Bahn transportierten Wagenladung verlaufen über das GVZ Ravensburg. Die Wagenladungstransporte mit dem Lkw gehen von allen drei Start-/Zielpunkten zu allen drei Start-/Zielpunkten ohne Fahrt über das GVZ Ravensburg. Das Massengut wird nur zwischen dem GVZ Ravensburg und den drei Start- und Zielpunkten transportiert. In den Rückrichtungen wird eine Leerfahrt abgebildet.

Tabelle 4.4-1 zeigt die Transportaufgaben für den Beispielraum "Oberschwaben (Ravensburg)".

Tabelle 4.4-1: Transportaufgaben für den Beispielraum "Oberschwaben (Ravensburg)"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
<p>Planungsaufgabe "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum", Beispielraum "Oberschwaben (Ravensburg)"</p>	<p>leichtes Stückgut (5 kg)</p>	<p>Ravensburg nach Meckenbeuren</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Ravensburg nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Meckenbeuren (fiktiv) - Per Lkw von Ravensburg nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Bahnhof Meckenbeuren Per Lkw von Bahnhof Meckenbeuren nach Meckenbeuren (fiktiv) <p>Ravensburg nach Pfullendorf</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Ravensburg nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Pfullendorf (fiktiv) - Per Lkw von Ravensburg nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Bahnhof Pfullendorf Per Lkw von Bahnhof Pfullendorf nach Pfullendorf (fiktiv) <p>Meckenbeuren nach Ravensburg</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Meckenbeuren nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Ravensburg (fiktiv) - Per Lkw von Meckenbeuren nach Bahnhof Meckenbeuren Per Bahn (konventionell) von Bahnhof Meckenbeuren nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Ravensburg (fiktiv) <p>Meckenbeuren nach Pfullendorf</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Meckenbeuren nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Pfullendorf (fiktiv) - Per Lkw von Meckenbeuren nach Bahnhof Meckenbeuren Per Bahn (konventionell) von Bahnhof Meckenbeuren nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Bahnhof Pfullendorf Per Lkw von Bahnhof Pfullendorf nach Pfullendorf (fiktiv) <p>Pfullendorf nach Ravensburg</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Pfullendorf nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Ravensburg (fiktiv) - Per Lkw von Pfullendorf nach Bahnhof Pfullendorf Per Bahn (konventionell) von Bahnhof Pfullendorf nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Ravensburg (fiktiv) <p>Pfullendorf nach Meckenbeuren</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Pfullendorf nach GVZ Ravensburg Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Meckenbeuren

Konkrete Transportaufgaben

		<p>(fiktiv)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Pfullendorf nach Bahnhof Pfullendorf Per Bahn (konventionell) von Bahnhof Pfullendorf nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Bahnhof Meckenbeuren Per Lkw von Bahnhof Meckenbeuren nach Meckenbeuren <p>(fiktiv)</p>
	Wagenladung 0 t, 15 t und 25 t	<p>Ravensburg nach Meckenbeuren</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Ravensburg nach Meckenbeuren - Per Bahn (konventionell) von Ravensburg nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Meckenbeuren <p>Ravensburg nach Pfullendorf</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Ravensburg nach Meckenbeuren - Per Bahn (konventionell) von Ravensburg nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Pfullendorf <p>Meckenbeuren nach Ravensburg</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Meckenbeuren nach Ravensburg - Per Bahn (konventionell) von Meckenbeuren nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Ravensburg <p>Meckenbeuren nach Pfullendorf</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Meckenbeuren nach Pfullendorf - Per Bahn (konventionell) von Meckenbeuren nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Pfullendorf <p>Pfullendorf nach Ravensburg</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Pfullendorf nach Ravensburg - Per Bahn (konventionell) von Pfullendorf nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Ravensburg <p>Pfullendorf nach Meckenbeuren</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Pfullendorf nach Meckenbeuren - Per Bahn (konventionell) von Pfullendorf nach GVZ Ravensburg Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Meckenbeuren
	Massengut 0 t und 15 t	<p>GVZ Ravensburg nach Ravensburg</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Ravensburg - Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Ravensburg <p>GVZ Ravensburg nach Meckenbeuren</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Meckenbeuren - Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Meckenbeuren <p>GVZ Ravensburg nach Pfullendorf</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von GVZ Ravensburg nach Pfullendorf - Per Bahn (konventionell) von GVZ Ravensburg nach Pfullendorf

		dorf
--	--	------

Beispielraum "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)"

Im Beispielraum "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)" ist ein Güterverkehrszentrum ca. 1 km südlich des Bahnhofs von VS-Villingen geplant. Dort existiert bereits ein Containerterminal der BahnTrans (früher Thyssen-Haniel-Logistik). Als Start-/Zielpunkt mit kurzem Vorlauf dient das Gewerbegebiet am östlichen Stadtrand von Schwenningen am Ende des Industriegleises südlich der Klippeneckstraße. Ein Gleisanschluß ist vorhanden. Der Start-/Zielpunkt mit langem Vorlauf ist eine Unterführung der Bahnstrecke der Straße zum Bruderhaus im Gewerbegebiet in St. Georgen. Ein Gleisanschluß ist hierbei nicht vorhanden, das Gebiet liegt aber unmittelbar an der Bahn. Der dritte Start-/Zielpunkt ist der städtische Bauhof am südwestlichen Stadtrand von Donaueschingen. Ein Gleisanschluß ist ebenfalls nicht vorhanden. Das Gelände liegt jedoch bahn-nah in ebenem Gelände. Das leichte Stückgut wird im Falle des konventionellen Bahntransports im Hauptlauf stets über das GVZ VS-Villingen transportiert. Für das leichte Stückgut und die Wagenladung werden die gleichen Relationen untersucht, wohingegen für das Massengut lediglich vom GVZ VS-Villingen aus alle drei Start-/Zielpunkte als Ziel angefahren werden. Die Rückrichtung wird dabei als Leerfahrt abgebildet. Der Lkw-Transport der Wagenladung erfolgt unter Umgehung des GVZ VS-Villingen direkt zwischen allen drei Start-/Zielpunkten in der Hin- und Rückrichtung.

In der Tabelle 4.4-2 sind die Transportaufgaben für den Beispielraum "Schwarzwald Villingen-Schwenningen" abgebildet.

Tabelle 4.4-2: Transportaufgaben für den Beispielraum "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)"

	Transportgut	Relation / Verkehrsmittel
Planungsaufgabe "Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum", Beispielraum "Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)"	leichtes Stückgut (5 kg)	<p>VS-Schwenningen nach Donaueschingen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von VS-Schwenningen nach GVZ VS-Villingen Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach Donaueschingen (fiktiv) - Per Lkw von VS-Schwenningen nach Bahnhof VS-Schwenningen Per Bahn (konventionell) von Bahnhof VS-Schwenningen nach GVZ VS-Villingen Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Bahnhof Donaueschingen Per Lkw von Bahnhof Donaueschingen nach Donaueschingen (fiktiv) <p>VS-Schwenningen nach St. Georgen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von VS-Schwenningen nach GVZ VS-Villingen Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach St. Georgen (fiktiv) - Per Lkw von VS-Schwenningen nach Bahnhof VS-Schwenningen Per Bahn (konventionell) von Bahnhof VS-Schwenningen nach GVZ VS-Villingen Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Bahnhof St. Georgen Per Lkw von Bahnhof St. Georgen nach St. Georgen (fiktiv) <p>Donaueschingen nach VS-Schwenningen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Donaueschingen nach GVZ VS-Villingen Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach VS-Schwenningen (fiktiv) - Per Lkw von Donaueschingen nach Bahnhof Donaueschingen Per Bahn (konventionell) von Bahnhof Donaueschingen nach GVZ VS-Villingen Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Bahnhof VS-Schwenningen Per Lkw von Bahnhof VS-Schwenningen nach VS-Schwenningen (fiktiv) <p>Donaueschingen nach St. Georgen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Donaueschingen nach GVZ VS-Villingen

		<p>Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach St. Georgen (fiktiv)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Donaueschingen nach Bahnhof Donaueschingen <p>Per Bahn (konventionell) von Bahnhof Donaueschingen nach GVZ VS-Villingen</p>
		<p>St. Georgen nach VS-Schwenningen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von St. Georgen nach GVZ VS-Villingen <p>Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach VS-Schwenningen (fiktiv)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von St. Georgen nach Bahnhof St. Georgen <p>Per Bahn (konventionell) von Bahnhof St. Georgen nach GVZ VS-Villingen</p> <p>Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Bahnhof VS-Schwenningen</p> <p>Per Lkw von Bahnhof VS-Schwenningen nach VS-Schwenningen (fiktiv)</p> <p>St. Georgen nach Donaueschingen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von St. Georgen nach GVZ VS-Villingen <p>Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach Donaueschingen (fiktiv)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von St. Georgen nach Bahnhof St. Georgen <p>Per Bahn (konventionell) von Bahnhof St. Georgen nach GVZ VS-Villingen</p> <p>Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Bahnhof Donaueschingen</p> <p>Per Lkw von Bahnhof Donaueschingen nach Donaueschingen (fiktiv)</p>
	Wagenladung 0 t, 15 t und 25 t	<p>VS-Schwenningen nach Donaueschingen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von VS-Schwenningen nach Donaueschingen - Per Bahn (konventionell) von VS-Schwenningen nach GVZ VS-Villingen <p>Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Donaueschingen</p> <p>VS-Schwenningen nach St. Georgen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von VS-Schwenningen nach St. Georgen - Per Bahn (konventionell) von VS-Schwenningen nach GVZ VS-Villingen <p>Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach St. Georgen</p> <p>Donaueschingen nach VS-Schwenningen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Donaueschingen nach VS-Schwenningen - Per Bahn (konventionell) von Donaueschingen nach GVZ

Konkrete Transportaufgaben

		<p>VS- Villingen Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach VS-Schwenningen</p> <p>Donaueschingen nach St. Georgen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von Donaueschingen nach St. Georgen - Per Bahn (konventionell) von Donaueschingen nach GVZ <p>VS- Villingen Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach St. Georgen</p> <p>St. Georgen nach VS-Schwenningen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von St. Georgen nach VS-Schwenningen - Per Bahn (konventionell) von St. Georgen nach GVZ VS-Villingen <p>Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach VS-Schwenningen</p> <p>St. Georgen nach Donaueschingen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von St. Georgen nach Donaueschingen - Per Bahn (konventionell) von St. Georgen nach GVZ VS-Villingen <p>Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Donaueschingen</p>
	Massengut 0 t und 15 t	<p>GVZ VS-Villingen nach VS-Schwenningen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach VS-Schwenningen - Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach VS-Schwenningen <p>GVZ VS-Villingen nach Donaueschingen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach Donaueschingen - Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach Donaueschingen <p>GVZ VS-Villingen nach St. Georgen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per Lkw von GVZ VS-Villingen nach St. Georgen - Per Bahn (konventionell) von GVZ VS-Villingen nach St. Georgen

5 Direkter antriebsbedingter Energieaufwand und direkte antriebsbedingte Emissionen

5.1 Allgemeines

Die Ermittlung der umwelt- und klimarelevanten Wirkungen verschiedener Verkehrsmittel setzt die genaue Definition aller Vorgänge zur Umwandlung von Energie während des Betriebs eines Fahrzeugs voraus. Die Verkehrsmittel verbrauchen bei der Erfüllung der Transportaufgaben Energie in Form von Kraftstoff bzw. Strom. Durch den Verbrauch dieser Energie entstehen, sofern es sich um eine Verbrennung von Kraftstoff im Fahrzeug handelt, direkt am Fahrzeug Emissionen. Die zum Bewegen des Fahrzeugs notwendige Menge an Energie, also Masse an Kraftstoff umgerechnet in die Energieeinheit Megajoule, nennt man den direkten Energieaufwand. Als direkte Emissionen werden die durch die Verbrennung von Kraftstoff im Verkehrsträger entstehenden Luftschadstoffe bezeichnet. Wird das Fahrzeug mit Strom als Energieträger betrieben, so entstehen aus dem direkten antriebsbedingten Energieaufwand während der Fahrt keine direkten Emissionen am Fahrzeug.

5.2 Straße

5.2.1 Routen

Zur Bestimmung der direkten Energieaufwendungen und direkten Emissionen ist es notwendig als ersten Arbeitsschritt die genaue Fahrtstrecke, sprich die Route des Transports für jedes Verkehrsmittel festzulegen. Darüberhinaus sind weitergehende Informationen und Daten zu den Lkw, der Beladung und zu den Strecken notwendig.

Die zu ermittelnden Routen können folgendermaßen eingeteilt werden:

- Sammel- und Verteilrouten für das leichte Stückgut, im weiteren als "Verteilrouten" bezeichnet,
- sehr kurze oder offensichtlich eindeutige, mittellange Routen,
- nicht eindeutige Routen, die mit Hilfe des Programms DAISY gefunden wurden.

Die Verteilrouten des leichten Stückguts werden durch Nachfragen bei den in der jeweiligen Planungsaufgabe beteiligten Transportunternehmen ermittelt. Die Trivialrouten werden anhand des Kartenmaterials abgelesen und festgelegt. Die Simulation einer Route mittels des Programms DAISY erfolgt durch Eingabe des Start- und Zielpunkts der Fahrt.

Anhand der gefundenen Route erfolgen in einem weiteren Arbeitsschritt die Berechnungen zum Energieaufwand und den Emissionen.

Bei der Auswahl der Route spielt zunächst das Kriterium des zeitkürzesten Weges die entscheidende Rolle. Die Routenfestlegung muß getrennt für jedes Transportgut erfolgen, da unterschiedliche Güter auf unterschiedlichen Strecken transportiert werden. Die Wagenladung und das Massengut werden dabei auf einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung vom Start- zum Zielort bzw. zum oder vom Ort des Umschlags zum Zielort gefahren. Daher kann angenommen werden, daß für die Wagenladung und das Massengut gleiche Routen gewählt werden. Für das Stückgut werden, da es zusammen mit anderen Gütern transportiert wird, gebietsabdeckende Sammelfahrten durchgeführt. Der Streckenverlauf dieser Fahrten unterscheidet sich von dem der Wagenladung und des Massenguts. Da eine Vielzahl der zu untersuchenden Fahrten durch Vor-, Haupt- und Nachläufe aus mehreren Fahrten zusammengesetzt sind, muß zur Routenbestimmung eine Auflösung in Teiltransporte erfolgen. Für einen Bahn-Transport, der über einen Vor- und Nachlauf auf der Straße verfügt müssen somit straßenseitig 2 Routen definiert werden.

5.2.1.1 Ballungsgebiet

Die Abwicklung des Transports des leichten Stückguts und des Massenguts funktioniert in allen drei Ballungsgebieten nach dem gleichen, in den vorigen Kapiteln beschriebenen Verfahren.

Ballungsgebiet Stuttgart

Die als "Lkw-Spedition" gekennzeichneten Transporte werden von der Spedition Steinle mit Sitz in Schwieberdingen ca. 20 km nordwestlich von Stuttgart, durchgeführt. Da dieser Transport in die Verteilfahrt anderer Güter eingebunden ist, entstehen größere Transportweiten, als dies von der Betrachtung der Lage der Start- und Zielpunkte her möglich erscheint. Der Transport besteht aus zwei Fahrten. Die erste Verteilfahrt, in diesem Fall eine Sammelfahrt, dient dem Abholen des Guts bspw. in Esslingen-Mettingen. Darauffolgend wird das Gut bei der Spedition umgeschlagen und in einer zweiten Fahrt, der Verteilfahrt, von Schwieberdingen nach Oberaichen befördert. Die Transportweite ist dabei lediglich die Distanz, die das leichte Stückgut im Lkw vom Einlade- bis

zum Ausladeplatz befördert wird. Es wird also nicht die gesamte Fahrtweite der Verteilfahrt untersucht.

Die Transportroute für die Verteilfahrt von der Spedition Steinle nach Esslingen-Mettingen stellt sich folgendermaßen dar. Die Fahrt beginnt auf dem Speditionshof in Schwieberdingen und führt über das örtliche Straßennetz bis Schwieberdingen-Mitte. Von dort verläuft die Fahrtroute über die Bundesstraße B10 bis zur Auffahrt in Höhe der Otto-Konz-Brücken in Stuttgart-Obertürkheim und anschließend bis zur Hafentbahnstraße. Analog ergibt sich die Rückrichtung.

Die Route von der Spedition Steinle nach Oberaichen besteht aus den folgenden Abschnitten. Fahrt von der Spedition bis Schwieberdingen-Mitte. Daran anschließend Fahrt auf der Bundesstraße B10 bis zur Anschlußstelle Stuttgart-Zuffenhausen. Von dort auf der Bundesautobahn A81 bis zum Autobahndreieck Leonberg. Dann auf der Bundesautobahn A8 bis zum Autobahnkreuz Stuttgart und auf der Bundesautobahn 831 bis zur Anschlußstelle Stuttgart-Vaihingen West. Nachfolgend verläuft die Route auf den Landesstraßen L1205 und 1192 bis nach Oberaichen. Die Rückrichtung wird auf derselben Route gefahren.

Die Fahrten, die als Vor- bzw. Nachläufe dienen werden in den Richtungen Esslingen-Mettingen zum GVZ Stuttgart-Hafen und vom GVZ Bahnhof Stuttgart-Vaihingen nach Oberaichen als Ausschnitt der eben genannten Verteilfahrten simuliert, da diese jeweils über die entsprechenden GVZ (Bahnhof Stuttgart-Vaihingen und Stuttgart-Hafen) führen.

Die Route, die für den Transport des leichten Stückguts vom GVZ Stuttgart-Hafen bis zum GVZ Bahnhof Stuttgart-Vaihingen gewählt wird, führt vom GVZ Stuttgart-Hafen in der Hafentbahnstraße über die Otto-Konz-Brücken zur Bundesstraße B10 und über die Bundesstraße B14 bis zum Beginn der Bundesautobahn A831 an der Universität Vaihingen. An der Anschlußstelle Stuttgart-Vaihingen verläßt sie diese und führt über die Landesstraße L1205 und das örtliche Straßennetz bis zum GVZ Bahnhof Stuttgart-Vaihingen. Die Gegenrichtung ist entsprechend modelliert.

Der Massenguttransport vom GVZ Stuttgart-Hafen beginnt in der Hafentbahnstraße und führt über die Otto-Konz-Brücken nach Stuttgart-Hedelfingen und von dort auf der Landesstraße L1198 bis Stuttgart-Heumaden. Die Route verläuft dann weiter auf der Landesstraße L1200 und der Kreisstraße K1218 nach Kemnat. Daran anschließend wird auf der Kreisstraße K1217 und der Landesstraße L1192 nach Leinfelden gefahren, von wo aus über das örtliche Straßennetz der Zielpunkt in Oberaichen angefahren wird.

Die für das Massengut im Abrollcontainer gewählte Route vom GVZ Bahnhof Stuttgart-Vaihingen nach Oberaichen führt von ihrem Ausgangspunkt über die Landesstraße L1192 nach Oberaichen.

Ballungsgebiet Karlsruhe

Die für das leichte Stückgut durchgeführten Verteilfahrten im Ballungsgebiet Karlsruhe haben ihren Ursprung jeweils bei der Spedition Vetter in Ettlingen und führen nach Wörth am Rhein und Ettlingen-West. Die Route nach Wörth am Rhein führt über die Bundesstraße B3, die Landesstraße L605, die Kreisstraße K9657, die Bundesstraße B10 sowie die Maximiliansau zum Start- und Zielpunkt.

Die Verteilfahrt nach Ettlingen-West beginnt wieder bei der Spedition Vetter und führt über die Bundesstraße B3 bis zum Start- und Zielpunkt in Ettlingen-West. Nach weiteren 16 Anfahrpunkten in Ettlingen befindet sich die Tour ein zweites Mal am Start- und Zielpunkt. Danach werden noch zwei Anfahrpunkte bedient um dann schließlich wieder über die Bundesstraße B10 an der Spedition Vetter anzugelangen.

Die Vor- und Nachläufe im Ballungsgebiet Karlsruhe, die zum Transport des leichten Stückguts zwischen den GVZ notwendig sind gestalten sich in der folgenden Weise.

Von Ettlingen-West zum GVZ Karlsruhe-Mitte führt die Route über die Bundesstraße B3 zur Anschlußstelle Karlsruhe-Süd und von dort auf der Bundesautobahn A5 bis zur Anschlußstelle Karlsruhe-Mitte. Den verbleibenden Teil der Strecke bis zum GVZ Karlsruhe-Mitte wird die Kreisstraße K9652 befahren.

Für die Fahrt vom GVZ Hafen-Karlsruhe nach Wörth am Rhein wird neben den örtliche Straßennetzen in Karlsruhe und Wörth am Rhein, die Bundesstraße B10 genutzt.

Der Straßentransport zwischen dem GVZ Karlsruhe-Mitte und Hafen Karlsruhe führt die Route über die Kreisstraßen 9652 und 9657 sowie die Bundesstraße B10.

Beim Massenguttransport zwischen dem GVZ Hafen Karlsruhe und Ettlingen-West werden die Bundesstraße B10, die Kreisstraße K9657, die Landesstraße L605, die Bundesstraße B3 sowie das örtliche Straßennetz in Ettlingen bis zum Start- und Zielpunkt in Ettlingen-West befahren. Der Transport mit dem Abrollcontainer zwischen dem GVZ Karlsruhe-Mitte und Ettlingen-West wird über dieselbe Route wie der Transport des leichten Stückguts abgewickelt.

Für alle beschriebenen Relationen gilt wie schon im Ballungsgebiet Stuttgart, daß die Gegenrichtungen auf den analogen Routen gefahren werden.

Ballungsgebiet Oberrhein (Freiburg/Lörrach)

Die Verteilfahrten der Spedition für den Transport des leichten Stückguts (Lkw-Spedition) führt ausgehend von der Spedition Streck nach Staufen im Breisgau bzw. nach Lörrach. Die Route für die Verteilfahrt nach Staufen im Breisgau besteht aus Fahrten auf dem Straßennetz in Freiburg bis zur Anschlußstelle Paduaallee, dann auf der Bundesstraße B31a bis zur Anschlußstelle Freiburg-Mitte, anschließend auf der Bundesautobahn A5 zur Anschlußstelle Freiburg-Süd, von wo aus über die Kreisstraßen K9863 und 4980 sowie die Landesstraße L187, die Kreisstraße K4981, die Landesstraße L122, die Kreisstraße K4949, die Landesstraßen L125 und 123 zum ersten Mal der Start- und Zielpunkt in Staufen im Breisgau angefahren wird. Daran anschließend wird über das örtliche Straßennetz von Staufen im Breisgau, die Landesstraße L129, die Kreisstraße K4943, die Landesstraße L125, die Kreisstraße K4941 und die Landesstraßen L125 und 123 zum zweiten Mal der Start- und Zielpunkt in Staufen im Breisgau angefahren. Über die Landesstraßen L123, 120 und 119 sowie die Bundesstraße B31 (bis Munzingen), die Bundesautobahn A5 (von der Anschlußstelle Freiburg-Süd bis zur Anschlußstelle Freiburg-Mitte) und die Bundesstraße B31a (bis zur Anschlußstelle Paduaallee) wird, in umgekehrter Reihenfolge, wie schon zu Beginn der Route die Spediton Streck erreicht.

Für die Verteilfahrt nach Lörrach wird folgende Route befahren. Von der Spedition Streck bis zur Anschlußstelle Paduaallee auf dem örtlichen Straßennetz. Im Anschluß daran über die Bundesstraße B31a (bis Anschlußstelle Freiburg-Mitte), die Bundesautobahnen A5 (bis Autobahndreieck Weil am Rhein) und A98 bis zur Anschlußstelle Lörrach-Nord. Daraufhin erfolgen Fahrten auf dem örtlichen Straßennetz von Lörrach und der Bundesstraße B10, in deren Verlauf der Start- und Zielpunkt einmal angefahren wird. Ausgehend von der Anschlußstelle Lörrach-Nord wird über die schon genannten Streckenabschnitte in der Rückrichtung bis zur Spedition Streck in Freiburg gefahren.

Für den Transport des Lkw über die GVZ fallen die folgenden Vor-, Haupt- und Nachläufe an. Die Fahrt von Lörrach zum GVZ Weil am Rhein beginnt am Start- und Zielpunkt in Lörrach und geht über das örtliche Straßennetz bis zu Anschlußstelle Lörrach-Nord und weiter auf der Bundesautobahn A 98 zur Anschlußstelle Binzen, von wo aus über die Bundesstraßen B3 und 532 das GVZ Weil am Rhein angefahren wird.

Der Hauptlauf vom GVZ Weil am Rhein zum GVZ Freiburg startet auf der Bundesstraße B532 in Weil am Rhein und führt dann über die Bundesautobahn A5 (ab Anschlußstelle Weil a. Rhein / Hüningen) und die Bundesstraße B31a (ab Anschlußstelle Freiburg-Mitte) zur Anschlußstelle

Paduaallee. Anschließend wird das örtliche Straßennetz in Freiburg und Freiburg-Zähringen bis zum Erreichen des GVZ Freiburg im Breisgau befahren.

Die Fahrt vom GVZ Freiburg zum Start- und Zielpunkt in Staufen führt über die bereits erwähnten Abschnitte des Freiburger Straßennetzes (bis Anschlußstelle Paduaallee), die Bundesstraße B31a (bis Anschlußstelle Freiburg-Mitte), die Bundesautobahn A5 (bis Anschlußstelle Bad-Krozingen) und die Landesstraßen L120 und 123 bis zum Start- und Zielpunkt in Staufen im Breisgau.

Der Massenguttransport vom Hafen in Weil am Rhein nach Staufen im Breisgau nimmt den folgenden Verlauf. Auf der Bundesstraße B532 vom GVZ Weil am Rhein bis zur Anschlußstelle Weil a. Rhein / Hüningen. Dann auf der Bundesautobahn A5 zur Anschlußstelle Müllheim / Neuenburg und weiter auf der Bundesstraße B378 bis Müllheim. Daran anschließend auf der Bundesstraße B3 (über Heitersheim-Mitte) und die Landesstraßen L129 und 123 bis zum Start- und Zielpunkt in Staufen im Breisgau.

Die Route für den Transport des Massenguts im Abrollcontainer von Freiburg nach Staufen folgt in ihrem Verlauf der Route des entsprechenden Transports des leichten Stückguts.

Die jeweiligen Rückrichtungen für die genannten Relationen werden in umgekehrter Reihenfolge wie die beschriebenen Routen erzeugt.

Ballungsgebiet Ulm

Wie bereits erwähnt, werden im Ballungsgebiet Ulm die Wirkungen von ungebündelten und gebündelten Verteilfahrten für das leichte Stückgut untersucht. Bei den ungebündelten Fahrten handelt es sich um 3 Touren der Speditionen Noerpel sowie Botzenhart und Bosch, beide mit Sitz in Ulm. Diese 3 Touren werden unter dem Namen City-Logistik-Ulm zu zwei Touren zusammengefaßt. In einem weitergehenden Schritt wird die City-Logistik-Ulm nicht mehr von den Speditionen aus betrieben, sondern läuft über zwei Güterverkehrszentren am Ulmer Güterbahnhof und an der Anschlußstelle Ulm-West der Bundesautobahn A8 und der Bundesstraße B10.

Der Fahrtverlauf für die ungebündelte Verteilfahrt 1 der Spedition Noerpel nach Neu-Ulm gestaltet sich folgendermaßen. Start bei der Spedition Noerpel in der Daimlerstraße in Ulm und Fahrt auf der Wiblinger Allee bis zur Anschlußstelle Wiblingen. Von dort aus Weiterfahrt auf den Bundesstraßen B30 und 28 bis zur Anschlußstelle Neu-Ulm-Mitte. Dann auf der Europastraße, der Memminger Straße, der Reuttier Straße und der Industriestraße bis zum Ladepunkt n1 in der Ahornstraße. Anschließend Fahrt auf der Borsigstraße bis zu den Ladepunkten n2 und n3 (Finniger Straße). Dann auf dem Pfaffenweg bis Ladepunkt n4 in der Zeppelinstraße, darauffolgend Reuttier Straße zum Ladepunkt n5 in der Heinkelstraße. Ladepunkt n6 im Pfaffenweg wird an-

gefahren über Reuttier Straße und Zeppelinstraße. Dann folgt die Fahrt in die Heinkelstraße zu Ladepunkt n7 und Weiterfahrt durch Reuttier Straße und Europastraße zur Anschlußstelle Neu-Ulm-Mitte. Von dort aus Anfahrt des Ladepunkts n8 Am Kaltwässerle und wieder zurück zur Anschlußstelle Neu-Ulm-Mitte. Ladepunkt n9, n10 und n11 befinden sich in der Messerschmidtstraße. Dann auf der Europastraße, der Otto-Hahn-Straße bis zur Von-Liebig-Straße und Ladepunkt n12. Die Fahrt geht weiter in die Leibnitzstraße zu den Ladepunkten n13 bis 15 und dann durch die Otto-Hahn-Straße in die Carl-Zeiss-Straße zu Ladepunkt n16. Dann folgt die Europastraße, die Reuttierstraße, die Augsburger Straße und die Silcherstraße, wo sich Ladepunkt n17 befindet. Im Anschluß durch die Schützenstraße, die Augsburger Straße und die Reuttier Straße in die Finninger Straße zu Ladepunkt n18. Von diesem Punkt aus erfolgt die Rückfahrt zur Spedition über die Europastraße bis zur Anschlußstelle Neu-Ulm-Mitte, die Bundesstraßen B28 und 30 bis Anschlußstelle Wiblingen und die Wiblinger Allee bis zum Ziel (Spedition Noerpel n19) in der Daimlerstraße.

Die Verteilfahrt 2 der Spedition Noerpel hat den folgenden Verlauf. Start in der Daimlerstraße und wie zuvor auf den erläuterten Streckenabschnitten zur Anschlußstelle Neu-Ulm-Mitte. Ladepunkt n20 in der Memminger Straße wird durch die Europastraße angefahren. Dann geht es wieder zurück auf die Europastraße bis zur Otto-Hahn-Straße und Ladepunkt n21. Anschließend auf der Europastraße zur Anschlußstelle Neu-Ulm-West und auf dem bekannten Weg zurück in die Daimlerstraße.

Die Verteilfahrt der Spedition Botzenhart und Bosch verläuft folgendermaßen. Beginn der Tour bei der Spedition in der Dornierstraße und Fahrt durch die Daimlerstraße und die Wiblinger Allee bis zur Anschlußstelle Wiblingen. Anschließend auf den Bundesstraßen B30 und 28 bis zur Anschlußstelle Neu-Ulm-Mitte. Dann geht es durch die Otto-Hahn-Straße in die Carl-Zeiss-Straße zum Ladepunkt b1 und zurück durch die Otto-Hahn-Straße, die Europastraße, die Reuttier Straße und die Jedelhauser Straße in die Gerlenhofer Straße zu Ladepunkt b2. Von dort verläuft die Verteilfahrt auf der Hausener Straße in die Memminger Straße, wo sich Ladepunkt b3 befindet. Die nächsten Ladepunkte sind in der Turmstraße (b4) und in der Industriestraße (b5). In der Folge geht die Tour über die Reuttier Straße und die Europastraße in die Otto-Hahn-Straße (b6). Ladepunkt b7 in der Leibnitzstraße wird wieder durch die Otto-Hahn-Straße angefahren. Im weiteren Streckenverlauf werden die Europastraße und der Pfaffenweg, die Zeppelinstraße (b8 und b9) sowie die Memminger Straße (b10) durchfahren. Danach erfolgt die Anfahrt des Ladepunkts b11 in der Ernst-Abbe-Straße über die Europastraße und die Otto-Hahn-Straße. Im Anschluß daran geht die Fahrt weiter durch die Europastraße, Otto-Hahn-Straße und die Reuttier Straße in die Finninger Straße zu Ladepunkt b12. Letzter Ladepunkt der Verteilfahrt ist dann Punkt b13 in der Otto-Hahn-Straße. Durch die Europastraße fährt der Lkw bis zur Anschluß-

stelle Neu-Ulm-Mitte, von wo aus die Tour über die Bundesstraßen B28 und 30 zurück in die Dornierstraße geht.

Diese drei Touren weisen insgesamt 4 gemeinsame Ladepunkte auf, die von beiden Speditionen angefahren werden.

Die Bündelung der 3 Touren ergibt 2 neue Touren mit der folgenden Reihenfolge der Ladepunkte. Tour 1 hat ihren Ursprung bei der Spedition Botzenhart und Bosch. Erstes Ziel der Fahrt ist die Spedition Noerpel. Anschließend folgen die Ladepunkte n8, n17, b4, b5, n1, n2, n3, n18, n12, b9, n6, n5, n14, n13, b7, n15, b13, b11, n16, b1, n12, n7, n4, n9, n10, n11, b2 und b3. Danach geht auf dem bekannten Weg zurück zur Spedition Botzenhart und Bosch.

Die gebündelte Verteilfahrt 2 hat ihren Startpunkt ebenfalls bei Botzenhart und Bosch, fährt aber nicht zu Noerpel, sondern sofort die Ladepunkte n20, b10, b8, n21 und b6 an. Anschließend erfolgt die Rückfahrt zu Botzenhart und Bosch.

Um weitere Aussagen zu den Wirkungen einer City-Logistik machen zu können sollen nun die gebündelten Verteilfahrten nicht mehr von der Spedition aus, sondern von zwei Güterverkehrszentren aus gefahren werden. Dazu wird die bestehende Verteilfahrt vor dem ersten Ladepunkt gekappt und die Strecke von der Spedition bis zu diesem Punkt durch die Strecke vom jeweiligen GVZ zu diesem Punkt ersetzt. Als Schnittstelle bietet sich hier die Anschlußstelle Neu-Ulm-Mitte an. Es sind also die Strecken von den GVZs bis zu dieser Schnittstelle zu ermitteln. Sowohl beim GVZ Güterbahnhof als auch beim GVZ Ulm-West wird dazu lediglich die Bundesstraße B10 befahren. Die abzuziehenden Strecken von den Speditionen bis zur Schnittstelle sind den Tourenverläufen der ungebündelten Verteilfahrten zu entnehmen.

5.2.1.2 Transit-Güterverkehr

Beim Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg bestehen für leichtes Stückgut, Wagenladung und Massengut keine Unterschiede bei den benutzten Routen. Daher ist es nicht notwendig die Routenbeschreibung nach Gütern aufgelöst durchzuführen. Die Transporte aller Güter in den Gegenrichtungen werden auf denselben Routen abgewickelt.

Für die Transitverbindung Mannheim-Ulm ist das Containerterminal in Mannheim der Ausgangspunkt. Bis zur Abfahrt Mannheim-Ludwigshafen wird die Bundesstraße B36 befahren bevor die Fahrt bis zur Anschlußstelle Mannheim-Neckarau auf der Bundesstraße B37 weitergeht. Anschließend verläuft die Route über die Bundesautobahn A656 bis zum Autobahnkreuz Heidelberg, wo auf die Bundesautobahn A5 gewechselt wird. Ab dem Autobahndreieck Karlsruhe geht

die Strecke über die Bundesautobahn A8 bis zur Anschlußstelle Ulm-West. Von dort führt die Bundesstraße B10 zum Containerterminal in Ulm. Die Eigenheit der Verbindung Mannheim-Ulm ist, daß für den Transport der Wagenladung und des Massenguts auf dem Abschnitt Mannheim bis Plochingen das Binnenschiff eingesetzt wird. Dadurch wird ein Lkw-Transport zwischen Plochingen und Ulm notwendig. Dieser hat seinen Start am Containerterminal im Plochinger Hafen und führt über die Otto-Konz-Brücken, die Landesstraßen L1250 und 1207 sowie die Bundesstraße B313 bis zur Anschlußstelle Wendlingen, wo auf die Bundesautobahn A8 gewechselt wird. Von da an verläuft die Route auf der Bundesautobahn A8 und der Bundesstraße B10 (ab der Anschlußstelle Ulm-West) bis zum Zielpunkt in Ulm.

Der lkw-seitige Transit von Mannheim nach Weil am Rhein startet am Containerterminal in Mannheim und führt über die Bundesstraße B36 zur Abfahrt Mannheim-Ludwigshafen. Anschließend geht die Route von der Anschlußstelle Mannheim-Neckarau auf der Bundesautobahn A656 bis zum Autobahndreieck Heidelberg, wo sie auf die Bundesautobahn A5 wechselt und bis zur Anschlußstelle Weil a. Rhein /Hünigen bleibt. Von dort geht sie auf der Bundesstraße B532 bis zum Containerterminal in Weil am Rhein.

Die Relation Ulm nach Lindau beginnt am Containerterminal in Ulm und führt auf der Bundesstraße B28 bis zum Autobahndreieck Hittistetten. Von dort wird die Bundesautobahn A7 bis zum Autobahnkreuz Memmingen befahren, um an dieser Stelle auf die Bundesautobahn A96 zu wechseln. Ab der Anschlußstelle Leutkirch-Süd befindet sich die Route bis zur Anschlußstelle Wangen-Nord auf der Bundesstraße B18. Ab diesem Punkt verläuft die Route wieder auf der Bundesautobahn A96 bis zur Anschlußstelle Lindau, wo für den Rest der Strecke bis zum Containerterminal Lindau auf die Bundesstraße B31 gewechselt wird. Im Rahmen dieser Transportaufgaben wird auch das Straßennetz des Landes Bayern befahren.

Die Transitroute von Stuttgart nach Singen hat ihre Quelle am Containerterminal in Stuttgart. Über die Otto-Konz-Brücken und die Bundesstraßen B10 und 14 wird bis zur Anschlußstelle Stuttgart-Vaihingen gefahren. Es folgt die Fahrt auf der Bundesautobahn A831 bis zum Autobahnkreuz Stuttgart und weiter auf der Bundesautobahn A81 bis zum Autobahnkreuz Hegau. Im Anschluß daran verläuft die Route auf den Bundesstraßen B33 (neu) und 34 bis zum Containerterminal in Singen.

5.2.1.3 Ländlich strukturierter Raum

Ländlich strukturierter Raum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)

Für den ländlich strukturierten Raum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) gibt es zwei Verkehrsmittelalternativen zur Erfüllung der sechs Transportaufgaben des leichten Stückguts. Die erste Möglichkeit besteht im Lkw-GVZ-Transport, der stets über das GVZ VS-Villingen durchgeführt wird. Die zweite Möglichkeit sieht vor, per Bahn (konventionell), ebenfalls unter Einbeziehung des GVZ VS-Villingen den Transport durchzuführen. Im Falle des Bahntransports wird ein Vorlauf mit dem Lkw vom Startpunkt zum dem dem Startpunkt nächst gelegenen Bahnhof, und ein Nachlauf vom dem dem Zielpunkt nächst gelegenen Bahnhof zum Zielpunkt notwendig.

Die erste Verteilfahrt führt vom GVZ VS-Villingen aus auf dem Straßennetz von VS-Villingen und die Bundesstraße B33 nach Bad Dürkheim, wo sie ebenfalls auf dem örtlichen Straßennetz und die Bundesstraße B27 bis zur Anschlußstelle VS-Schwenningen verläuft. Über das örtliche Straßennetz wird der Start- und Zielpunkt in VS-Schwenningen angefahren, von wo aus über die Anschlußstelle Schwenningen, die Bundesstraßen B 27 und 33 bis zum GVZ VS-Villingen gefahren wird.

Eine weitere Verteilfahrt geht mit Ausgangspunkt am GVZ VS-Villingen nach St. Georgen. Dazu wird die Bundesstraße B33 bis St. Georgen-Ost befahren, um anschließend zum Start- und Zielpunkt in St. Georgen zu gelangen. Im weiteren verläuft die Verteilfahrt über das örtliche Straßennetz in St. Georgen und die Landesstraße 175 (über Tennenbronn) wieder zum Start- und Zielpunkt St. Georgen. Über die Bundesstraße 33 wird anschließend das GVZ VS-Villingen wieder angefahren.

Wiederum vom GVZ VS-Villingen ausgehend setzt sich die Route der Verteilfahrt nach Donaueschingen wie folgt zusammen. Über die Bundesstraßen B33 und 27 wird zur Anschlußstelle Donaueschingen-Nord und über das örtliche Straßennetz und die Landesstraße L173 zum Start- und Zielpunkt in Donaueschingen gefahren. Anschließend geht die Route über die Landesstraßen L173, 171 und 181 (Hüfingen / Bräunlingen), die Bundesstraße B31, die Kreisstraßen K5753, 5749, die Bundesstraße B33 und die Landesstraße L180 bis zur Anschlußstelle Donaueschingen-Nord. Abschließend geht die Fahrt über die Bundesstraßen B27 und 33 zurück zum GVZ VS-Villingen.

Die Vor- und Nachläufe für die Bahntransporte des leichten Stückguts gehen von allen drei Start- und Zielpunkten zu dem jeweils nächst gelegenen Bahnhof.

Für die Fahrt vom Start- und Zielpunkt in Schwenningen zum Bahnhof VS-Schwenningen werden die Klippeneckstraße, die Lupfenstraße, die Burgstraße, die Talstraße sowie die Erzbergerstraße auf dem örtlichen Straßennetz von VS-Schwenningen befahren.

Die Fahrt vom Start- und Zielpunkt in Donaueschingen zum Bahnhof Donaueschingen verläuft über die Friedrich-Ebert-Straße und die Bahnhofstraße.

Um vom Start- und Zielpunkt St. Georgen zum Bahnhof St. Georgen zu gelangen wird lediglich die Industriestraße befahren.

Die Wagenladungstransporte finden ebenfalls zwischen allen drei Start- und Zielpunkten statt, wobei sie sich dadurch vom leichten Stückgut unterscheiden, daß nicht das GVZ VS-Villingen angefahren wird sondern die Fahrt direkt zwischen Start- und Zielpunkt verläuft.

Für den Transport von Schwenningen nach Donaueschingen wird neben den örtlichen Straßennetzen in VS-Schwenningen und Donaueschingen die Bundesstraße B27 genutzt.

Von VS-Schwenningen nach St. Georgen wird außer auf den örtlichen Straßennetzen auf den Bundesstraßen B 27 und 33 gefahren.

Gleiches gilt für die Verbindung Donaueschingen nach St. Georgen, wo sowohl die örtliche Straßennetze als auch die Bundesstraßen B 27 und 33 als Transportroute genutzt werden.

Die Transporte des Massenguts finden zwischen allen drei Start- und Zielpunkten und dem GVZ VS-Villingen statt.

Vom GVZ VS-Villingen nach St. Georgen wird die Bundesstraße B33 genutzt. Die Strecken nach Donaueschingen führt über die Bundesstraßen B33 und 27, ebenso wie diejenige nach VS-Schwenningen.

Wie schon zuvor erwähnt werden die Transporte, für alle Güter, in der Gegenrichtung auf denselben Routen abgebildet.

Ländlich strukturierter Raum Oberschwaben (Ravensburg)

Der Ablauf der Transporte des leichten Stückguts gestaltet sich im ländlich strukturierten Raum Oberschwaben (Ravensburg) in derselben Weise wie im ländlich strukturierten Raum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen). Der einzigen Unterschied besteht darin, daß bei den Bahntransporten, die als Quelle oder Ziel Ravensburg haben, der Vor- oder Nachlauf mit dem Lkw nicht vom Start- und Zielpunkt in Ravensburg zum Bahnhof Ravensburg, sondern direkt zum GVZ Ravensburg erfolgt.

Die Verteilfahrt vom GVZ Ravensburg nach Ravensburg bewegt sich ausschließlich auf dem örtliche Straßennetz und den Bundesstraßen B32 und 30, der Landesstraße L288 und den Kreisstra-

ßen K7975, 7981 und 7982. Dabei wird im Verlauf dieser Fahrt zweimal der Start- und Zielpunkt Ravensburg angefahren, bevor die Fahrt zurück zum GVZ Ravensburg geht.

Ausgehend vom GVZ Ravensburg führt die Verteilfahrt nach Meckenbeuren zuerst über die Bundesstraße B30 zum Start- und Zielpunkt in Meckenbeuren. Dort bewegt sich die Route auf dem Straßennetz der Gemeinde Meckenbeuren um anschließend über die Gemeinde Kehlen nach Friedrichshafen zu führen. Im Verlauf der Verteilfahrt im Bereich Friedrichshafen / Kluftern wird in zwei Fällen die Bundesstraße B31 genutzt. Von Friedrichshafen führt die Route über Kehlen zurück zum Start- und Zielpunkt in Meckenbeuren, wobei jeweils die örtliche Straßennetze befahren werden. Von Meckenbeuren verläuft die Route über die Bundesstraße B30 zurück zum GVZ Ravensburg.

Die Route für die Verteilfahrt vom GVZ Ravensburg nach Pfullendorf führt über die Landesstraßen L288, 201b und 201 (Ringenhäuser / Denkingen) zum Start- und Zielpunkt in Pfullendorf. Vom Gemeindestraßennetz in Pfullendorf geht die Route auf den Landesstraßen L268 und 194 nach Aach-Linz. Über die Landesstraßen L194, 280 (Ostrach), 279 (Tapfertsweiler) und 283 (Hohentengen) sowie die Bundesstraße B311 verläuft die Fahrt nach Mengen, wo sie sich auf dem örtlichen Straßennetz bewegt. Die Route verläßt Mengen auf der Bundesstraße B32 und geht auf der Bundesstraße B30 zurück zum GVZ Ravensburg.

Die für den Bahntransport des leichten Stückguts benötigten Vor- bzw. Nachläufe haben die folgenden Routenverläufe.

Von Pfullendorf zum Bahnhof Pfullendorf über die Landesstraße L268, von Meckenbeuren zum Bahnhof Meckenbeuren über die Dieselstraße, die Daimlerstraße, die Hauptstraße, die Lindberghstraße und die Bahnhofstraße. Der Transport von Ravensburg zum GVZ Ravensburg erfolgt über die Kapuzinerstraße, Georgstraße, Jahnstraße und Goethestraße.

Die Wagenladung wird wieder zwischen allen drei Start- und Zielpunkten befördert. Dadurch ergeben sich die folgenden Routen.

Von Ravensburg nach Pfullendorf über die Bundesstraße B33 und die Landesstraßen L288, 201b sowie 201.

Die Route von Ravensburg nach Meckenbeuren verläuft über die Bundesstraße B30 und das Gemeindestraßennetz in Meckenbeuren.

Die Relation Pfullendorf nach Meckenbeuren führt über die Landesstraßen L201, 207, 204, die Bundesstraße B33 und anschließend über eine weitere Landesstraße, die L329.

Der Ausgangspunkt der Massenguttransport liegt immer im GVZ Ravensburg und hat alle drei Start- und Zielpunkte zum Ziel.

Nach Pfullendorf bedeutet dies eine Route über die Landesstraßen L288, 201b und 201.

Das Ziel Meckenbeuren wird über die Bundesstraße B30 und das Gemeindestraßennetz in Meckenbeuren angefahren.

Die Fahrtroute für die Strecke vom GVZ Ravensburg nach Ravensburg ist mit dem für das leichte Stückgut beschriebenen Streckenverlauf identisch.

Die Gegenrichtungen für die beschriebenen Relationen folgen den genannten Streckenverläufe in umgekehrter Reihenfolge.

5.2.2 Energieaufwand und Emissionen

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, benötigt man zur Bestimmung der direkten Energieaufwendungen und direkten Emissionen:

- die genaue Fahrtstrecke, sprich die Route des Transports, für jedes Verkehrsmittel,
- Typ, Gewicht und Alter des eingesetzten Lkw,
- die Beladung des Lkw,
- die Straßenkategorie,
- den Verkehrsablauf sowie
- verschiedene weitere Streckenparameter.

Die Berechnungen des Energieaufwands und der antriebsbedingten direkten Emissionen stützen sich auf die Energieaufwands- und Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes /UBA, 1995/, die vom Lkw selbst (Typ, Gewicht, Alter), seiner Beladung, der Straßenkategorie (Autobahn, sonstige Außerortsstraßen, Innerortsstraßen), dem Verkehrsablauf (Geschwindigkeit) und von Streckenparametern (Steigung, Kurvigkeit) abhängig sind.

Nachdem die Routen ausführlich erläutert wurden, ist für den Fortgang des Verfahrens die Ermittlung der lkw- und straßenseitigen Eingangsdaten notwendig.

Die für die Transportaufgaben des leichten Stückguts eingesetzten Lkw wurden mit Hilfe einer Befragung von Speditionen ermittelt. Dabei wurde den Speditionen eine Fragebogen mit Vorgabe der Relation und des zu befördernden Guts zugeschickt. Im Detail enthielt der Fragebogen Fragen nach dem Fahrzeugtyp, dem Baujahr, dem Aufbau, dem zulässigen Gesamtgewicht, der zulässigen Nutzlast, dem Gewicht der zugestellten und abgeholt Güter, der Anzahl von Entlade- und Abholstellen, der Länge der gesamten Routen, der Länge zum letzten Anfahrpunkt, der Länge bis zu dem am weitesten entfernt liegenden Ladepunkt sowie der Transportkosten. Bei den betreffenden Speditionen wurde über dies hinaus noch nach den für den im Wagenladungsverkehr eingesetzten Fahrzeugen für Nah- und Fernverkehr gefragt. Die Fahrzeuge, die den Transport des Massenguts durchführen wurden anhand einer Nachfrage bei Kieswerken ermittelt.

Nach den vorliegenden Informationen werden die in der Tabelle 5.2-1 wiedergegebenen Lkw für die Transportaufgaben eingesetzt.

Tabelle 5.2-1: Zuordnung der Lkw-Typen zu den Transportaufgaben

Transportgut	Planungsraum	Lkw-Typ	zul. Gesamtgewicht [t]	Einsatzort
IS	S	Fiat 290 L	2,8	Spedition Steinle - Esslingen-Mettingen
IS	S	MB 210	2,8	Spedition Steinle - Oberaichen
IS	S	MB 210	2,8	Bahnhof Stgt.-Vaih - Oberaichen
IS	S	Fiat 290 L	2,8	Esslingen-Mettingen - GVZ Stgt.-Hafen.
IS	S	Renault AE 380	40	GVZ Stgt.-Hafen. - GVZ Bhf. Stgt.-Vaih.
IS	KA	MB 814	7,5	Spedition Vetter - Ettlingen
IS	KA	MB + Anh	5,5	Spedition Vetter - Wörth am Rhein
IS	KA	MB 814	7,5	Ettlingen-West - GVZ KA-Mitte
IS	KA	MB + Anh	5,5	GVZ Hafen KA - Wörth am Rhein
IS	KA	Renault AE 380	40	GVZ KA-Mitte - GVZ KA-Hafen
IS	FR	MAN VW	7,5	Spedition Streck - Staufen i. Br.
IS	FR	MAN 18 262	18	Spedition Streck - Lörrach
IS	FR	MAN VW	7,5	Staufen i. Br. - GVZ Freiburg i. Br.
IS	FR	MAN 18 262	18	Lörrach - GVZ Weil am Rhein
IS	FR	Renault AE 380	40	GVZ Weil am Rhein - GVZ Freiburg i. Br.
IS	UL	IVECO 145-17	14,5	Spedition Botzenhart und Bosch, CLOU
IS	UL	IVECO	11	Spedition Noerpel, CLOU
IS	Transit	Renault AE 380	40	Fernverkehr, alle Relationen
IS	VS	MB	7,5	GVZ VS Villingen - Schwenningen
IS	VS	MAN	15	GVZ VS Villingen - St. Georgen
IS	VS	MAN	15	GVZ VS Villingen - Donaueschingen
IS	VS	Fiat 290 L	2,8	Schwenningen - Bhf. Schwenningen
IS	VS	Fiat 290 L	2,8	Donaueschingen - Bhf. Donaueschingen
IS	VS	Fiat 290 L	2,8	St. Georgen - Bhf. St. Georgen
IS	RV	MB 814	7,5	GVZ Ravensburg - Meckenbeuren
IS	RV	MB 1420	14	GVZ Ravensburg - Pfullendorf
IS	RV	MB 809	7,5	GVZ Ravensburg - Ravensburg
IS	RV	Fiat 290 L	2,8	Meckenbeuren - Bhf. Meckenbeuren
IS	RV	Fiat 290 L	2,8	Pfullendorf - Bhf. Pfullendorf
WL 25	Transit	MB 2235	40	Transit Pritsche alle Relationen
WL 15	Transit	MB 2235	40	Transit Pritsche alle Relationen
WL 25	Transit	Renault AE 380	40	Transit Container Ulm - Mannheim
WL 15	Transit	Renault AE 380	40	Transit Container Ulm - Mannheim
WL 25	VS / RV	MB 2435	40	Land Pritsche alle Relationen
WL 15	VS / RV	MB 2435	40	Land Pritsche alle Relationen
M 15	Alle	MB 1735 K	25	Alle
M 15	S, KA, FR	MB 2334 K 8x4	32	Abrollcontainer

Legende: Ballungsräume S...Stuttgart, KA...Karlsruhe, FR...Oberrhein
Ländlich strukturierte Räume VS...Schwarzwald, RV...Oberschwaben

Die Beladung im Fall des Stückguttransports wurde durch die Befragung von Speditionen ermittelt. Die Beladung im Fall des Wagenladungs- und Massenguttransports ergibt sich direkt aus dem Ladungsgewicht.

Aus den Informationen zur Beladung und zum eingesetzten Lkw ergibt sich die Auslastung des Transportfahrzeugs bei der Erfüllung der Transportaufgabe.

Eine wichtige Randbedingung für die Ermittlung der Auslastung beim Transport des leichten Stückguts ist, ob es sich um eine Verteilfahrt in den Ballungsgebieten, den ländlich strukturierten Räumen oder eine Fahrt im Fernverkehr handelt. Für die Verteilfahrten kann aufgrund der ständig wechselnden Auslastung durch Be- und Abladen an den Haltepunkten keine konkrete Auslastung angegeben werden, sondern muß mit dem Begriff "wechselnd" bezeichnet werden.

Tabelle 5.2-2 faßt die Auslastungen der Lkws in Abhängigkeit vom Transportgut zusammen.

Tabelle 5.2-2: Transportgut und Auslastung des Lkw

Transportgut		Auslastung
leichtes Stückgut	5 kg	- 60 % im Fernverkehr - "wechselnd" bei Verteilfahrten in den Ballungsgebieten und den ländlich strukturierten Räumen
Wagenladung	0 t	0 %
	15 t	60 %
	25 t	100 %
Massengut	0 t	0 %
	15 t	100 % *

* Eine Ausnahme bildet der Lkw-Transport des Massenguts im Abrollcontainer in den Ballungsgebieten. Dort beträgt die Auslastung aufgrund des eingesetzten Lkw 87 %.

Nach Art und Gewicht erfolgt eine Unterteilung der Lkw in die Klassen Solo-Lkw unter 7,5 t, Solo-Lkw zwischen 7,5 und 14 t, Solo-Lkw zwischen 14 und 20 t, Solo-Lkw über 20 t, Lastzüge unter 20 t Lastzüge zwischen 20 und 28 t, Lastzüge zwischen 28 und 32 t, Lastzüge zwischen über 32 t, Sattelzüge unter 32 t und Sattelzüge über 32 t. Diese zehn Klassen definieren jeweils in Verbindung mit dem Baujahr (vor 1986, nach 1986) zwanzig sogenannte Fahrzeugschichten.

Die zuvor beschriebene Routen werden in einzelne Abschnitte aufgeteilt, deren Länge von einigen Metern bis zu wenigen Kilometern reicht. Ein neuer Abschnitt beginnt immer dann, wenn bei einem der genannten streckenspezifischen Parameter eine Änderung auftritt. Jedem dieser Abschnitte wird eines der im Handbuch für Emissionsfaktoren /UBA, 1995/ ausgewiesenen Fahrmuster zugewiesen. Diese Fahrmuster werden über Angaben zur Ortslage, Fahrstreifenan-

zahl, Art der Richtungstrennung, Kurvigkeit, Kurvenanteil, Geschwindigkeit und ggf. Ausbausituation der Straße definiert.

Die Straßenkategorie und die Streckenparameter werden direkt aus der Straßendatenbank des Landes Baden-Württemberg entnommen. Die zur Beschreibung des Verkehrsablaufs notwendigen Größen werden aus den entsprechenden Angaben, die ebenfalls der Straßendatenbank des Landes Baden-Württemberg entnommen werden können, berechnet.

Die Energieaufwands- und Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes /UBA, 1995/ weisen je der Kombination aus Fahrzeugschicht, Beladung, Fahrmuster und Längsneigung einen spezifische Kraftstoffverbrauch in g/km, und für jeden Schadstoff eine spezifische Emission in g/km zu. Diese spezifischen Verbrauchs- und Emissionswerte werden mit der Länge des Abschnitts multipliziert. So erhält man den Energieaufwand und die Emissionen auf einem Abschnitt. Der Energieaufwand und die Emissionen einer Fahrt ergeben sich aus der Summe der Energieaufwände und der Emissionen auf allen bei dieser Fahrt befahrenen Streckenabschnitten.

Der Energieaufwand und die Emissionen einer Fahrt müssen den mit dem Fahrzeug transportierten Gütern zugeordnet werden. Beim Wagenladungs- und Massenguttransport wird der Energieaufwand der Fahrt, da der Lkw allein mit diesem beladen ist, vollständig dem Transportgut zugeordnet. Die Berechnung des dem untersuchten Stückgut anzurechnenden Anteils der Energieaufwands bzw. der Emissionen erfolgt mit der nachfolgend beschriebenen Vorgehensweise auf der Basis der Verkehrsleistung. Insgesamt verursacht eine Verteilfahrt die Verkehrsleistung T_0 [tkm]. Dabei befindet sich das untersuchte Stückgut mit dem Gewicht m [t] auf einer Strecke l [km] dieser Fahrt im Fahrzeug. Somit verursacht dieses Stückgut eine Verkehrsleistung $T = m * l$ [tkm] und es kann ihm somit der Anteil T / T_0 des Energieaufwands und der Emissionen der gesamten Verteilfahrt zugeordnet werden.

Die endgültige Berechnung der umwelt- und klimarelevanten Wirkungen von Lkw-Fahrten erfolgt mittel eines am Institut für Straßen- und Verkehrswesen entwickelten Programms. Die Anforderung an das Programm war dabei so formuliert, daß auf der Basis von Schadstoffemissions- und Verbrauchsfaktoren des Umweltbundesamts für unterschiedliche Klassen von Straßen und Lkw die Berechnungen erfolgen sollen. Dabei soll in einem ersten Modul auf die schon erwähnten Daten aus der Straßendatenbank des Landes Baden-Württemberg zurückgegriffen werden. Ein zweites Modul soll aus den Schadstoffemissions- und Kraftstoffverbrauchsfaktoren, den Straßendaten und weiteren Daten zum Verkehrsablauf den Energieverbrauch und die Emissionen berechnen. Ein drittes Modul soll die Ergebnisse in einem zur Weiterverarbeitung geeigneten Datenformat wiedergeben.

Die Parameter, die mittels des ersten Moduls aus der Straßendatenbank herausgefiltert werden, sind:

- die Längsneigung, die Anzahl der Fahrbahnen und Fahrstreifen pro Richtung, Ortslage (innerorts bzw. außerorts), Straßentyp (Autobahn oder andere), DTV, Lkw-Anteil und Seehöhe,
- Abschnittslänge und Kurvigkeit,
- Daten zur Bestimmung der Linienführungsklasse.

Die unter dem ersten Spiegelstrich genannten Parameter werden direkt aus der Straßendatenbank entnommen, wohingegen die Abschnittslänge und die Kurvigkeit aus einzelnen Datensätzen zu berechnen sind. Die Abschnittslänge ergibt sich hierbei aus der Differenz zwischen den Stationierungen. Die Kurvigkeit in gon/km gemessen ist das $200/\pi$ - fache des Radius in km. Ist aus der Straßendatenbank nicht ersichtlich, ob es sich um einen Radius oder eine Gerade handelt, so ist das arithmetische Mittel der aus den beiden Stoßradien resultierenden Kurvigkeit zu benutzen. Kurven mit einem Radius über 500 m gelten als gerade Strecken. Die Linienführungsklasse wird anhand des Kurvenanteils bestimmt, der nur aus zusammengeführten Datensätzen berechnet werden kann.

Das zweite Modul dient der Berechnung des Energieverbrauchs und der Schadstoffemissionen. Im einzelnen besteht die Berechnung aus den folgenden Schritten:

1. Berechnung des Fahrmusters für einbahnige Außerortsstraßen, Innerortsstraßen und Autobahnen bei Stau aus Straßendaten und Fremddaten
 - 1.1 einbahnige Außerortsstraßen und Autobahnen bei Stau
 - 1.1.1 Berechnung der Linienführungsklasse gemäß /UBA, 1994/ aus den Straßendaten
 - 1.1.2 Berechnung des Fahrmusters gemäß /UBA, 1994/ aus Linienführungsklasse, Abschnittslänge und Längsneigung
 - 1.2 Ortsdurchfahrten einbahniger Außerortsstraßen
 - 1.2.1 Berechnung der Linienführungsklasse gem. gemäß /UBA, 1994/ aus den Straßendaten
 - 1.2.2 Berechnung des Fahrmusters gemäß /UBA, 1994/ aus Linienführungsklasse und Anbausituation

- 1.3 Innerortsstraßen
 - 1.3.1 Für Flächenquellen Benutzung des Fahrmusters 1
 - 1.3.2 Für Linienquellen Berechnung des Fahrmusters gemäß /UBA, 1994/ aus Betriebsweise, Straßentyp, Lage und Anbausituation
- 1.4 Stau
 - 1.4.1 innerorts und auf einbahnigen Außerortsstraßen Benutzung des Fahrmusters STGOIO (Stop-and-Go-innerorts)
 - 1.4.2 auf Autobahnen Benutzung des Fahrmusters STGOAB (Stop-and-Go-Autobahn)
- 2. Berechnung der Geschwindigkeit aus Straßendaten, Fremddaten und Fahrzeugtyp
 - 2.1 Berechnung der aufgrund der Verkehrsverhältnisse möglichen Geschwindigkeit aus Straßendaten und Fremddaten
 - 2.1.1 Berechnung des RAS-W-Typs gemäß /FGSV, 1986/ aus den Straßendaten
 - 2.1.2 Berechnung der Verkehrsstärken aus Verkehrsstärkeganglinien, Lkw-Anteil und DTV
 - 2.1.3 Berechnung der aufgrund der Verkehrsverhältnisse möglichen Geschwindigkeit aus RAS-W-Typ, Längsneigung, Verkehrsstärken und Kurvigkeit gemäß /FGSV, 1986/
 - 2.2 Berechnung der aufgrund der Motorisierung möglichen Geschwindigkeit aus Längsneigung und Fahrzeugtyp
 - 2.3 Berechnung der Geschwindigkeit als Minimum den in 2.1 und 2.2 berechneten Geschwindigkeiten sowie aus Geschwindigkeitsbeschränkungen und Geschwindigkeit im Stau gem. /FGSV, 1986/.
- 3. Entnahme der Emissionsfaktoren aus der entsprechenden Datei gemäß der Matrix der Lkw-Schichten
- 4. Berechnung der Emissionen pro Kilometer aus Straßendaten, Fahrmuster, Geschwindigkeit und Emissionsfaktoren

- 4.1 Für Innerortsstraßen, einbahnige Außerortsstraßen und Autobahnen bei Stau Entnahme der Grundwerte für das in 1. berechnete Fahrmuster aus den Emissionsfaktoren
- 4.2 Für Autobahnen Entnahme der Grundwerte für die in 2. berechnete Geschwindigkeit aus den Emissionsfaktoren
- 4.3 Bei Stau Entnahme des Stop-And-Go-Faktors und Multiplikation des Grundwerts mit demselben
- 4.4 Für Innerortsstraßen, einbahnige Außerortsstraßen und Autobahnen bei Stau Berechnung des Längsneigungsfaktors aus der Längsneigung und dem in 1. berechneten Fahrmuster
- 4.5 Für Autobahnen Berechnung des Längsneigungsfaktors aus der Längsneigung und der in 2. berechneten Geschwindigkeit
- 4.6 Berechnung des Höhenfaktors aus der Seehöhe und dem Fahrzeugtyp gem. /TÜV Rheinland, 1993/
- 4.7 Berechnung des Kaltstartzuschlags gem. /TÜV Rheinland, 1993/ aus der Weglänge und dem Fahrzeugtyp
- 4.8 Berechnung der Emissionen pro Kilometer aus
Grundwert * Längsneigungsfaktor * Höhenfaktor.
- 4.9 Berechnung der gesamten Emissionen auf einem Abschnitt aus
Emissionen pro Kilometer * Länge des Abschnitts + Kaltstartzuschlag.
5. Aufsummierung der Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbräuche des Lkw auf allen Abschnitten der Fahrt.
6. Feststellung der Startzeit durch "Zurückrechnen" vom Ankunftszeitpunkt

Im dritten Modul erfolgt die Ausgabe der aus den Berechnungen gewonnenen Daten. Sie umfaßt sämtliche Eingabedaten mit Ausnahme der Straßendaten und der Emissionsfaktoren. Angegeben werden der Abfahrtszeitpunkt der Fahrt, die bei der Fahrt aufgetretenen Schadstoffemissionen CO, HC, NO_x, Staub/Partikel, CO₂ und der anfallende Kraftstoffverbrauch.

Die folgenden Abbildungen sollen einen Überblick zu den Berechnungen der Emissionen für eine Fahrt bieten.

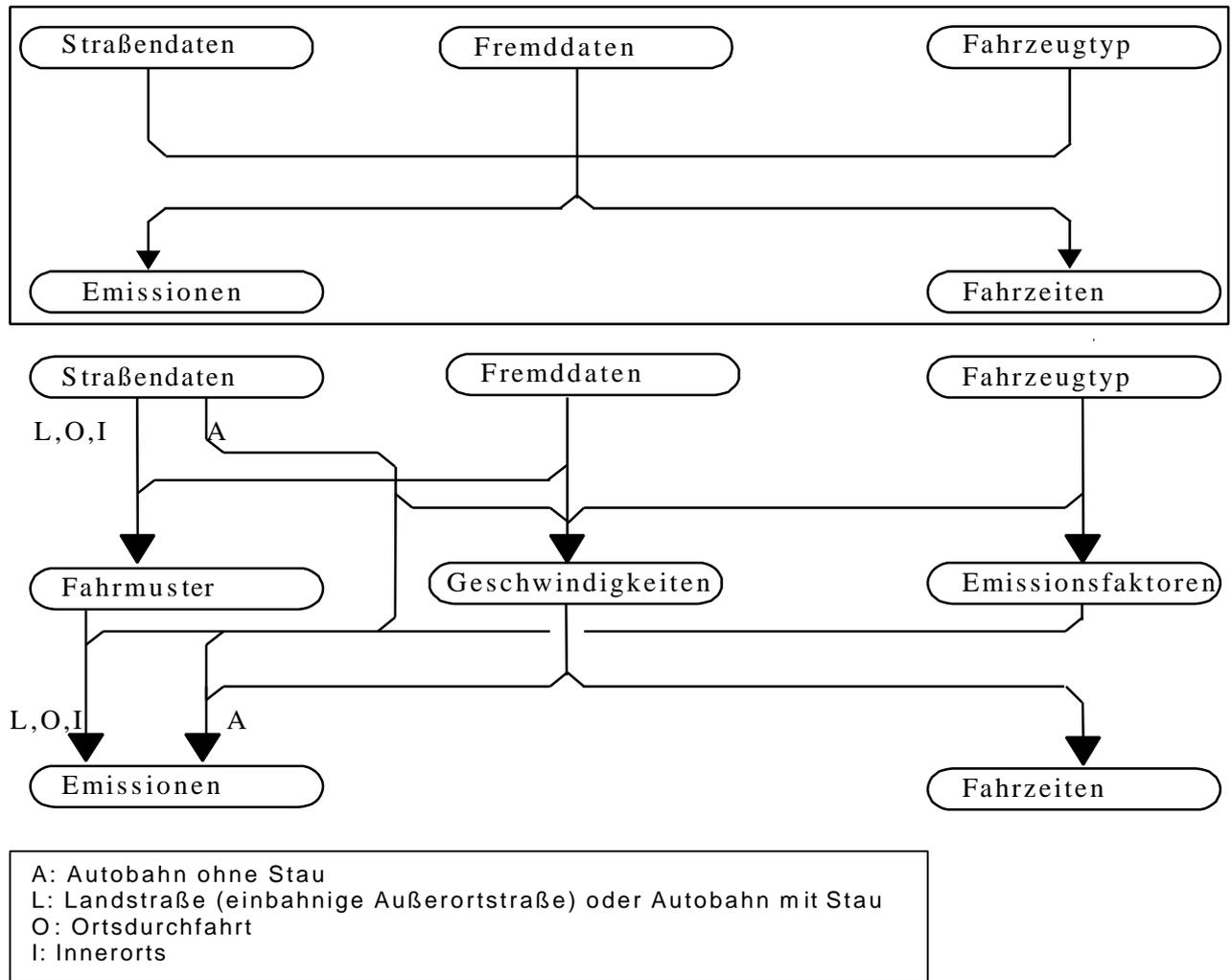


Abbildung 5.2-1: Berechnung der Emissionen auf einem Abschnitt der Fahrt

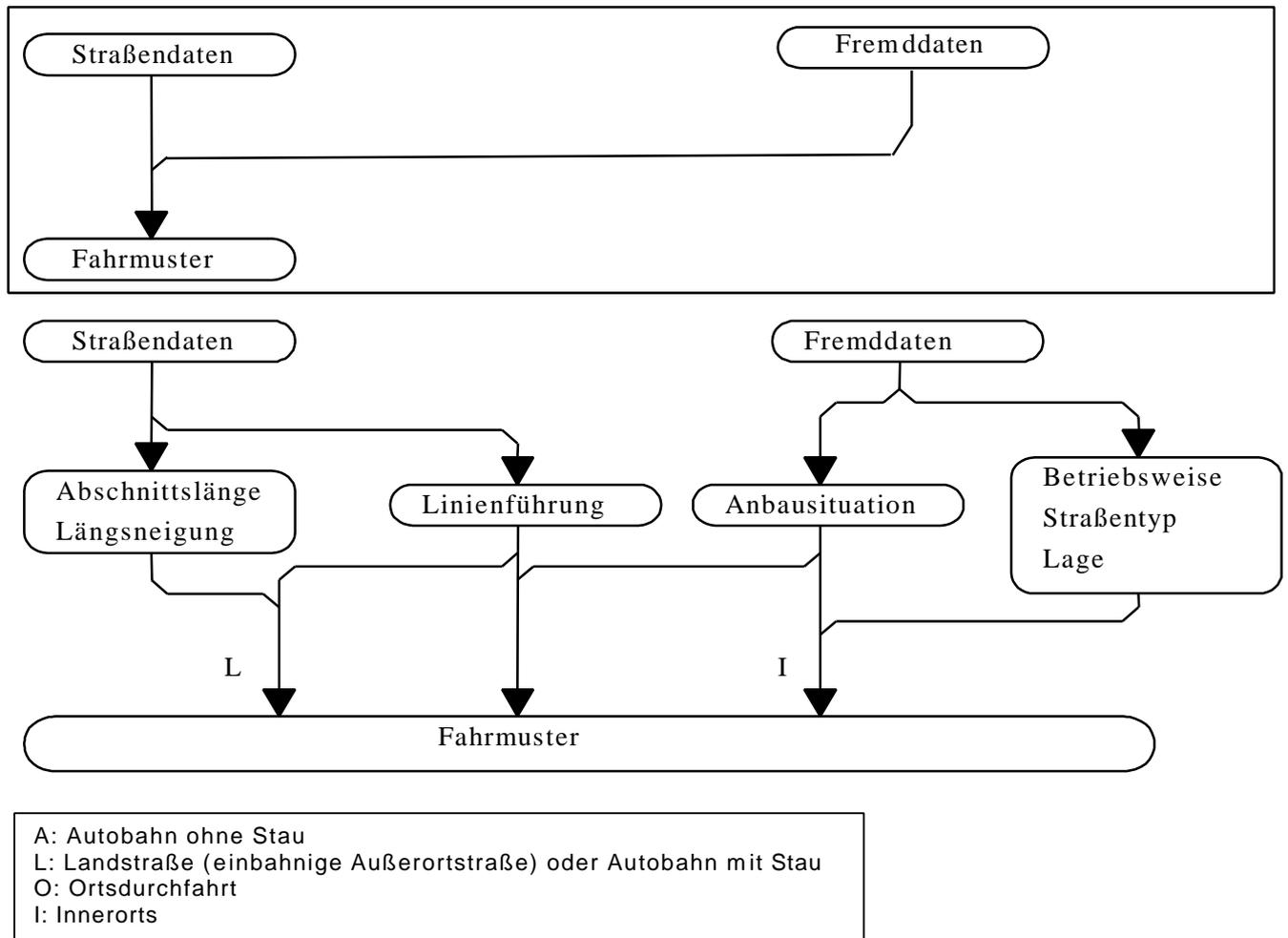


Abbildung 5.2-2: Berechnung der Fahrmuster gemäß /UBA,1994/

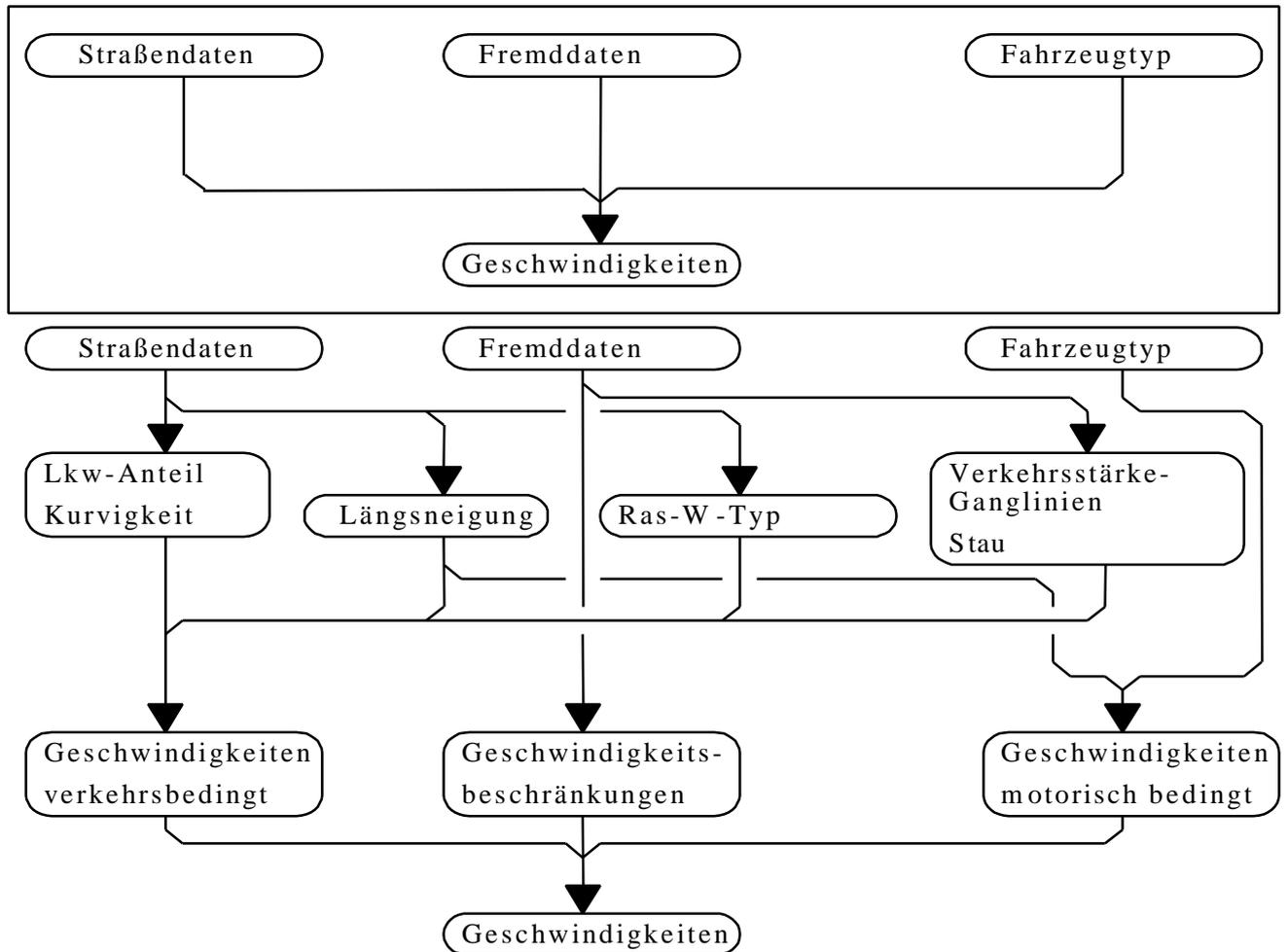


Abbildung 5.2-3 Berechnung der Geschwindigkeit gemäß /FGSV, 1986/

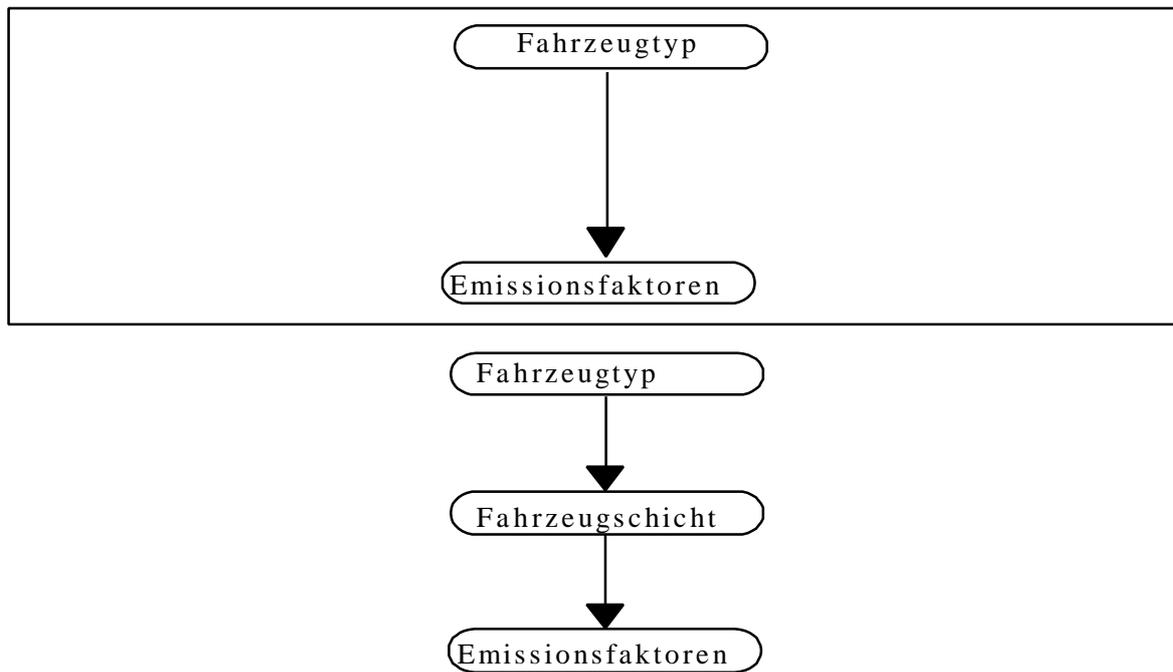
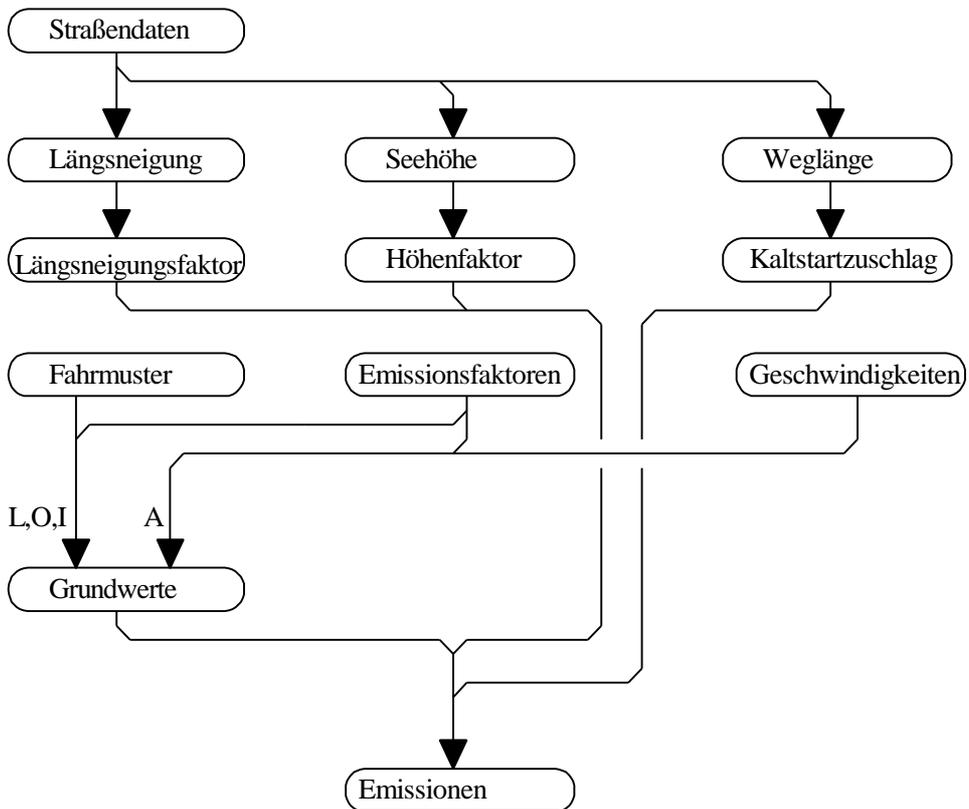
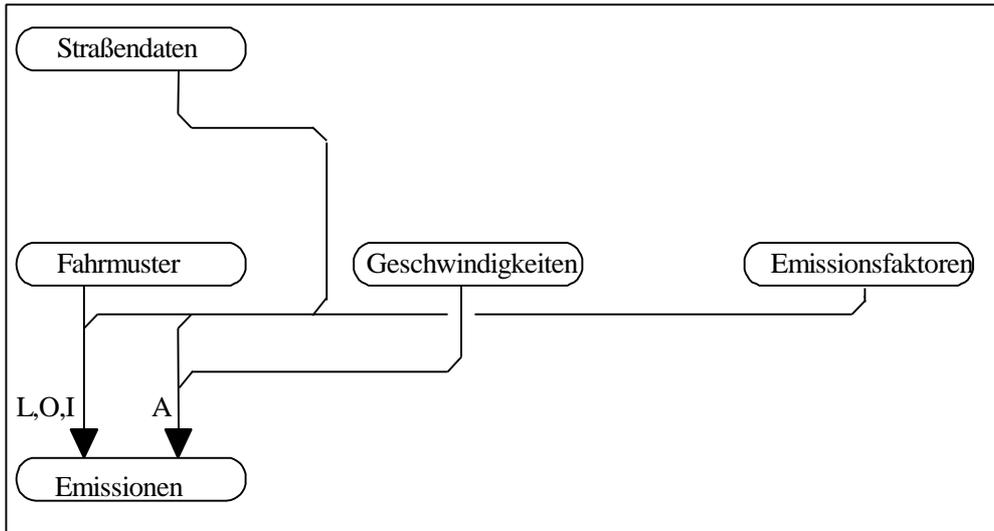


Abbildung 5.2-4: Berechnung der Emissionsfaktoren gemäß /TÜV Rheinland, 1993/



A: Autobahn ohne Stau
 L: Landstraße (einbahnige Außerortstraße) oder Autobahn mit Stau
 O: Ortsdurchfahrt
 I: Innerorts

Abbildung 5.2-5: Berechnung der Emissionen gemäß /TÜV Rheinland, 1993/

5.2.3 Zeit und Kosten

Die Fahrzeit ist ein Bestandteil der Ergebnisse aus der Berechnung der Kraftstoffverbräuche und der Emissionen. Sie errechnen sich aus den mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten auf den einzelnen Streckenabschnitten der Transportrouten. Die mittleren Geschwindigkeiten sind durch das dem Streckenabschnitt zugrundegelegte Fahrmuster vorgegeben. Als weitere Zeitanteile gehen in die Berechnungen Umschlags- und organisationsbedingte Zeiten ein.

Der Ablauf des Stückguttransports, ausgenommen im Fernverkehr, ist immer dadurch geprägt, daß er aus Verteilfahrten zusammengesetzt ist. Dies bedeutet, daß das Gut vom Start- zum Zielpunkt nur mittels Umschlägen bei der Spedition, am Bahnhof oder im GVZ befördert wird. Die Summe der Zeit für den Transport setzt sich demzufolge aus der Fahr- und Ladezeit der Verteilfahrten, ggf. der Fahrzeit des Hauptlaufs, der Umschlagzeiten bei der Spedition, am Bahnhof oder im GVZ und Warte- bzw. eventuell Ruhezeiten zusammen. Bei den Ballungsgebieten ist es aufgrund der Entfernungen jedoch nicht erforderlich Ruhepausen des Fahrers zu berücksichtigen. Wartezeiten entstehen dadurch, daß das für den Weitertransport verantwortliche Verkehrsmittel noch auf die Ankunft anderer Güter wartet, oder kommen dadurch zustande, daß zuerst andere Güter aus- bzw. verladen werden. Für die Transporte, die über die Speditionshöfe gehen, wird angenommen, daß das Stückgut um 16.00 Uhr am Startpunkt abgeholt und am nächsten Vormittag um 10.00 Uhr zugestellt wird. Der Umschlag auf dem Speditionshof findet entweder zwischen 18.00 und 20.00 Uhr abends oder 6.00 und 8.00 Uhr morgens statt. Die gesamte Transportdauer für einen Transport "Lkw-Spedition" in den Ballungsgebieten Stuttgart, Karlsruhe und Oberrhein beläuft sich somit auf 18 Stunden. Gleiches gilt für die Transporte, die über die GVZ in den Ballungsgebieten abgewickelt werden. Es kommt hierbei zu einem Vorlauf, d.h. einer Sammelfahrt durch die Spediton, in deren Verlauf das besagte Gut eingeladen wird. Am GVZ angekommen wird alles ausgeladen und auf die zum Ziel-GVZ führenden Hauptläufe verteilt. Am Ziel-GVZ wird das Stückgut von einem Verteil-Lkw der Spedition aufgenommen und bis zum Zielpunkt transportiert. Im Vergleich zum Transport über den Hof der Spedition sind hierbei also zwei Umschläge notwendig. Daraus ergibt sich, daß bei einer konstanten Transportzeit von 18 Stunden, sich die möglichen Organisationszeiten verringern.

Außer in den Ballungsgebieten finden jedoch auch in den ländlich strukturierten Räumen Verteilfahrten des leichten Stückguts statt. Hierbei wird nur von den Startpunkten zum zentralen GVZ oder dem nächstgelegenen Bahnhof - im Fall des Nachlaufs umgekehrt - gefahren. Die Zusammensetzung der gesamten Transportzeit erfolgt in der gleichen Weise wie schon zuvor in den Ballungsgebieten. Für den Fall des reinen Lkw-Transports über das GVZ entsteht somit der gleiche Zeitaufwand von 18 Stunden. Der konventionelle Bahntransport hingegen besitzt 3 Umschlagspunkte. Demzufolge ist die Transportzeit davon abhängig zu welchen Zeiten die den

Start- und Zielpunkten jeweils nächsten Bahnhöfe geöffnet sind. Durch Rückrechnung der vorgegebene Ankunftszeit am Zielort von 10.00 Uhr vormittags ergibt sich Anfangszeit des Transports. Dabei fällt ins Gewicht, wann der startnächste Bahnhof seine Pforten zur Annahme schließt, unter welchen zeitlichen Randbedingungen der Umschlag im GVZ erfolgt und wann der zielnächste Bahnhof morgens öffnet.

Die Transportzeit für das leichte Stückgut im Transitverkehr ergibt sich, da keine Vor- und Nachläufe sowie Umschläge zu beachten sind, aus den Fahrzeiten zwischen den Start- und Zielpunkten.

Bei den Transporten in den Ballungsräumen und den ländlich strukturierten Räumen gilt: Für die Zeitaufwendungen durch Umschläge wird gemäß /Steierwald, Voß, Voß, 1993/ ein Wert von 2 Stunden in Ansatz gebracht. Die Organisationzeit des Transport ergibt sich somit aus der Differenz der gesamten Transportzeit und der Fahr-, Umschlagzeit.

Tabelle 5.2-2 enthält alle Fahrzeiten auf den im Stückgutverkehr befahrenen Relationen.

Tabelle 5.2-2: Berechnete Fahrzeiten im Stückgutverkehr

Planungsraum	Relation	Fahrzeit [min]
Stuttgart	Spedition Steinle - Esslingen-Mettingen	67
Stuttgart	Spedition Steinle - Oberaichen	110
Stuttgart	Bahnhof Stuttgart-Vaihingen - Oberaichen	8
Stuttgart	Esslingen-Mettingen - GVZ Stuttgart-Hafen.	3
Stuttgart	GVZ Stuttgart-Hafen. - GVZ Bahnhof Stuttgart-Vaihingen	32
Karlsruhe	Spedition Vetter - Ettlingen	45
Karlsruhe	Spedition Vetter - Wörth am Rhein	29
Karlsruhe	Ettlingen-West - GVZ Karlsruhe-Mitte	26
Karlsruhe	GVZ Hafen Karlsruhe - Wörth am Rhein	10
Karlsruhe	GVZ Karlsruhe-Mitte - GVZ Karlsruhe-Hafen	10
Oberrhein	Spedition Streck - Staufen im Breisgau	98
Oberrhein	Spedition Streck - Lörrach	157
Oberrhein	Staufen im Breisgau - GVZ Freiburg im Breisgau	108
Oberrhein	Lörrach - GVZ Weil am Rhein	67
Oberrhein	GVZ Weil am Rhein - GVZ Freiburg im Breisgau	54
Ulm	Verteilfahrt Botzenhart und Bosch ungebündelt	81
Ulm	Verteilfahrt Spedition Nörpel 1 ungebündelt	66
Ulm	Verteilfahrt Spedition Nörpel 2 ungebündelt	24
Ulm	CLOU Fahrt 1	73
Ulm	CLOU Fahrt 2	29
Ulm	CLOU GVZ Gbf. Fahrt 1	64
Ulm	CLOU GVZ Gbf. Fahrt 2	20
Ulm	CLOU GVZ Ulm-West Fahrt 1	75
Ulm	CLOU GVZ Ulm-West Fahrt 2	31
Schwarzwald	GVZ VS Villingen - Schwenningen	73
Schwarzwald	GVZ VS Villingen - St. Georgen	93
Schwarzwald	GVZ VS Villingen - Donaueschingen	78
Schwarzwald	Schwenningen - Bahnhof Schwenningen	5
Schwarzwald	Donaueschingen - Bahnhof Donaueschingen	3
Schwarzwald	St. Georgen - Bahnhof St. Georgen	3
Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Meckenbeuren	117
Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Pfullendorf	160
Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Ravensburg	94
Oberschwaben	Meckenbeuren - Bahnhof Meckenbeuren	3
Oberschwaben	Pfullendorf - Bahnhof Pfullendorf	2
Transit	Mannheim - Ulm	200
Transit	Mannheim - Basel	223
Transit	Ulm - Lindau	87

Transit	Stuttgart - Singen	131
---------	--------------------	-----

Die Wagenladung wird in den ländlich strukturierten Räume und auf den Transitverbindungen direkt vom Start- zum Zielpunkt ohne weitere Umschläge (Ausnahme Mannheim - Ulm) befördert. Die Transportzeit besteht also lediglich aus der Fahrzeit. Auch hier sind die Fahrzeiten nicht so lang, daß Ruhepausen zu berücksichtigen wären. Die Tabelle 5.2-3 enthält die Informationen zu den Fahrzeiten.

Tabelle 5.2-3: Berechnete Fahrzeiten im Wagenladungsverkehr

Planungsraum	Relation	Fahrzeit 25 t / 15 t / 0 t [min]
Schwarzwald	Villingen-Schwenningen - Donaueschingen	24 / 24 / 23
Schwarzwald	Villingen-Schwenningen - St. Georgen	29 / 29 / 28
Schwarzwald	Donaueschingen - St. Georgen	35 / 34 / 34
Oberschwaben	Ravensburg - Meckenbeuren	20 / 18 / 17
Oberschwaben	Ravensburg - Pfullendorf	45 / 44 / 43
Oberschwaben	Meckenbeuren - Pfullendorf	57 / 56 / 55
Transit	Mannheim - Ulm	201 / 200 / 200
Transit*	Plochingen - Ulm*	63 / 63 / 63
Transit	Mannheim - Basel	224 / 223 / 221
Transit	Ulm - Lindau	88 / 87 / 87
Transit	Stuttgart - Singen	132 / 131 / 131

* Auf der Relation Mannheim - Ulm wird zwischen Mannheim und Stuttgart-Plochingen das Binnenschiff eingesetzt. Daraus ergibt sich ein gebrochener Transport, der zwischen Plochingen und Ulm mit dem Lkw fortgesetzt wird.

Für die Massenguttransporte gelten im Wesentlichen die Erläuterungen für die Wagenladung. Die Lkw-Transporte des Massenguts werden ohne Umschlag zwischen einem GVZ (Ballungsgebiete), dem zentralen GVZ (ländlich strukturierte Räume), dem Startpunkt und den Zielpunkten durchgeführt (1 in den Ballungsgebieten, 3 in den ländlich strukturierten Räumen, 1 beim Transit). Eine Überblick zu den Transportzeiten, die wieder maßgeblich aus den Fahrzeiten bestehen gibt die Tabelle 5.2-4.

Tabelle 5.2-4: Berechnete Fahrzeiten im Massengutverkehr

Planungsraum	Relation	Fahrzeit 0 t / 15 t [min]
Stuttgart	Stuttgart-Hafen - Oberaichen	24 / 27
Stuttgart	Bhf. Stuttgart-Vaihingen - Oberaichen (Abrollcontainer)*	9 / 9
Karlsruhe	Karlsruhe-Hafen - Ettlingen-West	11 / 12
Karlsruhe	Karlsruhe-Mitte - Ettlingen-West (Abrollcontainer)*	15 / 15
Oberrhein	Hafen-Weil am Rhein - Staufen im Breisgau	39 / 39
Oberrhein	Freiburg i. Br. - Staufen i. Br. (Abrollcontainer)*	28 / 32
Schwarzwald	GVZ VS Villingen - Donaueschingen	20 / 21
Schwarzwald	GVZ VS Villingen - St. Georgen	17 / 18
Schwarzwald	GVZ VS Villingen - Schwenningen	15 / 16
Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Meckenbeuren	17 / 20
Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Pfullendorf	42 / 45
Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Ravensburg	4 / 7
Transit	Mannheim - Ulm	200 / 201
Transit**	Plochingen - Ulm**	63 / 63
Transit	Mannheim - Basel	221 / 224
Transit	Ulm - Lindau	87 / 88
Transit	Stuttgart - Singen	131 / 132

* In den Ballungsgebieten wird das Massengut neben dem konventionellen Lkw bzw Bahntransport noch mit dem Abrollcontainer befördert. Dadurch entsteht ein gebrochener Transport, der mit dem Lkw und der Bahn durchg e-führt wird.

** Auf der Relation Mannheim - Ulm wird zwischen Mannheim und Stuttgart-Plochingen das Binnenschiff eingesetzt. Daraus ergibt sich ein gebrochener Transport, der zwischen Plochingen und Ulm mit dem Lkw fortgesetzt wird.

Die Transportkosten wurden zum Teil bei den Speditionen erfragt oder mittels der kostenorientierten Unverbindlichen Richtpreistabellen für den Güternahverkehr (KURT), Stand 1995, berechnet. Für den Fernverkehr dienten die Güterfern-Verkehrs-Empfehlungen (GVE), Stand September 1994, als Grundlage der Kostenermittlung. Die KURT werden nach Angaben des Bundesverbandes des Deutschen Güternahverkehrs e.V. (BDN) von rund 70 % der Unternehmen als wiederholte oder ständige Preisbildungsgrundlage genutzt. Die GVE, als nichtamtlicher Nachfolger des Güterverkehrstarifs - GFT, stellen seit der Abschaffung der bundesdeutschen Güterverkehrstarife durch das Tarifaufhebungsgesetz am 31.12.1993 die unverbindlichen Frachtvereinbarungstabellen für den Güterfernverkehr dar.

Die ermittelten Kosten sind in der Tabelle 5.2-5 dargestellt.

Tabelle 5.2-5: Transportkosten der Transportaufgaben des Lkw

Transportgut	Planungsraum	Relation	Transportkosten [DM]
IS	Stuttgart	Esslingen-Mettingen - Oberaichen	28,95 / 31,30
M	Stuttgart	GVZ Stuttgart-Hafen - Oberaichen	106,61
IS	Karlsruhe	Ettlingen-West - Wörth am Rhein	28,95 / 27,85
M	Karlsruhe	GVZ Karlsruhe-Hafen - Ettlingen-West	85,93
IS	Oberrhein	Lörrach - Staufen im Breisgau	30,46 / 31,30
M	Oberrhein	GVZ Hafen Weil am Rhein - Staufen i. Br.	248,99
IS	Schwarzwald	Villingen-Schwenningen - Donaueschungen	28,95
IS	Schwarzwald	Villingen-Schwenningen -St. Georgen	28,95 / 27,85
IS	Schwarzwald	Donaueschingen - St. Georgen	28,95
WL	Schwarzwald	Villingen-Schwenningen - Donaueschingen	304,35 / 362,50
WL	Schwarzwald	Villingen-Schwenningen -St. Georgen	229,20 / 275,25
WL	Schwarzwald	Donaueschingen - St. Georgen	332,25 / 395,00
M	Schwarzwald	GVZ VS Villingen - Donaueschingen	114,31
M	Schwarzwald	GVZ VS Villingen - St. Georgen	107,32
M	Schwarzwald	GVZ VS Villingen - Villingen-Schwenningen	93,62
IS	Oberschwaben	Ravensburg - Meckenbeuren	28,95 / 28,52
IS	Oberschwaben	Ravensburg - Pfullendorf	28,95 / 28,52
IS	Oberschwaben	Meckenbeuren - Pfullendorf	28,95
WL	Oberschwaben	Ravensburg - Meckenbeuren	155,85 / 190,00
WL	Oberschwaben	Ravensburg - Pfullendorf	304,35 / 362,50
WL	Oberschwaben	Meckenbeuren - Pfullendorf	359,40 / 426,75
M	Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Meckenbeuren	79,08
M	Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Pfullendorf	165,88
M	Oberschwaben	GVZ Ravensburg - Ravensburg	29,05
IS	Transit	Mannheim - Basel	30,34
WL	Transit	Mannheim - Basel	879,30 / 1.174,50
M	Transit	Mannheim - Basel	970,50
IS	Transit	Mannheim - Ulm	29,54
WL	Transit	Mannheim - Ulm	759,60 / 1.014,00
M	Transit	Mannheim - Ulm	837,00
IS	Transit	Ulm - Lindau	27,00
WL	Transit	Ulm - Lindau	471,60 / 630,00
M	Transit	Ulm - Lindau	519,00
IS	Transit	Stuttgart - Singen	28,37
WL	Transit	Stuttgart - Singen	590,40 / 787,50
M	Transit	Stuttgart - Singen	649,50

5.3 Bahn

5.3.1 Routen

Die Routenermittlung für den Schienentransport ist unabhängig von der Art und dem Gewicht des Transportgutes. Im einzelnen erfolgt die Festlegung der Routen für die konkreten Transportaufgaben auf Basis der Güterzugfahrpläne der Deutschen Bundesbahn (DB), sofern es sich um reale Fahrten handelt. Die Zuordnung der ausgewählten Züge zur jeweils planmäßig genutzten Trasse wird mit Hilfe der Zugnummern durchgeführt, die den Daten des Fahrzeug-Informations- und Vormeldesystems (FIV) der DB entnommen werden können.

Für die fiktiven Abfuhrkonzepte werden überwiegend die für den Gütertransport genutzten Trassen ausgewählt, wobei die Routenfestlegung durch die Auswahl der Traktionsart (elektrische oder Dieseltraktion) und die daraus resultierenden Anforderungen an die Streckenausrüstung unmittelbar eingeschränkt wird.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Routen der zu untersuchenden Relationen sind nur in einer Fahrtrichtung dargestellt, da in der Regel die charakteristischen Eigenschaften für beide Fahrtrichtungen einer Route nicht nennenswert voneinander abweichen. Die Angaben sind daher in die Gegenrichtung entsprechend zu übertragen. Die angegebenen Streckennummern entsprechen der Nummerierung im Streckenverzeichnis bei der DB /DB, 1978/.

Ballungsgebiet Stuttgart

Im Ballungsraum Stuttgart verläuft die zu untersuchende Basisroute vom Stuttgarter Hafen über Stuttgart-Bad Cannstatt und den Stuttgarter Hauptbahnhof (Hbf) nach Stuttgart-Vaihingen. Die genutzten Strecken haben gemäß DB-Streckenverzeichnis die Nummern 4724, 4720, 4713, 4701 und 4861. Aufgrund von nicht vorhandenen Streckendaten für die Gäubahn wird alternativ für das Abfuhrkonzept mit der Bahn u.a. ein S-Bahngleis genutzt (Strecke 4861). Die Anlieferung von Massengut erfolgt über ein Anschlußgleis von Vaihingen weiter nach Oberaichen. Die Streckenlänge beträgt von Stuttgart-Hafen bis Stuttgart-Vaihingen 21,3 km, und weitere 2,4 km bis zum Zielpunkt des Anschlußgleises.

Als Besonderheit im Streckenverlauf muß die starke Neigung des S-Bahn-Gleises (bis max. 38,5 ‰) zwischen Streckenkilometer 12 und 18 genannt werden. Dieses Steigungsstück liegt im Bereich eines mehr als 9 km langen S-Bahn-Tunnels. Hier muß ein Höhenunterschied von etwa 200 m überwunden werden, so daß im Fall des Massenguttransportes Doppeltraktion notwendig wird.

Ballungsgebiet Karlsruhe

Im Ballungsraum Karlsruhe verläuft die zu betrachtene Basisstrecke von Karlsruhe-Hafen über Karlsruhe-West nach Karlsruhe-Mitte. Dabei werden folgende Strecken befahren: 4220, 3443, 4215 und 4210. Im Fall eines Massenguttransportes verläuft die Route von Karlsruhe-Hafen über den Güterbahnhof (Gbf) Karlsruhe nach Ettlingen-West, wobei die Strecken 4000, 4213 und 4215 genutzt werden. Die Länge der Route beträgt von Karlsruhe-Hafen aus bis nach Karlsruhe-Mitte 9,3 km und bis nach Ettlingen-West 10,3 km. Der Streckenverlauf weist weder nennenswerte Neigungen noch Tunnel auf.

Ballungsgebiet Oberrhein (Freiburg/Lörrach)

Im Ballungsgebiet Oberrhein verläuft die zu untersuchende Basisroute von Weil am Rhein aus über Haltingen, Müllheim und Bad Krozingen zum Freiburger Gbf. Es werden die Strecken 4423, 4413, 4000 und 4312 genutzt. Der Massenguttransport wird zwischen Weil am Rhein und Staufen durchgeführt. Dazu befährt der Zug ebenfalls die Strecken 4423, 4413 und 4000, zweigt aber in Bad Krozingen auf die Strecke 9433 nach Staufen ab. Bis zum Empfänger wird außerdem ein Anschlußgleis genutzt. Die Streckenlängen betragen von Weil am Rhein bis zum Freiburger Gbf 61,4 km und nach Staufen 54,3 km.

Die Verläufe beider Strecken sind gekennzeichnet durch zahlreiche Steigungs- und Gefälleabschnitte. Während die Strecke zum Freiburger Gbf elektrifiziert ist, weist das Streckengleis nach Staufen keine Oberleitung auf, so daß bei einer durchgehenden Fahrt von Weil am Rhein nach Staufen Diesellokomotiven eingesetzt werden müssen.

Ländlich strukturierter Raum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen)

Im Bereich Villingen-Schwenningen (VS) werden drei Routen befahren. Die erste Strecke führt vom Bahnhof (Bf) VS-Schwenningen zum GVZ Villingen. Dabei wird die Strecke 4650 genutzt. Die Streckenlänge beträgt 9,8 km. Die Strecke erfordert Dieseltraktion, da sie nicht durchgehend elektrifiziert ist.

Die zweite Route verläuft vom GVZ Villingen zum Bf Donaueschingen. Es werden die Strecken 4650 und 4250 befahren. Die Route hat eine Länge von 15,6 km und ist elektrifiziert. Für die Beförderung der Wagenladungen wird ein nicht elektrifiziertes Anschlußgleis befahren, wodurch sich die Strecke um 2,2 km verlängert. Der Transport über das Anschlußgleis erfolgt mit Dieseltraktion. Mit Ausnahme einer leicht hügeligen Trassierung sind keine Besonderheiten im Streckenverlauf zu verzeichnen.

Die dritte zu untersuchende Route verläuft vom GVZ Villingen zum Bf St.Georgen. Es werden Abschnitte der elektrifizierten Strecken 4650 und 4250 mit einer Länge von 14,9 km genutzt. Für die Beförderung von Wagenladung wird ein vor dem Bf St. Georgen abzweigendes Anschlußgleis befahren, so daß sich in diesem Fall die Strecke auf 13,3km verkürzt. Der Verlauf der Transportroute ist charakterisiert durch eine verhältnismäßig starke und kontinuierliche Steigung. Zwischen Start- und Zielpunkt der Fahrt müssen etwa 100 Höhenmeter überwunden werden, was einer mittleren Steigung von 7 ‰ entspricht.

Ländlich strukturierter Raum Oberschwaben

Im Bereich Oberschwaben werden zwei Routen befahren. Die erste führt vom GVZ Ravensburg über Ravensburg zum Bf Meckenbeuren. Die genutzte Strecke (4500) ist nicht elektrifiziert, so daß Dieseltraktion eingesetzt werden muß. Die Streckenlänge vom GVZ Ravensburg bis zum Bf Meckenbeuren beträgt 11,2 km. Im Wagenladungsverkehr wird zusätzlich ein Anschlußgleis befahren, wodurch sich die Strecke auf 12,5 km verlängert.

Die zweite Route verläuft vom GVZ Ravensburg über Niederbiegen, Aulendorf und Altshausen zum Bf Pfullendorf über die Strecken 4500, 4550, 4551 und 4333. Hier kommen ebenfalls dieselgetriebene Fahrzeuge zum Einsatz, da die Strecken nicht elektrifiziert sind. Vom GVZ Ravensburg bis zum Bf Pfullendorf beträgt die Streckenlänge 54,0 km; im Fall der Beförderung von Wagenladung verkürzt sich der Streckenverlauf durch das Abzweigen von der Hauptabfuhrstrecke und das Befahren eines Anschlußgleises um 1,0km. Nennenswert sind zahlreiche Steigungsabschnitte mit Neigungen bis zu 13 ‰.

Transit Mannheim - Stuttgart - Ulm

Im Transitverkehr von Mannheim nach Ulm führt die ausgewählte Route vom Mannheimer Gbf über Heidelberg, Bruchsal, Stuttgart, Plochingen und Geislingen zum Bf Neu-Ulm. Dabei werden die Strecken 4031, 4030, 4002, 4000, 4130, 4800, 4720, 4700 und 5302 befahren. Auf der insgesamt 224 km langen Route ist durchgehend elektrische Zugbeförderung möglich. Das Profil der Strecke wird durch drei Abschnitte charakterisiert. Die ersten 60 km der Route verlaufen ohne nennenswerte Höhenunterschiede. Zwischen den Streckenkilometern 60 und 140 wird das Profil zunehmend hügelig, bevor von Kilometer 140 an die „Geislinger Steige“ mit einer maximalen Neigung von 24 ‰ beginnt. Beim Transport von schweren Güterzügen wird kurz vor dem steilsten Streckenstück in Geislingen das Ansetzen einer Schublok notwendig. Diese zusätzliche Lokomotive wird bei Amstetten wieder abgekuppelt.

Im Wagenladungsverkehr beginnt die Route im Hafen von Plochingen und führt über Süßen und Geislingen zum Bf Neu-Ulm. Dazu werden die Strecken 4700 und 5302 befahren. Die Länge der

elektrifizierten Strecke beträgt 73,7 km. Im Verlauf der Route liegt wiederum die „Geislinger Steige“. Aufgrund des vergleichsweise geringen Zuggewichtes ist hier Einfachtraktion (eine Lokomotive) ausreichend.

Transit Mannheim - Karlsruhe - Basel

Auf der Route von Mannheim über Schwetzingen, Graben-Neudorf, Karlsruhe, Offenburg und Freiburg nach Weil am Rhein werden die Strecken 4030, 4002, 4021, 4020, 4000, 4413 und 4423 befahren. Die insgesamt 253,5 km lange Strecke ist elektrifiziert und wird derzeit mit dem modernen Signalsystem CIR-ELKE ausgestattet, durch das die Zugfolgezeiten verkürzt werden sollen. Mit Ausnahme einiger schwach geneigter Streckenabschnitte weist die ausgewählte Route keine nennenswerten Merkmale auf.

Transit Ulm - Ravensburg - Lindau

Im Transit von Ulm über Schussenried und Friedrichshafen zum Bf Lindau-Reutin werden die Strecken 5302, 4700, 4500, 4530, 5362 und 5421 befahren. Die Streckenlänge beträgt insgesamt 130,4 km. Die Strecke ist nicht elektrifiziert, so daß Dieselbetrieb notwendig ist. Aufgrund der starken Neigungen des Streckenprofils mit Steigungsabschnitten bis zu 15 ‰ werden alle Züge in Doppeltraktion geführt.

Transit Stuttgart - Rottweil - Tuttlingen - Singen

Auf dieser Relation verläuft die Route vom Stuttgarter Hafen ausgehend über Plochingen, Tübingen, Rottweil und Tuttlingen nach Singen. Dabei werden die Strecken 4724, 4720, 4700, 4600, 4661 und 4250 befahren. Auf der insgesamt 204,7 km langen Strecke werden ausschließlich elektrisch betriebene Lokomotiven eingesetzt, wobei vorausgesetzt wird, das auch der Streckenabschnitt zwischen Tübingen und Horb elektrifiziert ist. Als besondere Profilvermerkmale weist die Strecke starke Neigungswechsel mit Steigungen bis zu 21 ‰ zwischen den Streckenkilometern 20 und 60 sowie 130 und 200 auf.

5.3.2 Energieaufwand und Emissionen

5.3.2.1 Grundlagen der Fahrsimulation

Die Berechnung des antriebsbedingten Energieaufwandes und der damit verbundenen Emissionen beim Schienentransport erfolgt durch eine detaillierte und praxisnahe Nachbildung der realen

Zugfahrt auf Basis einer Zugfahrsimulation am Rechner. Dies erfordert zunächst die genaue Festlegung

- der zug- bzw. fahrzeugspezifischen,
- der streckenspezifischen und
- der betrieblichen

Randbedingungen, wobei diese Parameter für jede Transportaufgabe getrennt ermittelt werden müssen. Im Anschluß an die Simulationsrechnung wird die dem einzelnen Transportgut anzurechnende Teilmenge des Energieaufwandes der Zugfahrt anteilig entsprechend dem Transportgewicht ermittelt. In einem weiteren Arbeitsschritt werden dann für die Dieseltriebfahrzeuge die antriebsbedingten direkten Emissionen mit Hilfe von Emissionsfaktoren nach /Steierwald, 1994/ aus dem Energieaufwand bzw. dem verbrauchten Kraftstoff berechnet und anteilig dem Transportgut zugeordnet. Elektrische Triebfahrzeuge weisen keine antriebsbedingten direkten Emissionen auf.

Die Grundlage der Berechnungen des durch den reinen Transport verursachten Traktionsenergieaufwandes bildet das am ISB entwickelte und durch umfangreiche Vergleichsrechnungen verifizierte Zugfahr-Simulationsprogramm FASIM /ISB, 1996/. Mit Hilfe dieses Programmsystems kann die Fahrt eines Zuges beliebiger Konfiguration auf ausgewählten Routen mit hoher Genauigkeit am Rechner nachgebildet werden. So ist es möglich, in Abhängigkeit von definierten Zug-, Strecken- und Betriebsbedingungen eine Zugfahrt detailliert mit sämtlichen fahrdynamischen Daten wie Fahrzeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung sowie Fahrwiderstand und Energieaufwand als Funktion des Streckenbandes am Rechner nachzuvollziehen. Durch die gezielte Vorgabe von Haltepunkten oder Geschwindigkeitsbeschränkungen auf bestimmten Streckenabschnitten sowie Beschleunigungs- oder Verzögerungsgrenzwerten kann zusätzlich Einfluß auf den Verlauf der Fahrt genommen werden. Somit bietet die Zugfahrsimulation grundsätzlich die Möglichkeit, einen annähernd praxisnahen Betriebsablauf nachzubilden.

Modellbildung

Wirken auf einen translatorisch bewegten Körper äußere Kräfte (F_i), so ist die resultierende Kraft ($F_{res.}$) gemäß Formel 5.3-1 gleich dem Produkt aus Masse (m) und Beschleunigungsvektor (a).

$$F_{res.} = \sum F_i = m \cdot a \quad (5.3-1)$$

Für die Simulation einer Zugfahrt setzen sich die äußeren Kräfte aus der wirksamen Resultierenden aller Zug- (Z_i) bzw. Bremskräfte (B_i) und der Summe der Fahrwiderstände (W_i) zusammen. Mit Berücksichtigung eines Zuschlagfaktors (ρ) für die kinetische Energie der rotierenden Massen ergibt sich die Bewegungsgleichung nach Formel 5.3-2.

$$\sum Z_i(s, v) + \sum B_i(s, v) + \sum W_i(s, v) = m \cdot (1 + r) \cdot a \quad (5.3-2)$$

Da bei Traktionsrechnungen sowohl Zug- und Bremskräfte, als auch Widerstandskräfte nichtanalytische Funktionen des Weges und der Geschwindigkeit sind, läßt der nichtlineare Charakter der Gleichung eine geschlossene Integration nicht zu. Für die rechnerische Behandlung wird deswegen das Näherungsverfahren nach Runge-Kutta /Feldmann, 1988/ eingesetzt. Dieses Verfahren hat sich als besonders zuverlässig und einfach in der Handhabung erwiesen. Durch die mühelose Variation von Parametern, insbesondere durch die Veränderung der Schrittweiten, kann auf einfache Art und Weise Einfluß auf die Genauigkeit und die Dauer der Berechnungen genommen werden. Die Eingabe von Mindestgrenzen für die Genauigkeit der Berechnung erlaubt darüber hinaus eine automatische Steuerung der Schrittweiten.

Der Gesamtfahrwiderstand ($W_{ges.}$) eines Fahrzeuges setzt sich nach Gleichung 5.3-3

$$W_{ges.} = W_r + W_l + W_k + W_s + W_t + W_v \quad (5.3-3)$$

aus den Komponenten des Rollwiderstandes (W_r), des Luftwiderstandes (W_l), des Krümmungswiderstandes (W_k), des Steigungswiderstandes (W_s) und des Tunnelwiderstandes (W_t) zusammen. Hinzu kommt außerdem ein geschwindigkeitsproportionaler Widerstandsanteil (W_v), der u.a. auf vertikale und horizontale Bewegungen des Fahrzeuges während der Fahrt zurückzuführen ist.

Der Rollwiderstand wird mit Hilfe des fahrzeugspezifischen Rollwiderstandsbeiwertes (c_f) nach Formel 5.3-4

$$W_r = m \cdot g \cdot c_f \quad (5.3-4)$$

berechnet /ISB, 1990/. Der geschwindigkeitsabhängige Luftwiderstand des Fahrzeuges wird mit Hilfe des Luftwiderstandsbeiwertes (c_l), des Fahrzeugquerschnitts (A) und der Luftdichte (ρ_{Luft}) nach Formel 5.3-5

$$W_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot A \cdot c_l \cdot \left(v + \frac{15}{3,6} \right)^2 \quad (5.3-5)$$

ermittelt /ISB, 1990/. Der Beiwert ist nicht allein von der Fahrzeuggestaltung abhängig, sondern wird auch von der Stellung des Fahrzeuges innerhalb des Zugverbandes sowie der Anströmrich-

tung der Luft beeinflusst. Bei den hier untersuchten Transportaufgaben wird vereinfachend von einer direkten Luftanströmung (Anströmwinkel = 0 Grad) und einem konstanten Gegenwind mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h ausgegangen.

Der gleisbogenabhängige Krümmungswiderstand wird vereinfachend nach Formel 5.3-6 mit Hilfe der Fahrzeugmasse (m) und des Bogenradius (R) für 4-achsige Fahrzeuge berechnet /ISB, 1990/.

$$W_k = 6,15 \cdot \frac{m}{R} \quad (5.3-6)$$

In Abhängigkeit von der jeweiligen Streckenneigung (s) wird der wirksame Steigungswiderstand nach Gleichung 5.3-7 ermittelt.

$$W_s = s \cdot m \cdot g \quad (5.3-7)$$

Der Tunnelwiderstand (W_t) berücksichtigt die Luftwiderstandserhöhung des Fahrzeuges beim Durchfahren von Tunneln. Diese Komponente des Fahrwiderstandes ist im wesentlichen abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, der Fahrzeug- und der Tunnellänge sowie von den Querschnitten des Fahrzeugs und des Tunnels. Vereinfachend wird hier eine 40 %-ige Zunahme des Luftwiderstandes im Tunnel (bei 0 km/h Gegenwind) angenommen.

Der geschwindigkeitsproportionale Anteil des Fahrwiderstandes (W_v) kann aufgrund fehlender fahrzeugspezifischer Informationen hier nicht berücksichtigt werden. Frühere am ISB durchgeführte Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß der Fehler bei der Berechnung des Energiebedarfs vernachlässigbar ist /ISB, 1995/.

Alle Komponenten des Fahrwiderstandes werden für jedes Zugsegment getrennt und in Abhängigkeit von der aktuellen Position (Krümmung und Steigung der Strecke) des jeweiligen Wagens berechnet. Die Summe sämtlicher Einzelwiderstände ergibt den aktuellen Fahrwiderstand des Zuges. In Kenntnis des Verlaufs der zulässigen Streckengeschwindigkeit, der momentanen Fahrgeschwindigkeit des Zuges und der aktuell wirksamen Fahrwiderstände kann die erforderliche Zug- bzw. Bremskraft eingestellt werden. Diese Kräfte werden in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aus dem digitalisierten Z/v -Diagramm der entsprechenden Lokomotive entnommen.

Am Rechner werden die Zugfahrten auf der Grundlage einer straffen, zeitminimalen Fahrweise nachgebildet, wobei die jeweils maximal mögliche Geschwindigkeit unter der Nutzung der größtmöglichen Zugkraft gefahren wird. Dies führt im Vergleich zur praktizierten Fahrweise zu hohen Werten für den berechneten Energieverbrauch, da die Triebfahrzeugführer zu einer energiesparenden Fahrweise angehalten sind. Durch die Beschränkung der zulässigen Beschleuni-

gungs- und Verzögerungswerte (hier $0,4 \text{ m/s}^2$ bzw. $-0,4 \text{ m/s}^2$) kann in gewissen Grenzen Einfluß auf die Fahrweise und den Energieverbrauch genommen werden. Dennoch läßt sich der Einfluß der straffen Fahrweise auf den ermittelten Energiebedarf nicht vollständig eliminieren. Somit muß bei einem Vergleich der Verkehrsträger berücksichtigt werden, daß der für den Schienentransport ermittelte Energiebedarf stets oberhalb des tatsächlichen Energiebedarfs liegt.

5.3.2.2 Fahrzeugspezifische Daten

Die für die Simulationsrechnung erforderlichen zugspezifischen Parameter werden u.a. der FIV-Datenbank der DB AG entnommen. Diese Informationen enthalten neben den in Kapitel 5.3.2.1 genannten Routen auch detaillierte Angaben zur Konfiguration und zur Beladung der realen Güterzüge, die im Rahmen dieser Studie untersucht werden. Die entsprechenden Informationen für die fiktiven Fahrzeug- und Abfuhrkonzepte werden entweder ebenfalls aus dieser Informationsquelle entnommen oder aber auf der Grundlage von Planungsdaten, Konzeptstudien und Erfahrungswerten abgeschätzt. Die auf diese Weise festgelegten zugspezifischen Angaben über die jeweils ausgewählten Züge werden anschließend durch die fahrzeugspezifischen Daten aus technischen Unterlagen ergänzt. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Informationen über die Traktionsart (elektrische oder Dieseltraktion) und die Antriebs- bzw. Bremsleistung der Lokomotive, das Fahrzeugeigengewicht, den Lauf- und den Luftwiderstandsbeiwert sowie die maximale Zuladung und die Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge. Tabelle 5.3-1 enthält eine Aufstellung der technischen Daten aller im Rahmen der Studie eingesetzten Fahrzeuge.

Tabelle 5.3-1: Fahrzeugspezifische Daten

Bauart	Bezeichnung	Anzahl	Eigengewicht	max. Zuladung	V _{max}
BR 120	Elektrische Lokomotive	4	84,0	-----	200
BR 140	Elektrische Lokomotive	4	86,0	-----	110
BR 151	Elektrische Lokomotive	6	118,0	-----	120
BR 218	Diesellokomotive	4	80,0	-----	140
BR 260	Diesellokomotive	3	48,0	-----	60
STE 5	selbstfahrende Transpor-	12	79,0	163,0	110
Sss-y 715	Containertragwagen	4	21,0	59,0	120
Lss-y 573	Containertragwagen	2	10,0	31,0	120
Hbis 305	Schiebewandwagen	2	15,0	30,0	100
Tibs 869	gedeckter Güterwagen	2	13,8	26,0	100
RSS	Abrollcontainerwagen	2	27,2	45,0	100
Falns 183	Selbstentladewagen	4	25,0	55,0	90
Trailer	Trailerkombination	4	15,5	28,8	100

Die Konfigurationen der ausgewählten Güterzüge sind in Tabelle 5.3-2 zusammenfassend dargestellt. Bei der Berechnung des Energiebedarfs wurde für den Stückgut- und den Wagenladungsverkehr stets eine Auslastung von 50 % der maximalen Zuladung angenommen. Bei der Untersuchung der Massenguttransporte wurde von einer Auslastung der maximalen Zuladung von 100 % ausgegangen. Die Rückführung des Massengutzuges erfolgt mit leeren Wagen.

Tabelle 5.3-2: Zugspezifische Daten

Zug-	Lok-	Wagen	Wagen	Wagen	Leergewicht	max. Zuladung	V _{max}
1	260	1*Lss-y 573	2*Hbis 305	3*Tibs 869	129	169	60
2		1*STE 5			79	163	110
5	140	10*Falns 183			336	550	90
6	140	12*RSS			412	540	100
7	140	1*Lss-y 573	2*Hbis 305	3*Tibs 869	167	169	100
8	218	13*Falns 183			405	715	90
9	140	16*RSS			521	720	100
10	218	12*Falns 183			380	660	90
11	140	12*Falns 183			386	660	90
12	218	2*Lss-y 573	5*Hbis 305	5*Tibs 869	244	342	100
13	218	10*Falns 183			330	550	90
14	2*218	10*Falns 183			410	550	90
15	120	6*Hbis 305	14*Tibs 869		367	544	100
16	151	18*RSS			608	810	100
17	151	15*Falns 183			493	825	90
18	120	4*Sss-y 715	10*Lss-y		268	546	120
19	120	18*Trailer			363	518	100
20	120	3*Sss-y 715	17*Tibs 869		382	619	100
21	120	6*Sss-y 715	10*Lss-y		310	664	120
22	120	22*Trailer			425	630	100
23	2*218	3*Hbis 305	15*Tibs 869		412	480	100
24	2*218	16*RSS			595	720	100
25	2*218	13*Falns 183			485	715	90
26	2*218	3*Sss-y 715	10*Lss-y		323	487	120
27	2*218	16*Trailer			408	458	100
28	2*140	10*Falns 183			422	550	90
37	2*151	18*RSS			792	810	100
38	2*151	12*RSS			562	540	100

5.3.2.3 Streckenspezifische Daten

Die für die Simulationsrechnung notwendigen streckenspezifischen Grunddaten werden entsprechend den Routen (vergl. Kap. 5.3.1) aus den zugehörigen Streckendaten entnommen. Diese detaillierten Datensätze enthalten genaue Angaben über die topografischen Verhältnisse (Neigungen, Radien, Lage und Länge von Tunneln) und über die örtlich zulässigen Fahrgeschwindigkeiten. Die streckenspezifischen Daten werden ergänzt durch Angaben über planmäßige Haltepunkte der Güterzüge, die beispielsweise für die Überholung durch Personenzüge erforderlich sind. Durch die notwendigen Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge haben diese Fahrtunterbrechungen einen unmittelbaren Einfluß auf den Energiebedarf. Somit können bei der Simulationsrechnung alle relevanten Informationen in Abhängigkeit von der Position des Zuges verarbeitet werden. Die Tabellen 5.3-3a bis 5.3-3i enthalten eine Zusammenstellung sämtlicher Routen sowie

eine Zuordnung der auf diesen Strecken jeweils eingesetzten Züge. Dabei ist jeweils nur eine Fahrtrichtung aufgeführt.

Tabelle 5.3-3a: Streckenspezifische Daten (Ballungsgebiet Stuttgart)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R1	Stückgut	Stuttgart-Hafen	Bf Stuttgart-Vaihingen	21,3	2/7
R2	Massengut	Stuttgart-Hafen	Oberaichen	23,7	5/28
R3	Massengut	Stuttgart-Hafen	Bf Stuttgart-Vaihingen	21,3	6/38

Tabelle 5.3-3b: Streckenspezifische Daten (Ballungsgebiet Karlsruhe)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R4	Stückgut	Karlsruhe-Mitte	Karlsruhe-Hafen	9,3	1/2
R5	Massengut	Karlsruhe-Hafen	Ettlingen-West	10,3	5
R6	Massengut	Karlsruhe-Hafen	Karlsruhe-Mitte	9,3	6

Tabelle 5.3-3c: Streckenspezifische Daten (Ballungsgebiet Oberrhein)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R7	Stückgut	Hafen Weil am Rhein	Freiburg	61,4	2/7
R8	Massengut	Hafen Weil am Rhein	Staufen	54,3	8
R9	Massengut	Hafen Weil am Rhein	Freiburg	61,4	9

Tabelle 5.3-3d: Streckenspezifische Daten (ländlich strukturierter Raum Schwarzwald)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R10	Stückgut	Bf VS-Schwenningen	Bf Donaueschingen	25,4	1/7
R11	Stückgut	Bf VS-Schwenningen	Bf St.Georgen	24,7	1/7
R12	Stückgut	Bf Donaueschingen	Bf St.Georgen	30,5	7
R13	Massengut	GVZ Villingen	VS-Schwenningen	11,5	10
R14	Massengut	GVZ Villingen	Donaueschingen	17,8	11
R15	Massengut	GVZ Villingen	St. Georgen	13,3	11
R16	Wagenladung	VS-Schwenningen	Donaueschingen	29,3	1/7
R17	Wagenladung	VS-Schwenningen	St. Georgen	24,8	1/7
R18	Wagenladung	Donaueschingen	St. Georgen	31,1	7

Tabelle 5.3-3e: Streckenspezifische Daten (ländlich strukturierter Raum Oberschwaben)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R19	Stückgut	GVZ Ravensburg	Bf Meckenbeuren	11,2	1
R20	Stückgut	GVZ Ravensburg	Bf Pfullendorf	54,0	12
R21	Stückgut	Bf Meckenbeuren	Bf Pfullendorf	65,2	1/12
R22	Massengut	GVZ Ravensburg	Meckenbeuren	12,5	13
R23	Massengut	GVZ Ravensburg	Pfullendorf	53,0	14
R24	Wagenladung	GVZ Ravensburg	Meckenbeuren	12,5	1
R25	Wagenladung	GVZ Ravensburg	Pfullendorf	53,0	12
R26	Wagenladung	Meckenbeuren	Pfullendorf	65,5	1/12

Tabelle 5.3-3f: Streckenspezifische Daten (Transit Mannheim-Stuttgart-Ulm)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R27	Stückgut	Mannheim	Ulm	224,0	15
R28	Massengut	Mannheim	Ulm	224,0	16/17/37
R29	Massengut	Hafen Plochingen	Ulm	73,7	17
R30	Wagenladung	Mannheim	Ulm	224,0	15/18/19
R31	Wagenladung	Hafen Plochingen	Ulm	73,7	18

Tabelle 5.3-3g: Streckenspezifische Daten (Transit Mannheim-Karlsruhe-Basel)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R32	Stückgut	Mannheim	Weil am Rhein	253,5	20
R33	Massengut	Mannheim	Weil am Rhein	253,5	16/17
R34	Wagenladung	Mannheim	Weil am Rhein	253,5	20/21/22

Tabelle 5.3-3h: Streckenspezifische Daten (Transit Ulm-Ravensburg-Lindau)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R35	Stückgut	Ulm	Lindau	130,4	23
R36	Massengut	Ulm	Lindau	130,4	24/25
R37	Wagenladung	Ulm	Lindau	130,4	23/26/27

Tabelle 5.3-3i: Streckenspezifische Daten (Transit Stuttgart-Rottweil-Tuttlingen-Singen)

Nr.	Aufgabe	Startpunkt	Zielpunkt	Länge [km]	Zug-Nr.
R38	Stückgut	Stuttgart-Hafen	Singen	204,7	15
R39	Massengut	Stuttgart-Hafen	Singen	204,7	16/17
R40	Wagenladung	Stuttgart-Hafen	Singen	204,7	15/18/19

5.3.2.4 Berechnung und Zuordnung des Energieaufwandes und der Emissionen

Die Berechnungen des antriebsbedingten Energieaufwands erfolgen abschnittsweise und individuell für die Fahrt des jeweils eingesetzten Zuges (konventioneller Güterzug mit Stückgut-, Containertrag- und/oder Massengutwagen, Trailerzug, selbstfahrende Transporteinheit). Beide Fahrtrichtungen einer Route werden getrennt voneinander untersucht. Die Ergebnisse für elektrische Triebfahrzeuge berücksichtigen die Übertragungsverluste im Fahrdraht und beziehen sich somit auf den Stromverbrauch ab Unterwerk. Die Werte für Dieseltriebfahrzeuge beziehen sich auf den Verbrauch des Endenergieträgers Dieselkraftstoff.

Für den Vergleich unterschiedlicher Verkehrsmittel muß der Energieaufwand einer Zugfahrt den insgesamt mit dem Güterzug transportierten Gütern zugeordnet werden. Beim Stückgut- und beim Massenguttransport erfolgt die Ermittlung des anteiligen Energieaufwandes entsprechend dem prozentualen Gewichtsanteil, den das zu untersuchende Transportgut an der gesamten Zuladung des jeweiligen Zuges hat. Demnach wird beim Stückguttransport keine eindeutige Zuordnung der untersuchten Ladungseinheit zu einem Wagen innerhalb des Zugverbandes getroffen, da die Datenbasis keine zuverlässige Verteilung der gesamten Zuladung auf die einzelnen Fahrzeuge ermöglicht. Vielmehr wird analog zum Massenguttransport eine homogene Auslastung aller Wagen des Zuges angenommen, wobei die in der Regel beim Stückguttransport mitgeführten Leerwagen durch eine verringerte Auslastung des Zuges berücksichtigt werden.

Im Gegensatz dazu erfolgt beim Wagenladungstransport stets eine Zuordnung zwischen Transportgut und Wagen. Demnach wird für diese Art des Gütertransports der anteilige Energieaufwand entsprechend des prozentualen Gewichtsanteils ermittelt, den der betreffende Wagen zusammen mit dem Transportgut an der Gesamtmasse von Wagenzug (ohne Lokomotive) und Gesamtzuladung hat.

An die Berechnungen des anteiligen Energieaufwandes schließt sich die Ermittlung der damit verbundenen antriebsbedingten direkten Emissionen an. Für die Dieseltriebfahrzeuge werden diese Emissionen mit Hilfe von Emissionsfaktoren aus dem verbrauchten Dieselmotorkraftstoff berechnet. Diese Faktoren sind in Tabelle 5.3-4 zusammengefaßt. Elektrische Triebfahrzeuge weisen keine antriebsbedingten direkten Emissionen auf.

Tabelle 5.3-4: Emissionsfaktoren für Dieselloks im Eisenbahngüterverkehr /Steierwald, 1994/

Schadstoff	CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	VOC
Einheit	kg/kg Diesel	g/kg Diesel	g/kg Diesel	g/kg Diesel	g/kg Diesel
Emissionsfaktor	3,16	18	55	3	6,5

5.3.3 Zeit und Kosten

5.3.3.1 Transportzeiten

Die Transportzeit beim konventionellen Stückguttransport mit der Bahn setzt sich in Abhängigkeit von der Transportrelation (Route, Entfernung) und des Abfuhrkonzeptes aus einer Vielzahl von Vorgängen zusammen. Dabei sind im einzelnen neben den reinen Fahrzeiten des Hauptlaufs sowie der Übergabefahrten des Vor- und Nachlaufs insbesondere Umschlagzeiten in den Güterbahnhöfen und Rangierzeiten bei der Zugbildung und -trennung für den Hauptlauf zu berücksichtigen. Hinzu kommen bei kombinierten Verkehren die Transportzeiten für das Sammeln und Verteilen der Güter mit dem Lkw. Zusätzliche systembedingte Wartezeiten werden bei diesen gebrochenen Transportketten durch die sog. Ladeschluß- und Bereitstellungszeiten verursacht, die auf die Abfahrt- und Ankunftszeiten der Züge sowie die Umschlagkapazität (Infrastruktur, Personalbestand, Arbeitszeiten) in den betreffenden Bahnhöfen zurückzuführen sind. Bedingt durch diese im Vergleich zur reinen Fahrzeit erheblichen Wartezeiten wird beim Stückguttransport mit der Bahn in der Regel eine Auslieferung erst am übernächsten Tag zugesichert. Demnach ist für den Vergleich unterschiedlicher Verkehrsmittel und/oder Logistikkonzepte hinsichtlich der Transportzeiten hier die Angabe der o.g. Ladeschluß- und Bereitstellungszeiten maßge-

bend. Die Ladeschluß- und die Bereitstellungszeiten werden für alle untersuchten Transportaufgaben des Stückguttransportes durch telefonische Anfragen bei den zuständigen Abfertigungsstellen der DB AG ermittelt. Im Falle der fiktiven Transportaufgaben wird von entsprechenden Zeiten ausgegangen. Diese Zeiten sind in Tabelle 5.3-5 zusammengefaßt.

Beim Einsatz des automatischen Einzelwagens (bzw. einer selbstfahrenden Transporteinheit), der im Rahmen dieser Studie als fiktives Abfuhrkonzept untersucht wird, resultiert die Transportzeit nahezu aus der reinen Fahrzeit, da diese Transporte bedarfsgerecht und ohne größere Wartezeiten für das Sammeln anderer Stückgüter durchgeführt werden können. Die mit Hilfe der Simulationsrechnung ermittelten Fahrzeiten sind in Tabelle 5.3-6 dargestellt.

Ähnlich wie beim Stückguttransport setzt sich auch beim Wagenladungsverkehr die Transportzeit aus einer Vielzahl von Einzelvorgängen innerhalb der Transportkette zusammen. In Abhängigkeit vom Warenaufkommen resultiert die insgesamt benötigte Transportzeit im wesentlichen aus der reinen Fahrzeit sowie aus der Wartezeit für die Zugbildung und -trennung. Maßgeblich für die Zustellung des Transportgutes beim Empfänger sind jedoch auch hier die Ladeschluß- und die Bereitstellungszeiten, die zusammen mit den entsprechenden Angaben für den konventionellen Stückguttransport in Tabelle 5.3-5 dargestellt sind.

Tabelle 5.3-5: Ladeschluß- und Bereitstellungszeiten im Stückgut- und im Wagenladungsverkehr

Nr.	Tarifpunkt	Zeit
R1, R38, R40	Stuttgart-Hafen	keine Angabe
R1	Stuttgart-Vaihingen	Mo-Do 8-12, 13-17 Fr 8-12, 13-16:30, Sa-So kein Verkehr
R4	Karlsruhe-Mitte, Containerterminal	Mo-Fr 8-17, Sa u. So auf Anfrage
R4	Karlsruhe Hafen	Mo-So 7-16
R7, R32, R34	Hafen Weil am Rhein	keine Angabe
R7	Güterbahnhof Freiburg	Mo-Fr 7-12, 13-18 Sa 7.30-10:30, nur Abholung
R10, R11	Bahnhof VS-Schwenningen	keine Angabe
R10, R12	Bahnhof Donaueschingen	Stückgut: keine Angabe
R11, R12	Bahnhof St. Georgen	keine Angabe
R19, R20, R24, R25	GVZ Ravensburg	Mo-So 7-17
R19, R21	Bahnhof Meckenbeuren	keine Angabe
R20, R21	Bahnhof Pfullendorf	keine Angabe
R27, R30, R32, R34	Mannheim, Containerterminal	Mo-Fr 7-12,12:30-17:30, Abholen bis
R27, R30, R31, R35,	Bahnhof Neu-Ulm	Mo-Fr 7:30-12,13-18
R31	Hafen Plochingen	keine Angabe
R35, R37	Bahnhof Lindau-Reutin	Mo-Fr 8-12,14-17
R38, R40	Singen, Containerterminal	Mo-Fr 8-12,13:30-17:30

Die Transportzeiten beim Massenguttransport resultieren überwiegend aus der reinen Fahrzeit sowie aus Haltezeiten, die durch eine gegenseitige Zugbeeinflussung (Überholung von Personen- und schnellen Güterzügen) hervorgerufen werden. Die Fahrzeiten beim Massenguttransport werden aufgrund fehlender Fahrplaninformationen mit Hilfe des Zugfahr-Simulationsprogramms ermittelt. In Tabelle 5.3-6 sind diese Fahrzeiten für sämtliche Massenguttransporte zusammen mit den entsprechenden Zeiten für den Einzelwagenverkehr beim Stückguttransport dargestellt.

Tabelle 5.3-6: Fahrzeiten im Einzelwagenverkehr und beim Massenguttransport

Nr.	Länge [km]	Transportart	Hin [hh:mm:ss]	Rück [hh:mm:ss]
R1	21,3	Einzelwagen	00:26:16	00:27:22
R2	21,3	Massengut konventionell	00:27:28	00:27:57
R3	21,3	Massengut im Abrollcontainer	00:23:08	00:22:19
R4	9,3	Einzelwagen	00:11:26	00:11:27
R5	10,3	Massengut konventionell	00:11:25	00:11:02
R6	9,3	Massengut im Abrollcontainer	00:11:27	00:10:37
R7	61,4	Einzelwagen	00:42:25	00:42:37
R8	51,8	Massengut konventionell	00:50:05	00:43:02
R9	61,4	Massengut im Abrollcontainer	00:45:16	00:44:30
R13	11,5	Massengut konventionell	00:13:48	00:10:59
R14	17,8	Massengut konventionell	00:14:21	00:13:42
R15	13,2	Massengut konventionell	00:10:51	00:10:24
R22	12,5	Massengut konventionell	00:11:03	00:10:40
R23	53,0	Massengut konventionell	00:52:30	00:51:47
R28	224,0	Massengut im Abrollcontainer	02:39:59	02:32:09
		Massengut konventionell	02:47:48	02:42:46
R29	73,7	Massengut konventionell	00:57:06	00:52:07
R33	253,5	Massengut im Abrollcontainer	02:40:46	02:39:33
		Massengut konventionell	02:55:48	02:54:49
R36	130,4	Massengut im Abrollcontainer	01:31:26	01:27:06
		Massengut konventionell	01:34:28	01:32:32
R39	204,7	Massengut im Abrollcontainer	02:10:03	02:08:24
		Massengut konventionell	02:18:43	02:17:54

5.3.3.2 Transportkosten

Für den Stückgutverkehr wird die Ermittlung der Transportkosten auf Basis der Bahntarife durchgeführt /DB, 1992/. Die Tarife sind durch das Transportgewicht und die Transportentfernung festgelegt. Die in Tabelle 5.3-7 angegebenen Preise betreffen ausschließlich den reinen Schienentransport, so daß ggf. anfallende Kosten für eine notwendige Beförderung mit dem Lkw hinzu kommen. Aufgrund des als fiktiv angenommenen Einzelwagentransportes können für diese Form des Stückguttransportes keine detaillierten Angaben zu den Transportkosten ermittelt werden.

den, so daß hier von den entsprechenden Tarifen des konventionellen Transportes ausgegangen werden muß.

Für den Wagenladungsverkehr werden die Transportkosten analog zur Vorgehensweise beim Stückguttransport auf Basis der Bahntarife ermittelt /DB, 1992/. Auch hier sind die Tarife durch das Transportgewicht und die Transportentfernung festgelegt. Eine Differenzierung nach Container- oder konventionellem Wagenladungstransport bzw. der Beförderung mit einem Trailerzug kann auf Basis der vorliegenden Tarifbestimmungen nicht vorgenommen werden. Die im Stückgut- und im Wagenladungsverkehr anfallenden Transportkosten sind für die untersuchten Transportaufgaben in Tabelle 5.3-7 zusammengestellt.

Tabelle 5.3-7: Transportkosten im Stückgut- und im Wagenladungsverkehr (nur Bahn)

Nr.	Länge in km	Transportgut	Frachtpreis		
			5 kg Stückgut	15 t Wagenla-	25 t Wagenla-
R1	21,3	leichtes Stückgut	21,00		
R4	9,3	leichtes Stückgut	21,00		
R7	61,4	leichtes Stückgut	21,00		
R10	25,4	leichtes Stückgut	21,00		
R11	24,7	leichtes Stückgut	21,00		
R12	30,5	leichtes Stückgut	21,00		
R16	29,3	Wagenladung		314,00	422,00
R17	24,8	Wagenladung		299,00	402,00
R18	31,1	Wagenladung		330,00	443,00
R19	11,2	leichtes Stückgut	21,00		
R20	54,0	leichtes Stückgut	21,00		
R21	65,2	leichtes Stückgut	21,00		
R24	12,5	Wagenladung		238,00	320,00
R25	53,0	Wagenladung		451,00	606,00
R26	65,5	Wagenladung		512,00	688,00
R27	224,0	leichtes Stückgut	24,70		
R30	224,0	Wagenladung		1126,00	1513,00
R31	73,7	Wagenladung		557,00	749,00
R32	253,5	leichtes Stückgut	24,70		
R34	253,5	Wagenladung		1222,00	1643,00
R35	130,4	leichtes Stückgut	21,00		
R37	130,4	Wagenladung		695,00	934,00
R38	204,7	leichtes Stückgut	24,70		
R40	204,7	wagenladung		1061,00	1426,00

Die Ermittlung der Transportkosten im Massengutverkehr erfolgt auf der Grundlage von Durchschnittswerten, da die Tarife in der Regel für jede Transportaufgabe individuell mit dem Kunden vereinbart werden. In /DB, 1990/ wird für das Jahr 1990 ein durchschnittlicher Wert von 12 DM für die Beförderung einer Tonne Massengut angegeben, wobei keine Differenzierung nach der

Transportweite, dem Transportgut oder der insgesamt mit einem Zug beförderten Menge erfolgt. Bei den daraus berechneten Transportkosten für die untersuchten Transportaufgaben handelt es sich daher lediglich um Anhaltswerte. Demnach wird für den Transport von 15 Tonnen Massengut ein Tarif von 180,- DM berechnet.

5.4 Binnenschiff

5.4.1 Allgemeines

Die im Rahmen der Studie notwendigen Berechnungen des Energieaufwands und der damit verbundenen umwelt- und klimarelevanten Emissionen für das Binnenschiff wurden am ISV mit Hilfe eines eigens entwickelten Berechnungsalgorithmus durchgeführt. Dabei sind diverse Randbedingungen wie die Fahrtrichtung, Schleusenaufenthalte und Daten zur Wasserstraße zu beachten. Die Bestimmung der gesuchten Größen erfolgt differenziert nach der Fahrtrichtung und der Auslastung entsprechend einer geeigneten Klassifizierung der Binnenwasserstraßen (freifließender Fluß, staugeregelter Fluß, Schleuse, Kanal).

5.4.2 Routen

Durch die Studie werden die Relationen Mannheim - Weil am Rhein auf dem Rhein und Mannheim - Plochingen (Abschnitt der Transit-Relation Mannheim - Ulm) auf dem Neckar untersucht. Befördert werden auf beiden Relationen Wagenladung im Container und Massengut. Die Transportrouten sind dabei beim Binnenschiff bereits durch die Angaben des Start- und Zielpunkts bereits vorgegeben. Es besteht stets nur eine Möglichkeit den Zielort zu erreichen, Alternativrouten stehen nicht zur Verfügung.

Die Strecke Mannheim - Weil am Rhein hat eine Gesamtlänge von 262,5 km, wovon 98,7 km als freifließend und 161,8 km als staugeregelt eingestuft werden. Die verbleibenden 2 km bestehen aus insgesamt 10 Schleusen mit einer Hubhöhe von 126,6 m in Richtung Weil am Rhein. Die beiden Endpunkte der Strecke werden durch die Containerterminals im Mannheimer Hafen und im Hafen in Weil am Rhein markiert. Der Rhein wird flußabwärts von Iffezheim als freifließend betrachtet. In der entgegengesetzten Richtung gilt er flußaufwärts von Iffezheim an als staugeregelt.

Die Relation Mannheim- Plochingen geht ebenfalls vom Containerterminal im Mannheimer Hafen bis zum Plochinger Hafen nahe Stuttgart. Die Strecke ist 205,7 km lang und verfügt über 27 Schleusen mit einer gesamten Länge von 3,91 km. 197,49 km der Strecke sind staugeregelt, lediglich 4,3 km sind freifließend. In den Berechnungen wird daher der gesamte Neckar als staugeregelter Fluß abgebildet. Die Hubhöhe von Mannheim nach Plochingen beträgt 158,5 m.

Keine der beiden Relationen verfügt über Kanal-Abschnitte.

5.4.3 Energieaufwand und Emissionen

Die Berechnung der Energieverbräuche und Emissionen erfolgt nach der im folgenden beschriebenen Vorgehensweise. Den einzelnen Flußabschnitten werden differenziert nach der Fahrtrichtung (Berg- bzw. Talfahrt) und Beladung, Geschwindigkeiten zugeordnet, die das Binnenschiff normalerweise erreichen kann. Der Energieaufwand für das Binnenschiff wird mit einem Simulationsprogramm unter der Annahme berechnet, daß Schiffsdieselmotoren in erster Näherung auf den einzelnen Streckenabschnitten gleichförmig arbeiten. Somit wird auf den Streckenabschnitten je nach Fahrtrichtung ein konstanter Anteil der vorhandenen maximalen Motorleistung zur Erreichung der auf den Streckenabschnitten angegebenen Fahrgeschwindigkeiten eingesetzt. Die benötigten Prozentanteile der maximalen Motorleistung für freifließende Gewässer sind aufgrund der i.a. stärkeren Strömung größer als die jene für staugeregelte Flüsse. Während der Schleusungen befindet der Motor sich im Leerlauf.

Neben den Berechnungsparametern, die durch die Binnenwasserstraße vorgegeben werden, sind die Schiffe bezüglich der erreichbaren Geschwindigkeiten und der Emissionsfaktoren der Schiffsdiesel von Interesse für die Berechnungen der Energieaufwendungen und Emissionen.

Im europäischen Vergleich liegt Deutschland mit 2.118 Motorschiffen mit einem Frachtraum von 2.266.227 t an zweiter Stelle hinter den Niederlanden. Zum Einsatz kommen in der Untersuchung zwei moderne Motorgüterschiffe. Auf Rhein und Neckar handelt es sich dabei um das Europaschiff mit einer Nutzlast von 1.350 t. Zusätzlich wird auf dem Rhein mit einem Großmotorschiff von 2.300 t Nutzlast gefahren. Der Frachtraum der betrachteten Schiffe liegt somit über dem Durchschnitt der deutschen Motorschiffe von ca. 1.070 t.

Die technischen Daten zu den Schiffen enthält die Tabelle 5.4-1.

Tabelle 5.4-1: Kenngrößen der Binnenschiffe /VBW, 1994/

	Kenngrößen Europaschiff Rhein und Neckar	Kenngrößen Großmotorschiff auf dem Rhein
max. Motorleistung	650 kW	1.750 kW
Länge	ca. 85 m	110 m
Breite	ca. 9,50 m	11,40 m
Tiefgang	ca. 2,50 m	ca. 3,00 m
Tragfähigkeit	ca. 1.350 t	ca. 2.300 t
Laderaumgröße	ca. 60 m x 7.5 m	75 m x 10 m

Die Kriterien, welche zur Auswahl der Schiffe führten waren einerseits die exakte Abbildung der Realität und andererseits die Datenverfügbarkeit. Für die genannten Motorschiffe liegen aus dem Jahr 1985 /VBW, 1985/ Werte zur Fahrgeschwindigkeit auf Rhein und Neckar vor. Es handelt sich hierbei um gerundete Mittelwerte für den beladenen und leeren Zustand des Schiffs bei Berg- und Talfahrt. Diese Werte basieren auf dem Motorschiff mit 1.350 t Nutzlast und werden für die Studie auf das Schiff mit 2.300 t übertragen, da anzunehmen ist, daß die Geschwindigkeiten des stärker motorisierten und beladenen Schiffs aufgrund der verkehrlichen Randbedingungen auf den Binnenwasserstraßen nicht wesentlich unterschiedlich zu denen des kleineren Schiffs sind. Die Geschwindigkeiten sind in der Tabelle 5.4-2 aufgeführt.

Tabelle 5.4-2: Fahrgeschwindigkeiten des Binnenschiffs auf Rhein und Neckar /VBW, 1985/

Wasserstraße	beladen		leer	
	Bergfahrt	Talfahrt	Bergfahrt	Talfahrt
Rhein	6,5 - 9 km/h	13 - 18 km/h	9,5 - 11,5 km/h	20 - 21 km/h
Neckar	10 km/h	12 km/h	12 km/h	12 km/h

Nach /VBW, 1985/ handelt es sich bei den Angaben zu den Fahrgeschwindigkeiten auf dem Rhein um einen Mittelwert für einen Abschnitt des Rheins. Bei allen Wasserstraßen wird dabei von mittleren Wasserstands- und Strömungsverhältnissen sowie einer Witterung ohne Besonderheiten ausgegangen. Schleusenbetriebszeiten werden hierbei nicht berücksichtigt. Für die Ermittlung einer Fahrt eines bestimmten Schiffs müssen deshalb die von den Mittelwerten abweichenden besonderen Verhältnisse beachtet werden.

Die Klassifizierung der Binnenwasserstraßen erfolgt anhand einer Einteilung in vier Klassen, die auf /Weska, 1993/ (Tab. 5.4-3) zurückgeht.

Tabelle 5.4-3: Klassifizierung der Binnenwasserstraßen /Weska, 1993/

Klasse	Typ / Kennung
1	Fluß, freifließend / FL
2	Fluß, staugeregelt / SG
3	Kanal / KA
4	Schleusen /SL

Für die Berechnung des Energieaufwands müssen die maximale Motorleistung , die Prozentanteile der maximalen Motorleistung für die Klassen der Binnenwasserstraßen in Abhängigkeit der Fahrtrichtung sowie ein spezifischer Energieaufwandswert vorgegeben werden. Wie schon in anderen Studien wird der spezifische Kraftstoffverbrauchswert mit 0,2 kg/kWh festgelegt. Die Wirkungsgradverluste sind in diesem Wert enthalten. Für die Prozentanteile der maximalen Motorleistung in Abhängigkeit von Fahrtrichtung und Klasse der Binnenwasserstraße werden die in Tabelle 5.4-4 angegebenen Werte verwendet.

Tabelle 5.4-4: Prozentuale Anteile an der Motorleistung /EZB, 1993/

Klasse	Typ	Bergfahrt	Talfahrt
1	Fluß, freifließend	95 %	85 %
2	Fluß, staugeregelt	70 %	60 %
3	Kanal	60 %	60%
4	Schleuse	4 %	3 %

Als Auslastungen beim Transport der Wagenladung im Container werden nach Rücksprache mit Reedereien auf dem Rhein 84 % und auf dem Neckar 55 % angenommen. Die geringe Auslastung auf dem Neckar rührt daher, daß die Container wegen der Unterfahrung von Brücken nur in maximal zwei Schichten auf dem Schiff stapelbar sind. Aufgrund der besseren Befahrbarkeit des Rheins ist es möglich hier den wesentlich höheren Auslastungsgrad von 84 % zu erreichen. Das Gewicht eines Containers beträgt 6 t.

Die Schleusenaufenthalte werden nach /VBW, 1990/ mit einer mittleren Dauer von 45 Minuten angesetzt. Die Gesamtdauer der Fahrt ergibt sich, aufsummiert über alle Abschnitte, aus dem Quotient der Abschnittslänge und der auf diesem Abschnitt erreichbaren Geschwindigkeit nach Tabelle 5.4-2, plus der benötigten Schleusenzeiten. Über die Klasse der Binnenwasserstraße und die Fahrtrichtung wird der Prozentanteil der maximalen Motorleistung bestimmt und zusammen mit der Fahrzeit und dem spezifischen Energieaufwandswert der auf dem Streckenabschnitt eingesetzte Energieaufwand ermittelt. Der gesamte Energieaufwand ergibt sich als Summe des Ver-

brauchs auf den Streckenabschnitten. Die antriebsbedingten direkten Emissionen von Binnenschiffen werden über die Emissionsfaktoren aus dem verbrauchten Kraftstoff berechnet.

Die in der vorliegenden Studie verwendeten Emissionsfaktoren entstammen der Studie C "Systemvergleich für unterschiedliche verkehrliche Prozeßabläufe und Transportketten hinsichtlich des Energieeinsatzes und klimarelevanter Emissionen im Güterverkehr" /Steierwald, 1993/. Zum damaligen Zeitpunkt existierten keine repräsentativen Emissionsmessungen an Binnenschiffen. Die lediglich auf Herstellerangaben beruhenden Faktoren bieten aufgrund der Verwendung neuer und optimal eingestellter Motoren bei den Messungen, keine verlässliche Basis zur Bestimmung der Schadstoffemissionen. Da zur Zeit der Berechnungen für die vorliegende Studie keine neue Werte für Emissionsfaktoren vorlagen, wird in diesem Fall auf die genannten Faktoren aus dem Jahr 1993 zurückgegriffen (siehe Tab. 5.4-5).

Tabelle 5.4-5: Emissionsfaktoren für Binnenschiffe /Steierwald, 1993/

Emissionsfaktoren für Binnenschiffe in [g/kg Diesel]				
CO ₂	CO	NO _x	VOC	Staub/Partikel
3,16	12	60	5	2*

* der Wert für Staub/Partikel hat seine Quelle bei /UBA, 1994/

Der Energieaufwand für alle zehn Schleusungsvorgänge einer Fahrt auf dem Rhein wurde mit 786,6 kWh berechnet. Dieser Wert wurde durch die Befragung einer Reederei ermittelt. Dabei wurde 1993 für die Schleusung von insgesamt 36.315 Schiffen ein Strombedarf von 793.410 kWh gemessen. Daraus ergibt ein Bedarf von 21,85 kWh pro Schleusung. In die Einheit MJ umgerechnet entsteht somit auf dem Rhein ein Energieaufwand von 78,66 MJ / Schleusungsvorgang. Für die Berechnung des Energieverbrauchs durch Schleusungsvorgänge auf dem Neckar lagen nur für drei der insgesamt 26 Schleusen exakte Werte vor. Der verbleibende Teil der Schleusen wurde mit dem in /Steierwald, 1993/ berechneten Mittelwert von 9 kWh je Schleusungsvorgang abgebildet. Nach der Umrechnung in MJ ergibt sich eine Summe an Energieaufwendungen für die Schleusungen auf dem Neckar von 1.076,76 MJ.

Die dem einzelnen Transportgut anzurechnende Teilmenge des Gesamtenergieaufwands und der Emissionen aus der Fahrt und den Schleusungen des Binnenschiffs wird anteilig entsprechend dem jeweils festgelegten Transportgewicht ermittelt. Die sich ergebenden Faktoren berechnen sich folgendermaßen: (Ladungsgewicht + Containergewicht) / (Gesamtladungsgewicht * Auslastung). In Anhängigkeit von Gütern und Schiffen ergeben sich die Zuordnungsfaktoren, wie sie in Tabelle 5.4-6 dargestellt sind.

Tabelle 5.4-6: Zuordnungsfaktoren für die Transportgüter Wagenladung (W) und Massengut (M)

Schiffstyp	Rhein 84 %				Neckar 55 %			
	W 25 t	W 15 t	W 0 t	M *	W 25 t	W 15 t	W 0 t	M *
Europaschiff 1.350 t	0,02734	0,01852	0,00529	0,01111	0,04175	0,02828	0,00808	0,01111
Großmotor- schiff 2.300 t	0,01605	0,01087	0,00311	0,06522	Das Großmotorschiff fährt nur auf dem Rhein			

* Die Auslastung im Fall des Massengut-Transports wird stets zu 100 % angenommen. Dies führt auf die folgende Formel zur Berechnung des Zuordnungsfaktors: $\text{Zuordnungsfaktor} = 15 \text{ t} / \text{Gesamtladungsgewicht}$

5.4.4 Zeit und Kosten

Die Transportzeit auf einer Binnenwasserstraße besteht nicht nur aus der reinen Fahrtzeit, sondern umfaßt auch Zeiten, die durch Schleusenaufenthalte und die Betriebsform des Schiffs zustande kommen. Unter der Betriebsform eines Binnenschiffs versteht man den Zusammenhang zwischen der Dauer des Betriebs und dem dazu notwendigen Personaleinsatz. Grundsätzlich werden die folgenden Betriebsformen unterschieden /VBW, 1992/:

- A-Fahrt: 16 Stunden Betriebszeit zwischen 0.00 und 24.00 Uhr (Personaleinsatz: 1 Schiffsführer, 1 Matrose, 1 Schiffsjunge)
- B-Fahrt: 18 Stunden Betriebszeit zwischen 0.00 und 24.00 Uhr (Personaleinsatz: 2 Schiffsführer, 1 Matrose, 1 Schiffsjunge)
- C-Fahrt: 20 Stunden Betriebszeit zwischen 0.00 und 24.00 Uhr (Personaleinsatz: 2 Schiffsführer, 2 Matrosen, 1 Schiffsjunge)
- D-Fahrt: 24 Stunden Betriebszeit zwischen 0.00 und 24.00 Uhr (Personaleinsatz: 2 Schiffsführer, 2 Matrosen)

Die Abfahrtszeiten werden so gewählt, daß der Transport am Donnerstag um 10.00 Uhr am Ziel ist. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 5.4-6 dargestellten Transportzeiten.

Tabelle 5.4-6: Abfahrtszeiten und Transportdauer des Binnenschifftransports

	Rhein			Neckar		
	Mannheim - Weil am Rhein			Mannheim - Plochingen		
Betriebsform	voll	84 %-voll	leer	voll	55 %-voll	leer
A	Di, 9.56 Uhr 48 h 4 min	Di, 14.38 Uhr 43 h 22 min	Di, 18.05 Uhr 39 h 55 min	Mo, 15.22 Uhr 66 h 38 min	Mo, 16.51 Uhr 65 h 9 min	Mo, 20.16 Uhr 61 h 44 min
B	Di, 11.56 Uhr 46 h 4 min	Di, 16.38 Uhr 41 h 22 min	Di, 20.05 Uhr 37 h 55 min	Mo, 15.22 Uhr 66 h 38 min	Mo, 16.51 Uhr 65 h 9 min	Mo, 20.16 Uhr 61 h 44 min
C	Di, 13.56 Uhr 44 h 4 min	Di, 18.38 Uhr 39 h 22 min	Di, 22.05 Uhr 35 h 55 min	Mo, 15.22 Uhr 66 h 38 min	Mo, 16.51 Uhr 65 h 9 min	Mo, 20.16 Uhr 61 h 44 min
D	Di, 17.56 Uhr 40 h 4 min	Di, 22.38 Uhr 35 h 22 min	Mi, 2.05 Uhr 31 h 55 min	Mo, 15.22 Uhr 66 h 38 min	Mo, 16.51 Uhr 65 h 9 min	Mo, 20.16 Uhr 61 h 44 min
	Weil am Rhein - Mannheim			Plochingen - Mannheim		
Betriebsform	voll	84 %-voll	leer	voll	55 %-voll	leer
A	Mi, 9.07 Uhr 24 h 53 min	Mi, 11.15 Uhr 22 h 45 min	Mi, 13.28 Uhr 20 h 32 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min
B	Mi, 9.07 Uhr 24 h 53 min	Mi, 11.15 Uhr 22 h 45 min	Mi, 13.28 Uhr 20 h 32 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min
C	Mi, 9.07 Uhr 24 h 53 min	Mi, 11.15 Uhr 22 h 45 min	Mi, 13.28 Uhr 20 h 32 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min
D	Mi, 9.07 Uhr 24 h 53 min	Mi, 11.15 Uhr 22 h 45 min	Mi, 13.28 Uhr 20 h 32 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min	Mo, 19.03 Uhr 62 h 57 min

6 Energieaufwand und Emissionen des Umschlags

6.1 Stückgut

Zur Bilanzierung des direkten Energieaufwands und der direkten Emissionen ist auch der ggf. notwendige Umschlag zu berücksichtigen. Beim Umschlag des Stückguts können betriebsinterne Unterlagen ausgewertet werden, so daß alle Energieaufwendungen, die direkt mit dem Betrieb der Umschlaganlagen verbunden sind (also auch Beleuchtung und andere Nebenverbraucher), erfaßt werden.

Der Umschlag der Stückgüter erfolgt in den gewählten Planungsaufgaben bei Speditionen, im GVZ oder an einem Bahnhof. Umgeschlagen wird zwischen Lkw und Lkw, Lkw und Bahn sowie zwischen Bahn und Bahn.

Der Umschlag des Stückgut-Pakets mit einem Gewicht von 5 kg erfolgt in aller Regel mit der Hand, im Extremfall mit einer Hubameise. Im Prinzip gestaltet sich dabei der Ablauf eines solchen Umschlagvorgangs in der Weise, daß das ankommende Fahrzeug eine Rampe anfährt und von einem Arbeiter, eventuell mit einer Hubameise entladen wird. Die dabei entnommenen Pakete werden auf der Unterflurförderanlage abgestellt und mittels dieser zu der Rampe befördert, an der ein weiterer Arbeiter das Paket aufnimmt und in das nächste Fahrzeug verlädt. Im Fall des leichten Stückguts kann davon ausgegangen werden, daß dieser Vorgang im wesentlichen unabhängig davon ist, ob von Lkw auf Lkw, Lkw auf Bahn oder von Bahn auf Bahn umgeschlagen wird. Die ermittelten Werte sind somit für alle GVZ und Speditionen anwendbar und plausibel.

Für den Energieaufwand des Umschlags ist in einer ersten Betrachtung die Unterflurförderanlage hauptverantwortlich. Daneben sind jedoch auch die weiteren technischen Einrichtungen, wie Beleuchtung und Heizung sowie die Werkstatt als Verbraucher zu bilanzieren. Aus vorangegangenen Studien ist bekannt, daß sich der Stromverbrauch einer Umschlaghalle, wenn man ihn auf die Tonne umgeschlagenes Gut bezieht, zu 60 % aus Beleuchtung, 20 % Werkstattbetrieb und 20 % sonstigen Nebenverbrauchern zusammensetzt /Steierwald, 1993/.

Durch die Befragung der Speditionen wurde ein Wert von 0,063 MJ für den Umschlag eines Pakets mit 5 kg ermittelt. Dieser Wert enthält alle Anteile aus Beleuchtung, Heizung, Werkstatt und Betrieb der Umschlaganlage.

6.2 Wagenladung

Die gebrochenen Transporte der Wagenladung beschränken sich auf die Fälle Transit-Güterverkehr und Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum. Im Transit-Verkehr kommt es zu Umschlägen zwischen Lkw bzw. Bahn und dem Binnenschiff in Plochinger Hafen entlang der Relation Mannheim - Ulm. Im ländlich strukturierten Raum entstehen Umstellungen der Waggons beim konventionellen Bahntransport, da diese stets über das zentrale GVZ in Villingen oder Ravensburg abgewickelt werden und dort ein Zugwechsel durchgeführt wird. In den GVZ werden aufgrund der Tatsache, daß die Waggons nicht ent- und beladen sondern nur verschoben werden, keine Umschläge berechnet.

Für den Containerumschlag wird gemäß /Umweltbundesamt, 1994/ ein Wert von 0,9 kWh / Bruttotonne angenommen. Inklusive eines Containergewichts von 6 t würden sich die folgenden Energieaufwendungen für den Wagenladungsumschlag im Plochinger Hafen ergeben:

$$\text{Wagenladung 0 t: } 6 \text{ t} * 0,9 \text{ kWh} * 3,6 \text{ MJ / kWh} = 19,44 \text{ MJ}$$

$$\text{Wagenladung 15 t: } (15 \text{ t} + 6 \text{ t}) * 0,9 \text{ kWh} * 3,6 \text{ MJ / kWh} = 68,04 \text{ MJ}$$

$$\text{Wagenladung 25 t: } (25 \text{ t} + 6 \text{ t}) * 0,9 \text{ kWh} * 3,6 \text{ MJ / kWh} = 100,44 \text{ MJ}$$

Im Vergleich mit bekannten Werten ergeben diese Berechnungen unverhältnismäßig hohe Energieaufwendungen. Aus diesem Grund wird auf die bereits aus /Steierwald, Voß, Voß, 1993/ bekannte Verfahrensweise zurückgegriffen und der Energieverbrauch für die Container-Umschläge zwischen Land und Wasser neu berechnet. dabei wird davon ausgegangen, daß es unerheblich ist, ob vom Lkw oder von der Bahn auf das Schiff, oder umgekehrt umgeschlagen wird. Die Berechnungen wurden ursprünglich für einen Portalkran im Mannheimer Hafen durchgeführt, sind jedoch wegen der ähnlichen Bauart des Krans im Plochinger Hafen auf diesen übertragbar. Für die jeweilige Umschlagsrichtung ergeben sich die in Tabelle 6.2-1 aufgeführten Werte.

Tabelle 6.2-1: Energiebedarfswerte für den Containerumschlag im Plochinger Hafen

Umschlag	Wagenladung 25 t	Wagenladung 15 t	Wagenladung 0 t
Schiff - Bahn/Lkw	12,42 MJ	11,38 MJ	10,26 MJ
Bahn/Lkw - Schiff	12,24 MJ	11,30 MJ	10,22 MJ

6.3 Massengut

Die Massenguttransporte gehen ebenso wie die Wagenladungstransporte direkt, d.h. ohne Umschlag vom Start- zum Zielpunkt. Eine Ausnahme bilden hierbei die Transport mit dem Abrollcontainer in den Ballungsgebieten Stuttgart, Karlsruhe und Oberrhein sowie der Transport mit dem Binnenschiff auf der Relation Mannheim- Ulm. Dieser Binnenschifftransport muß im Plochinger Hafen wie zuvor die Container der Wagenladung umgeschlagen werden.

Es wird also zwischen dem reinen Massengut-Umschlag und dem Umschlag des Massenguts im Abrollcontainer unterschieden. Für letzteren wird der Energieaufwand mit einem 5-minütigen Leerlauf des Lkw-Motors simuliert. Der sich somit ergebende Wert beträgt 14,36 MJ (Diesel). Für den reinen Umschlag des Massenguts im Plochinger Hafen vom Binnenschiff auf den Lkw liegen Werte der Firma Mertz (einziger Betreiber einer Nur-Umschlags-Anlage in Stuttgart) vor. Danach beläuft sich der Energiebedarf des Umschlags auf 2,77 kWh / t. Umgerechnet ergibt sich für die 15 t Kies ein Wert von 149,58 MJ. Dieser umfaßt neben dem Kran, der hierbei nur einen kleinen Teil des Bedarfs ausmacht, auch die Förderbänder und alle Nebenanlagen. Da die 0-t-Rückfahrt von Plochingen nach Mannheim eine Leerfahrt ist, findet in diesem Fall im Plochinger Hafen kein Umschlag statt.

7 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen

7.1 Einführung

7.1.1 Allgemeines

Vergleichende Untersuchungen der umwelt- und klimarelevanten Auswirkungen verschiedener Güterverkehrssysteme beschränken sich bisher in aller Regel auf die antriebsbedingten Effekte /Bialonski, 1990; GVP, 1995/. Eine weitergehende Berücksichtigung der nicht antriebsbedingten Effekte im Zusammenhang mit der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung erfolgt in den Untersuchungen von /INFRAS, 1995a/ und von /Frischknecht, 1994/. Die Berechnungen basieren dabei auf Durchschnittsfaktoren und beziehen sich auf die Verhältnisse in der Schweiz. Die Ergebnisse zeigen jedoch, daß z. B. der Anteil der nicht antriebsbedingten Energieaufwendungen je nach Verkehrssystem zwischen 20% und 40 % liegt und somit nicht von vornherein vernachlässigt werden kann. Erste Ansätze, den indirekten Energieaufwand sowie die indirekten Emissionen aufgrund der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung bei konkreten Transportaufgaben im Güterverkehr zu berücksichtigen, werden in /Steierwald, 1994/ durchgeführt. Die Ermittlung der indirekten Effekte erfolgt dabei mit Hilfe einer makroanalytischen Betrachtung.

In der vorliegenden Studie wird der direkte und indirekte Energieaufwand sowie die direkten und indirekten Emissionen für konkrete Transportaufgaben unter Zugrundelegung unterschiedlicher Transportketten bestimmt. Dabei wird von der Verwendung pauschaler Durchschnittswerte abgegangen. Es werden vielmehr die genau spezifizierten Fahrzeuge und Verkehrswege betrachtet. Das Ziel der Untersuchung ist die vergleichende Untersuchung des kumulierten Energieaufwands sowie der kumulierten Luftschadstoffemissionen von CO₂, CO, Partikel, NO_x und VOC für die Erfüllung konkreter Transportaufgaben (vgl. auch /Stekeler, 1996/). Der kumulierte Energieaufwand setzt sich aus den nicht antriebsbedingten Aufwendungen im Zusammenhang mit der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung und aus dem antriebsbedingten Energieaufwand für den Betrieb der Verkehrsmittel zusammen. Der antriebsbedingte Energieaufwand ergibt sich als Summe des direkten Endenergieeinsatz im Fahrzeug und der Aufwendungen im Zusammenhang mit der Energieträgerbereitstellung. Entsprechendes gilt für die kumulierten Emissionen.

7.1.2 Definition des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen

„Der kumulierte Energieaufwand (KEA) gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA_H), die Nutzung (KEA_N) und die Entsorgung (KEA_E) des ökonomischen Gutes dar“ /VDI, 1995/. Die o. g. Definition läßt sich auf den Begriff der kumulierten Emissionen übertragen, die zum einen aufgrund der Energienutzung und zum anderen aufgrund der Prozeßführung freigesetzt werden. Die Bestimmung des KEA wird auch als Lebenszyklusanalyse (life cycle assessment, LCA) bezeichnet.

Der KEA setzt sich aus dem kumulierten Prozeßenergieaufwand (KPA) und dem kumulierten Nichtenergetischen Aufwand (KNA) zusammen. Der KPA umfaßt alle über Bereitstellungs-nutzungsgrade primärenergetisch bewerteten Energieträger. Der KNA erfaßt zum einen den Nichtenergetischen Verbrauch (NEV) von Energieträgern (z. B. von Bitumen) und zum anderen den Stoffgebundenen Energieinhalt (SEI) aller brennbaren Stoffe, die nicht in der nationalen Energiestatistik ausgewiesen sind (z. B. Biomasse). Dies gilt analog für die kumulierten Emissionen.

Die Bestimmung des KEA und der kumulierten Emissionen erfolgt im Rahmen einer Bilanz. Bilanzgrößen sind hierbei die Primärenergieträger sowie primäre und sekundäre Rohstoffe als Inputgrößen sowie das Zielprodukt, Kuppelprodukte, Abwärme, Abfälle und Emissionen als Outputgrößen. Die Primärenergieträger und die Rohstoffe werden für die Bereitstellung der betrieblichen Produktionsfaktoren Fertigungsstoffe, Betriebsstoffe und Betriebsmittel benötigt. Abbildung 7.1-1 stellt diesen Zusammenhang graphisch dar und listet Beispiele für die Produktionsfaktoren auf.

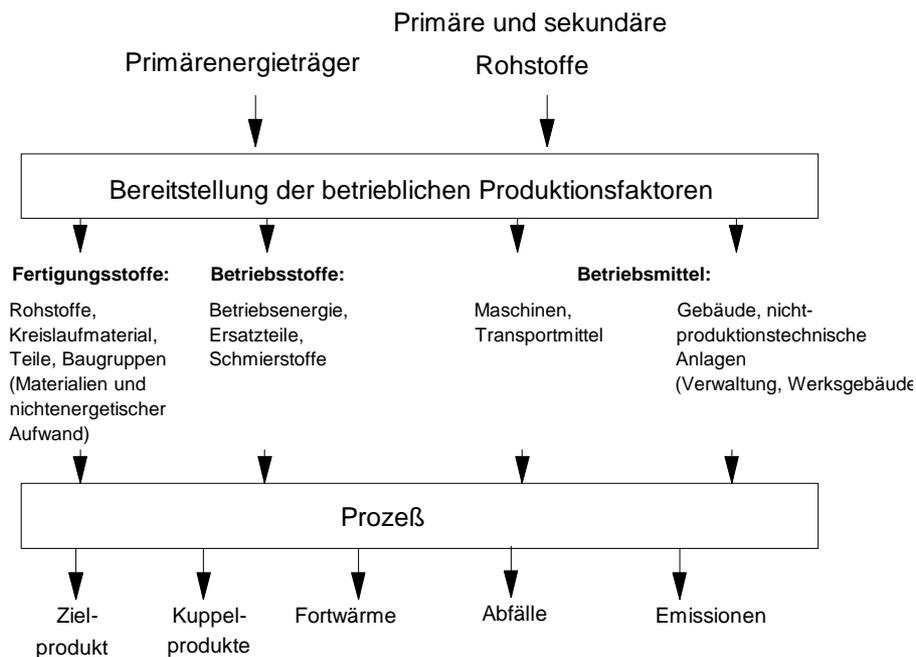


Abbildung 7.1-1: Schema von Stoff- und Energiebilanzen für einen Herstellungsprozeß /VDI, 1995/

Die eindeutige Festlegung und Dokumentierung der Bilanzgrenzen ist eine wichtige Grundlage der Bilanzierung. Nur vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse eindeutig zu interpretieren. Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen basiert auf einer Stoffbilanz, die alle Stoffströme über die Bilanzgrenzen erfaßt. Darauf baut die Energiebilanz auf, die zusammen mit der Stoffbilanz als Grundlage zur Erstellung der Emissionsbilanz dient. Die Aufwendungen in jeder Prozeßstufe teilen sich in den direkten prozeßspezifischen Material- und Energieeinsatz und in den indirekten, nur über Schlüssel und Abschreibungen zuweisbaren Aufwand auf. Wird z. B. das Zielprodukt „Transportdienstleistung“ bilanziert, so ist der Betriebsenergieeinsatz ein direkter Aufwand während die Aufwendungen für die Bereitstellung des Fahrzeugs und der Infrastruktur dem Zielprodukt nur über Schlüssel zugeordnet werden können und damit indirekte Aufwendungen darstellen.

Die primärenergetische Bewertung von Energieträgern erfolgt über deren Bereitstellungsnutzungsgrad. Dieser ist vergleichbar mit dem Wirkungsgrad der Prozeßkette von der Primärenergieträgergewinnung aus der Lagerstätte bis zur Bereitstellung des Endenergieträgers beim Verbraucher (vgl. auch Kap. 7.2.1).

7.1.3 Methodik zur Bestimmung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen

Die beiden gebräuchlichsten Methoden zur Bestimmung des KEA sind die *Input-Output-Analyse* sowie die *Prozeßkettenanalyse*. Die *energetische Input-Output-Analyse* basiert auf einem wirtschaftswissenschaftlichem Verfahren zur Analyse der Verflechtungen der Volkswirtschaft (Makroanalyse). Sie ermöglicht die Bestimmung des kumulierten Energieaufwands von Waren einer Gütergruppe und Dienstleistungen auf der Basis von Preisinformationen /Weber, 1995, Drake, 1996/.

Die *Prozeßkettenanalyse* ist hingegen ein Verfahren zur detaillierten Bestimmung des KEA von Produkten und Dienstleistungen. Das Verfahren orientiert sich an den technischen Prozessen, die für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes notwendig sind, wobei die Prozesse mehr oder weniger stark aggregiert sein können (Mikroanalyse). Ausgehend vom Endprodukt wird dabei das Netzwerk aller vorgelagerten Prozeßstufen entwickelt. Jeder Input eines Prozesses entspricht dabei dem Output eines vorgelagerten Prozesses, so daß sich das Netzwerk als aufgeästelte Baumstruktur darstellt. Die Verzweigungen werden einerseits bis zu einer sinnvoll gewählten Abbruchstelle und andererseits bis zur Rohstoffebene zurückverfolgt. Anschließend wird jeder Prozeß auf die zu bilanzierenden Zuflüsse und Abflüsse untersucht. Abbildung 7.1-2 zeigt beispielhaft eine Prozeßkette der Kupfererzeugung.

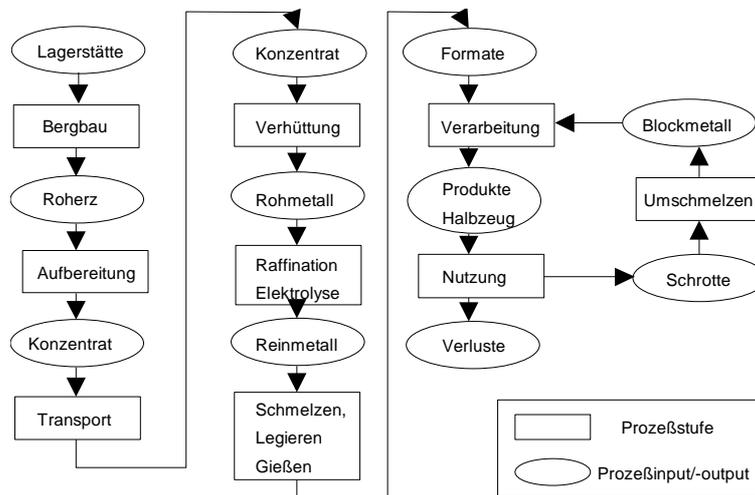


Abbildung 7.1-2: Prozeßkette der Kupfergewinnung, -verarbeitung und -nutzung /Krüger, 1995/

Jede Prozeßstufe der dargestellten Prozeßkette hat wiederum eine eigene vorgelagerte Prozeßkette; damit setzt sich das gesamte Prozeßnetzwerk nahezu ins Unendliche fort. Nach dem Aufstellen des Prozeßnetzwerkes werden für jeden einzelnen Prozeß die Zuflüsse an Primärenergie

bestimmt und in geeigneter Weise dem Endprodukt zugeordnet. Anschließend wird die Primärenergie aufsummiert und man erhält den KEA des Endproduktes. Die Bestimmung der kumulierten Emissionen erfolgt analog.

Die Durchführung einer Prozeßkettenanalyse erfordert einen erheblichen Aufwand für die Datenermittlung. Aufgrund der sich nahezu ins Unendliche verzweigenden Baumstruktur muß ein sinnvolles Abbruchkriterium gewählt werden, das die Zahl der zu betrachtenden Prozeßschritte auf ein sachgerechtes und operationables Maß reduziert. Der Wahl dieses Kriteriums muß besondere Sorgfalt gelten, so daß bedeutende Beiträge zum KEA nicht vernachlässigt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen auf das Instrument der Prozeßkettenanalyse zurückgegriffen. Mit Hilfe einer Stoffflußanalyse werden der Material- und Energieträgereinsatz sowie die Transport- und Energieumwandlungsprozesse der betrachteten Prozeßkette ermittelt. Beschreibt die Prozeßkette die Herstellung eines Gutes, so wird der Material- und Energieträgereinsatz linear über dessen durchschnittliche Nutzungsdauer abgeschrieben. Unter Berücksichtigung der vorgelagerten Material- und Energieträgerbereitstellung werden der kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen ermittelt (vgl. auch Abb.7.1-3). Im letzten Schritt erfolgt schließlich die Zuordnung zu einer konkreten Transportaufgabe mit Hilfe geeigneter Zuordnungsschlüssel. Die Aufwendungen im Zusammenhang mit der Verkehrsinfrastrukturbereitstellung werden über die Streckenbelastung und die Aufwendungen bezüglich der Fahrzeugbereitstellung werden über die Lebensfahrleistungen der Fahrzeuge einer Transportaufgabe zugeordnet.

Gemäß der Definition des KEA in /VDI, 1995/ wird der kumulierte nichtenergetische Aufwand bei der Bestimmung des KEA mitberücksichtigt. Darunter versteht man den primärenergetisch bewerteten Energieinhalt aller nichtenergetisch eingesetzten Energieträger (z. B. Bitumen im Straßenbau) und des stoffgebundenen Energieinhaltes (z. B. Bauholz).

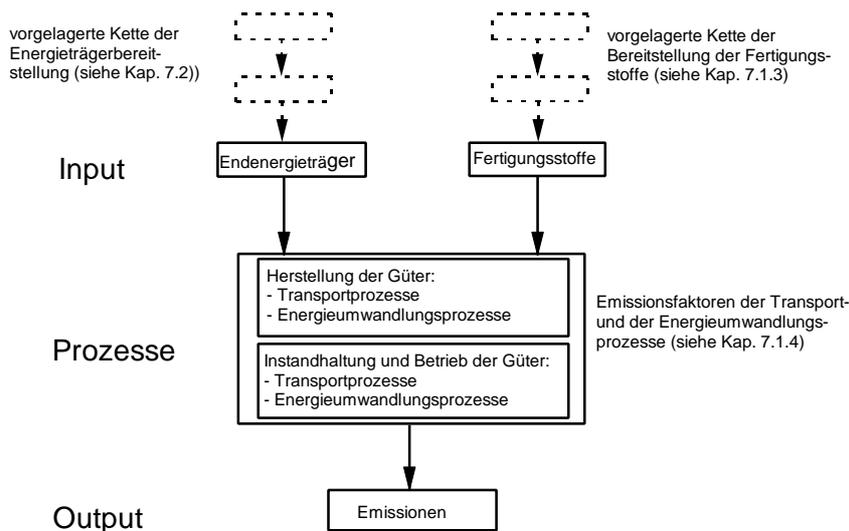


Abbildung 7.1-3: Vereinfachte Prozeßkette zur Bestimmung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen

7.1.4 Bereitstellung der Fertigungsstoffe

Ein erheblicher Teil des Energieaufwands für die Herstellung und Nutzung von Produkten wird für die Produktion der Fertigungsstoffe eingesetzt. Die im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Fahrzeuge und Infrastruktureinrichtungen bestehen im wesentlichen aus einer geringen Anzahl verschiedener Materialien. Daher bietet es sich an, für alle verwendeten Materialien den Primärenergieaufwand sowie die Emissionen bei ihrer Produktion zu bestimmen und auf eine Masseneinheit zu beziehen. Die Ermittlung des Primärenergieaufwands und der Emissionen im Zusammenhang mit der Materialbereitstellung kann anschließend über das Gewicht der Fertigungsstoffe eines Produktes erfolgen.

Die Ermittlung des Energieaufwands und der Emissionen des Herstellungsprozesses von Materialien, ausgehend von der Lagerstätte der Rohstoffe, erfordert eine umfassende Datenermittlung direkt bei den beteiligten Unternehmen. Dies konnte und sollte im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden. Daher wird auf Literaturangaben zurückgegriffen. Als Bilanzgebiet für die Ermittlung der Daten wird in /Frischknecht, 1994/ meist die Produktion und der Verbrauch in Deutschland gewählt. Tabelle 7.1-1 listet die Werte der am häufigsten verwendeten Materialien auf. Insbesondere bei Metallen ist der Anteil der Sekundärerzeugung aus Altmaterialien relativ hoch. Dies ist in den dargestellten Werten berücksichtigt.

Tabelle 7.1-1: Spezifische Primärenergie- und Emissionswerte für die Bereitstellung ausgewählter Materialien /Frischknecht, 1994/

je kg Material	Primärenergie	CO ₂	CO	Partikel ¹	NO _x	VOC
	[MJ/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
Aluminium (28 % Sekundär-, 72 % Primäraluminium)	162	9.110	11,1	36,1	23,0	24,5
Betonkies	0,1	6	0,0	0,0	0,0	0,0
Flachglas, beschichtet	14	1.111	1,9	35,3	1,5	3,2
Gummi	38	2.328	0,8	2,1	4,0	23,0
Kalkstein	0,1	6	0,0	72,0	0,0	0,0
Kupfer	91	5.083	1,6	6,3	8,5	16,4
Polyethylen (HD)	91	2.397	0,9	3,7	6,6	19,6
PVC schlagfest	59	2.074	0,6	2,8	5,2	12,2
Stahl niedriglegiert	41	2.670	1,3	45,8	5,9	12,3
Stahl unlegiert (80 % Oxygen-, 20 % Elektrostahl)	34	2.200	1,0	39,3	4,9	10,3
Zement	6	937	0,2	111,4	2,5	1,3

7.1.5 Energieumwandlungs- und Transportprozesse

7.1.5.1 Energieumwandlungsprozesse

Analog der Vorgehensweise bei den Fertigungsstoffen werden für die Energieumwandlungs- und Transportprozesse Energie- und Emissionsfaktoren ermittelt, die für alle betrachteten

Für industrielle Verarbeitungsprozesse bzw. für Baumaßnahmen werden neben den Fertigungsstoffen Prozesswärme und Kraft benötigt. Sofern damit ein Einsatz von Brennstoffen verbunden ist, werden bei der Umwandlung der Energieträger Emissionen freigesetzt. Die Bereitstellung der Endenergieträger wird in einem vorgelagerten Schritt über den Bereitstellungsnutzungsgrad sowie die entsprechenden Emissionsfaktoren berücksichtigt (siehe auch Kap. 7.2). Bezogen auf die eingesetzte Endenergie ergeben sich die in Tabelle 7.1-2 dargestellten Werte.

Tabelle 7.1-2: Primärenergie- und Emissionsfaktoren für Energieumwandlungsprozesse /Frischknecht, 1994, UBA, 1993, eigene Berechnungen/

Endenergieträger	Primärenergie	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[TJ _{PE} /TJ _{EE}]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
¹ In /Frischknecht, 1994/ werden die Staub-, Ruß-, und Partikelemissionen unter dem Oberbegriff Partikel zusammengefasst. Es wird keine Unterscheidung nach Partikelgröße und danach Wirkungskategorien durchgeföhrt. Dies ist insbesondere beim Vergleich mit den anderen Partikelemissionen zu beachten. Diese umfassen ausschließlich die Rußemissionen im Abgas der Fahrzeuge.						
Erdgas in Feuerung (Kleinverbraucher)	1,07	58.610	60	1	50	270
Erdgas in Feuerung (verarbeitendes Gewerbe)	1,06	58.440	20	1	70	130

7.1.5.2 Transportprozesse

Die Herstellung industrieller Güter sowie von Bauten ist meist mit umfangreichen Transportprozessen per Lkw bzw. per Bahn verbunden². Die Berücksichtigung dieser Transporte erfolgt über die direkten spezifischen Energie- und Emissionsfaktoren /Kaltschmitt, 1996/ unter Berücksichtigung der vorgelagerten Effekte im Zusammenhang mit der Energieträgerbereitstellung (vgl. Kap. 7.2). Für den Straßengütertransport wird angenommen, daß 50 % der Transporte mit einem Solo-Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 28 t und 50 % der Transporte mit einem Lkw-Zug mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t erfolgen. Die mittlere Auslastung dabei ist 50 % (Hinfahrt voll, Rückfahrt leer). Die Energie- und Emissionsfaktoren des Gütertransports mit der Bahn basieren auf Durchschnittswerten der Deutschen Bundesbahn. Tabelle 7.1-3 zeigt die Primärenergie- und Emissionsfaktoren, die zur Berücksichtigung der Transportprozesse verwendet wurden.

Tabelle 7.1-3: Primärenergie- und Emissionsfaktoren für Transportprozesse /Kaltschmitt, 1996, eigene Berechnungen/

Transporte	Primärenergie	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[MJ/tkm]	[g/tkm]	[g/tkm]	[g/tkm]	[g/tkm]	[g/tkm]
Lkw	1,17	84,7	0,25	0,06	1,00	0,15
Bahn	0,66	37,5	0,06	0,02	0,19	0,13

7.2 Bereitstellung der Energieträger

7.2.1 Einführende Bemerkungen

Der Einsatz von Energieträgern beim Verbraucher initiiert durch deren Gewinnung und Bereitstellung eine Vielzahl von Energieaufwendungen und Emissionen. Diese werden, ausgehend vom Rohstoff in der Lagerstätte, bis zum Einsatz beim Verbraucher ermittelt und dem Energieträger zugewiesen. Damit ist es möglich, den Energieträger primärenergetisch zu bewerten und die Emissionen bei der Bereitstellung zu bestimmen. In der vorliegenden Studie wird die Bereitstellung von folgenden Energieträgern untersucht:

- a. Mineralölprodukte (vgl. Kap. 7.2.2):

Bereitstellung von

² Binnenschifftransporte werden aufgrund ihres relativ geringen Transportanteils nicht betrachtet.

- Dieselkraftstoff,
- leichtem und schwerem Heizöl und
- Bitumen.

b. Elektrische Energie (vgl. Kap. 7.2.3):

Bereitstellung von

- Bahnstrom der ehemaligen Deutschen Bundesbahn in den alten Bundesländern und in Baden-Württemberg.
- Strom für das öffentliche Netz in den alten Bundesländern und in Baden-Württemberg.

c. Gasförmige Brennstoffe (vgl. Kap. 7.2.4):

- Bereitstellung von Erdgas.

Eine geeignete Größe zur Beschreibung der Höhe der Aufwendungen für die Energieträgerbereitstellung stellt der Bereitstellungsnutzungsgrad g dar. Dieser ist definiert als das Verhältnis des Energieinhaltes des Energieträgers am Einsatzort zum kumulierten Energieaufwand für seine Bereitstellung /VDI, 1995/ (siehe auch Kap. 7.1.2):

$$g = \frac{\text{Energieinhalt des Energieträgers am Einsatzort}}{\text{KEA der Energieträgerbereitstellung}} \quad (7.2-1)$$

In der vorliegenden Studie wird der KEA der im Zusammenhang mit der Energieträgerbereitstellung notwendigen Betriebsmittel, wie z. B. von Raffinerien oder von Kraftwerken, nicht betrachtet. Damit entspricht der KEA der Energieträgerbereitstellung dem primärenergetisch bewerteten Input an Energieträgern. Der Kehrwert des Bereitstellungsnutzungsgrades wird im folgenden als bezogener Primärenergieaufwand bezeichnet.

Die Emissionen bei der Energieträgerbereitstellung werden auf den Energieinhalt des Energieträgers am Einsatzort bezogen und man erhält die bezogenen Emissionsfaktoren der Bereitstellung e' :

$$e' = \frac{\text{Emissionen bei der Energieträgerbereitstellung}}{\text{Energieinhalt des Energieträgers am Einsatzort}} \quad (7.2-2)$$

Bei der Bestimmung des Primärenergieaufwandes und der Emissionen für die Energieträgerbereitstellung ergeben sich eine Reihe von Abgrenzungsproblemen. Diese betreffen u. a. die zeitlichen, räumlichen und stofflichen Systemgrenzen.

Als Bezugsjahr der Untersuchung wird das Jahr 1992 gewählt. *Zeitliche Abgrenzungsprobleme* ergeben sich durch Änderungen der Produktionsstrukturen und Bezugsquellen innerhalb des Bezugsjahrs.

Ein *räumliches Abgrenzungsproblem* ergibt sich daraus, daß die Primärenergieträger und Sekundärenergieträger für die in der Bundesrepublik bzw. in Baden-Württemberg erzeugten Endenergieträger aus unterschiedlichen Ländern stammen, die zum einen unterschiedliche Produktionsstandards in der Energieträgergewinnung aufweisen und zum anderen eine unterschiedliche Stromerzeugungsstruktur haben. Weiterhin wird ein Teil der im Verkehr eingesetzten Mineralölprodukte aus dem Ausland importiert.

Stoffliche Abgrenzungsprobleme ergeben sich aus der kombinierten Erzeugung mehrerer Produkte in einem Produktionsprozeß, wie z. B. der Erzeugung von Mineralölprodukten in der Raffinerie. Der Produktionsaufwand kann bei dieser sogenannten Kuppelproduktion nicht immer eindeutig einem bestimmten Produkt zugeordnet werden.

Ein weiteres Problem ergibt sich aufgrund der primärenergetischen Bewertung der regenerativen Energiequellen sowie der Kernenergie. In der vorliegenden Studie erfolgt die Bewertung entsprechend dem Vorschlag aus /VDI, 1995/. Demnach entspricht der Primärenergieinput von Wasserkraftwerken der potentiellen Energie des Wassers im Einlaufbecken. Dabei kann der mittlere Nettonutzungsgrad von Wasserkraftwerken laut /Schaefer, 1993/ mit 84 % angesetzt werden. Bei der primärenergetischen Bewertung von Strom aus Kernkraftwerken wird der mittlere thermische Nutzungsgrad der Kraftwerke von 33 % sowie der Bereitstellungsnutzungsgrad der Kernbrennstoffe herangezogen /VDI, 1995/. Die primärenergetische Bewertung der Stromerzeugung aus Müll, Klärgas, Gichtgas und Abfallholz erfolgt über deren Heizwert.

Ein weitverbreitetes rechnergestütztes Programm für die Ermittlung des Primärenergieaufwands und der Emissionen aufgrund der Energiebereitstellung ist das „Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme“ (GEMIS) /Fritsche, 1994/. In seiner aktualisierten Fassung von 1994 stellt es die Datengrundlage für die Bereitstellung der im Rahmen der vorliegenden Studie nicht bilanzierten weiteren Sekundärenergieträger dar (vgl.Tab.7.2-1).

Tabelle 7.2-1: Bezogener Primärenergieaufwand und bezogene Emissionen der Brennstoffbereitstellung /Fritsche, 1994/

	Bezogener Primärenergieaufwand	Bezogene Emissionen				
		CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[TJ _{PE} /TJ _{EE}]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
Steinkohle	1,06	4.710	2,9	17,3	12,8	500,8
Braunkohle	1,03	3.790	0,9	1,5	2,7	1,9
Uran	1,04	2.650	3,2	1,7	10,9	7,1

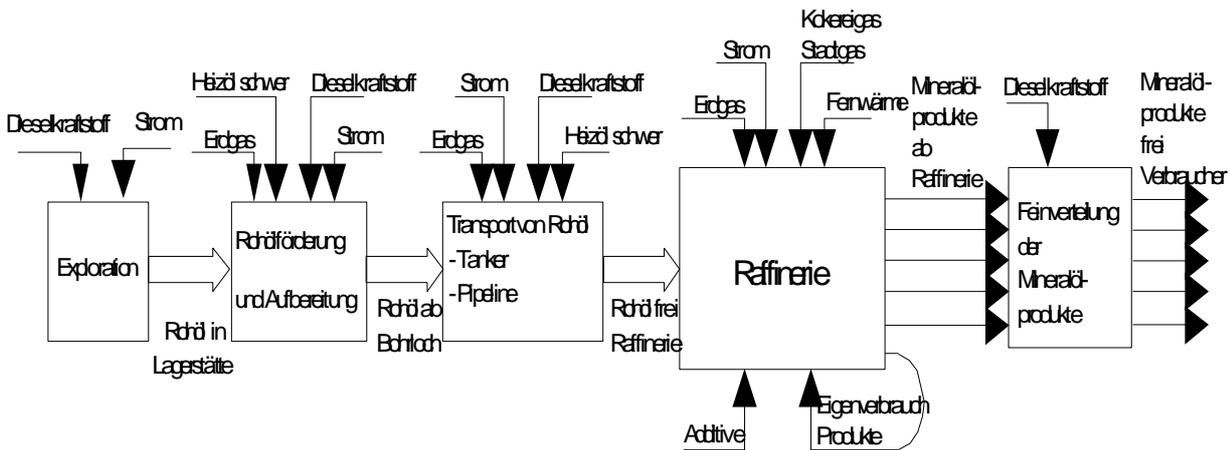
Der hohe VOC-Emissionsfaktor für die Steinkohlebereitung ergibt sich vor allem aus den Methanemissionen, die bei der im Untertagebau geförderten deutschen Steinkohle freigesetzt werden (Bewetterung der Schachtanlagen).

7.2.2 Mineralölprodukte

7.2.2.1 Einführende Bemerkungen

Neben dem Einsatz des Primärenergieträgers Rohöl in der Raffinerie muß im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Mineralölprodukten weitere Energie aufgewendet werden. Diese wird für die Exploration und die Förderung des Rohöls, für den Transport des Rohöls zu den Verarbeitungsstätten, die Aufbereitung des Rohöls in den Raffinerien und die Feinverteilung der Mineralölprodukte zu den Endverbrauchern benötigt. Abbildung 7.2-1 stellt die einzelnen Prozeßschritte sowie deren Energieträgerinput dar. Anhand der dargestellten Prozeßkette werden der Primärenergieaufwand sowie die Luftschadstoffemissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung der Mineralölprodukte Dieselkraftstoff, leichtes und schweres Heizöl sowie Bitumen bestimmt. Das Bezugsjahr der Untersuchung ist 1992, der Bilanzraum entspricht dem Gebiet der Bundesrepublik. Es wird angenommen, daß das zur Verarbeitung eingesetzte Rohöl aus dem Durchschnitt aller Lieferländer stammt. Der Betriebsstoffeinsatz der Raffinerieanlagen entspricht dem Durchschnittswert des Jahres 1992. In den folgenden Kapiteln werden der Primärenergieaufwand und die Emissionen der in Abbildung 7.2-1 dargestellten Prozesse bestimmt.

Abbildung 7.2-1: Prozessschritte und Energieinput der Bereitstellung von Mineralölprodukten.



7.2.2.2 Rohölförderung, -aufbereitung und -transport

Die Bereitstellung von Rohöl frei Raffinerie umfaßt die Prozesse im Zusammenhang mit der Exploration der Lagerstätten, der Rohölförderung und -aufbereitung und schließlich dem Rohöltransport aus dem Förderland bis zur Raffinerie im Inland.

Vor der Rohölförderung steht die *Exploration*, also die Suche nach Lagerstätten und deren Erschließung. Dabei muß insbesondere Energie für die Durchführung von Probebohrungen zur geophysikalischen Untersuchung aufgewendet werden. Nach /Fritsche, 1994/ kann dieser Aspekt jedoch vernachlässigt werden, da die für die Exploration aufgewendete Energie nur einen Anteil von unter 0,1 % des Energieinhalts der Gesamtförderung aus der Lagerstätte hat.

Die Höhe des Energieaufwands und damit auch der Emissionen im Zusammenhang mit der *Rohölförderung und -aufbereitung* hängt in erster Linie von der Qualität der Lagerstätte und der daraus resultierenden Fördertechnik ab. Die heute eingesetzten Fördertechniken werden in drei Klassen eingeteilt. Bei der *primären Förderung* wird das Rohöl unter Ausnutzung des natürlichen Lagerdrucks oder mit Hilfe von Pumpen gefördert. Mit dieser Technik können ca. 30 % des gesamten eingelagerten Rohöls gefördert werden. Eine Möglichkeit zur Erhöhung des Ausbeutegrades ist das Einpressen von Wasser in die Lagerstätte. Bei dieser *sekundären Förder-*

technik fallen zusätzliche Energieaufwendungen für das notwendige Pumpsystem an. Mit Hilfe der *tertiären Fördertechnik* kann der Ausbeutegrad nochmals erhöht werden. Dabei werden Dampf oder chemische Zusätze in das Vorkommen injiziert, um damit die Viskosität des Rohöls herabzusetzen. Diese Technik bedingt einen relativ hohen Energieeinsatz. Der Anteil der angewandten Fördertechnik an der Gesamtförderung unterscheidet sich für die einzelnen Förderregionen. So wird nach /Fritsche, 1994/ in der OPEC zu 80 % die primäre und nur zu 20 % die sekundäre Fördertechnik angewandt, während bei der Förderung in Westeuropa jeweils zur Hälfte von der primären bzw. sekundären Technik ausgegangen wird. Nur 14 % der deutschen Rohölförderung kann hingegen nach /Kaltschmitt, 1996/ primär gefördert werden, während für 60 % der Rohölförderung auf das sekundäre und zu 16 % auf das tertiäre Verfahren zurückgegriffen werden muß.

Zusammen mit dem Rohöl werden beträchtliche Mengen an Erdölgas gefördert. Teilweise wird dieses energetisch genutzt, teilweise jedoch auch reinjiziert oder abgefackelt. Daneben entweicht das Gas auch als diffuse Verluste in die Atmosphäre. Durch das Abfackeln und die stofflichen Verluste werden CO₂- und insbesondere VOC-Emissionen (Methan und andere Kohlenwasserstoffe) freigesetzt.

Nach der Förderung muß das Rohöl aufbereitet werden. Dabei wird mitgeführtes Gas und Wasser vom Öl getrennt. Dazu wird das Rohöl entweder erhitzt, chemisch behandelt, der Schwerkraft oder elektrischen Feldern ausgesetzt. Als Energieträger werden dafür nach /Fritsche, 1994/ schweres Heizöl und Erdölgas eingesetzt.

Der Transport des Rohöls aus den Fördergebieten der OPEC bis in die Bundesrepublik Deutschland erfolgt mittels Tankern. Die Fördergebiete der EU sowie der GUS liefern das Rohöl über Pipelines. Die Aufwendungen für den Transport des inländischen Rohöls werden vernachlässigt. In Tabelle 7.2-2 sind die Rohölversorgungsstruktur der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992 sowie die zugrundegelegten Transportentfernungen für das Rohöl dargestellt. Die Förderregion „OPEC und andere“ umfaßt alle Fördergebiete im Nahen Osten, in Afrika und in Südamerika.

Tabelle 7.2-2: Struktur der Rohölversorgung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992 sowie Rohöltransportentfernungen /Fritsche, 1994, MWV, 1993/

Herkunft	Rohölbezug	Anteil am Rohölaufkommen	Transportdistanz des Rohöls
	[Mio. t]	[%]	[km]
Westeuropa	29,3	28,6	500
OPEC und andere	53,0	51,8	8.800
GUS	16,8	16,4	2.500
Inlandsförderung	3,3	3,2	0
Rohölaufkommen	102,3	100	

Mit Hilfe des Programms GEMIS 2.1 /Fritsche, 1994/ werden der Primärenergieaufwand sowie die Emissionen unter den dargestellten Rahmenbedingungen für die Bereitstellung von Rohöl in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992 berechnet (vgl.Tab.7.2-3). Der Nutzungsgrad für die Rohölbereitstellung in der Bundesrepublik beträgt im Jahr 1992 damit rund 96 %.

Tabelle 7.2-3: Primärenergieaufwand und Emissionen bei Rohölförderung, -aufbereitung und -transport

je kg Rohöl	Primärenergieaufwand	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC	Bereitstellungsnutzungsgrad
	[MJ/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Rohöl ab Bohrloch	1,00	107,35	0,11	0,05	0,28	0,58	97,5
Transport von Rohöl	0,76	53,11	0,11	0,05	0,50	0,06	98,2
Förderung u. Transport	1,76	160,46	0,22	0,10	0,78	0,64	95,8

7.2.2.3 Rohölverarbeitung und Feinverteilung der Mineralölprodukte

Das Rohöl ist ein Gemisch von unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen und Verunreinigungen. Im Verarbeitungsprozeß der Raffinerie wird aus diesem Gemisch eine Vielzahl verschiedener Fertigprodukte mit anwendungsgerechten Eigenschaften gewonnen. Einen schematischen Überblick über die Verarbeitungsstufen der Raffinerie zeigt Abbildung 7.2-2. Der erste und wichtigste Verfahrensschritt ist die *Destillation*. Hierbei wird das Rohöl in Fraktionen mit unterschiedlichen Siedebereichen und damit unterschiedlichen Moleküllängen zerlegt. Man unterscheidet die *atmosphärische Destillation* und die *Vakuumdestillation*. Die Destillationsausbeute an einzelnen Fraktionen wird durch die Zusammensetzung des Rohöls bestimmt. Die Nachfrage nach Mineralölprodukten deckt sich allerdings nicht mit dieser Produktionsstruktur. Daher ist es nötig, in einem nachgeschalteten Verarbeitungsschritt die weniger nachgefragten schweren Produkte in stärker nachgefragte mittlere Produkte umzuwandeln. Diese sogenannte Konversion erfolgt in den *Crackanlagen*. Dabei werden die langkettigen Kohlenwasserstoffmoleküle unter Zufuhr von Energie in mehrere kurzkettige Moleküle aufgespalten. In weiteren Verarbeitungsschritten, wie z. B. der Entschwefelung, werden die Zwischenprodukte entsprechend den Qualitätsanforderungen des Endverbrauchers weiterverarbeitet.

Der Energiebedarf der Raffinerien wird hauptsächlich durch den Eigenverbrauch von Mineralölprodukten gedeckt. Darüber hinaus werden auch Sekundärenergieträger, wie Strom, Fernwärme und Erdgas, von Dritten bezogen. Neben dem Eigenverbrauch von Mineralölprodukten zur Deckung des Energiebedarfs der Raffinerie werden ein Anteil der Mineralölprodukte als Wiedereinsatzstoffe benötigt sowie Additive und andere Chemieprodukte verschiedenster Art zugesetzt (vgl.Tab.7.2-4). Die detaillierte Zusammensetzung der Zusätze ist nicht bekannt, daher wird für diese Stoffe pauschal ein Primärenergieinhalt in Höhe von 40 MJ/kg angenommen.

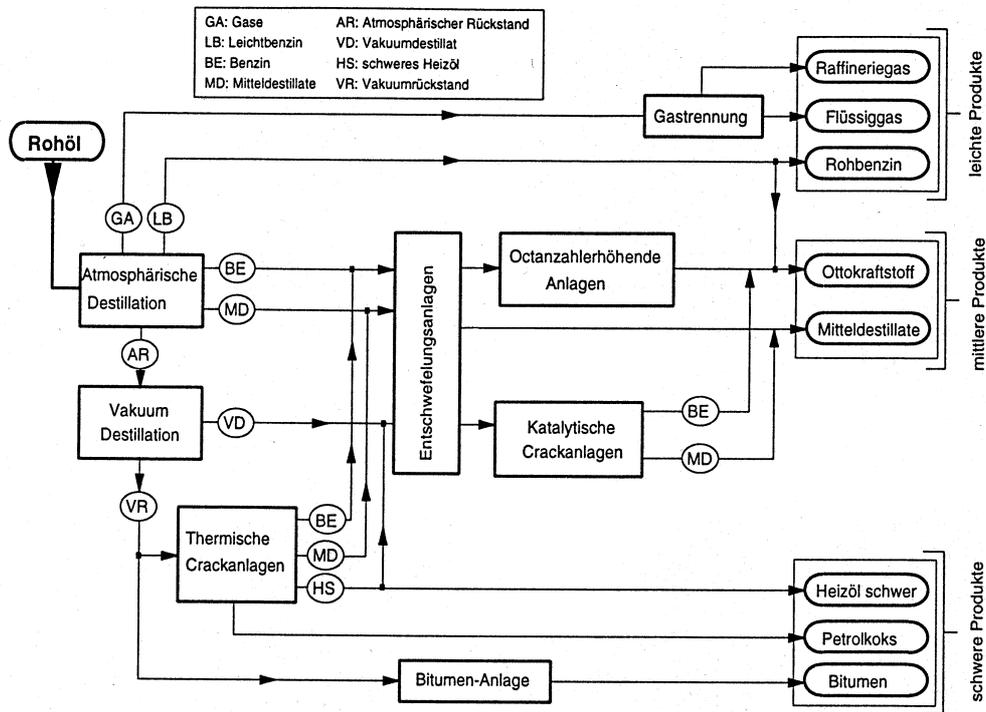


Abbildung 7.2-2: Einfaches Grundschema der Mineralölverarbeitung in einer Raffinerie /Hedden, 1994/

Tabelle 7.2-4: Energiebilanz deutscher Raffinerien im Jahr 1992 /BAW, 1993, AG-EB, 1993, VIK, 1993/

		Energie
		[PJ]
Einsatzstoffe	Rohöl	4.276
	Wiedereinsatz Produkte	471
	Additive	41
Energieeinsatz	Strombezug aus öffentlichem Netz und Industrie	13
	Fernwärme	4
	Erdgas	9
	Kokerei-/Stadtgas	5
	Eigenverbrauch Produkte	250
	Gesamteinsatz	5.070
	Ausstoß	Bruttoausstoß
abzüglich Wiedereinsatz Produkte		471
Raffinerieeigenverbrauch		250
Nettoraffinerieausstoß		4.013

Der bezogene Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von Mineralölprodukten errechnet sich aus dem Gesamtnutzungsgrad der Raffinerien. Dieser entspricht dem Energieinhalt des Nettoraffinerieausstoßes bezogen auf die Summe aller über Bereitstellungsnutzungsgrade primärenergetisch bewerteten Energieträger, die in die Raffinerie eingehen. Die im Zusammenhang mit der Rohölverarbeitung freigesetzten Emissionen setzen sich zusammen aus den Emissionen aufgrund der Endenergieträgerbereitstellung und den prozeßbedingten Emissionen der Verarbeitung. Aufgrund von stofflichen Verlusten im Laufe des Verarbeitungsprozesses durch Leckagen und Tankevaporation werden zusätzlich beträchtliche Mengen an flüchtigen Kohlenwasserstoffen freigesetzt. Nach /UBA, 1993/ beträgt die Höhe dieser nichtfeuerungsbedingten VOC-Emissionen 0,32 kg/t Raffinerieoutput.

Unter diesen Annahmen werden der Primärenergieaufwand sowie die Emissionen der deutschen Raffinerien berechnet und auf den Nettoraffinerieausstoß bezogen (vgl.Tab.7.2-5).

Tabelle 7.2-5: Primärenergieaufwand und Emissionen der Verarbeitung von Rohöl in Raffinerien bezogen auf den Nettoraffinerieausstoß

	Bezogener Primärenergieaufwand	CO₂	CO	Partikel	NO_x	VOC
	[TJ _{PE} /TJ _{Output}]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
Gesamter Raffinerieprozeß	1,088	5.346	1,02	0,77	8,75	10,01

Es ergibt sich ein durchschnittlicher daß zur Herstellung der einzelnen Produkte verschiedene Anlagen durchlaufen werden und damit ein unterschiedlicher Energieeinsatz notwendig ist. Daher ist es erforderlich, produktspezifische Faktoren einzuführen, die den abweichenden Primärenergieaufwand bezogen auf die durchschnittliche Produktion beschreiben /Frischknecht, 1994/ (vgl.Tab.7.2-6).Raffinerienutzungsgrad von 91,9 %. Dieser Wert bezieht sich auf die gesamte Nettoproduktion der Raffinerie. Aus Abbildung 7.2-2 ist jedoch ersichtlich, daß zur Herstellung der einzelnene Produkte verschiedene Anlagen durchlaufen werden und damit ein unterschiedlicher Energieeinsatz notwendig ist. Daher ist es erforderlich, produktspezifische Faktoren einzuführen, die den abweichenden Primärenergieaufwand bezogen auf die durchschnittliche Produktion beschreiben /Frischknecht, 1994/ (vgl. Tab. 7.2-6).

Tabelle 7.2-6: Brennstoff- und Elektrizitätsfaktoren für Mineralölprodukte /Frischknecht, 1994/

	Brennstofffaktor	Elektrizitätsfaktor
Dieselmotorkraftstoff/leichtes Heizöl	0,5	0,5
Bitumen	0,5	1
Schweres Heizöl	1	1

Für die Verteilung der Mineralölprodukte wird eine mittlere Transportweite von 200 km angenommen. Der Transport erfolgt vereinfachend ausschließlich mit Lkw /Fritsche, 1994/.

7.2.2.4 Primärenergieaufwand und Emissionen bei der Bereitstellung von Mineralölprodukten

Der Gesamtenergieaufwand sowie die Gesamtemissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Mineralölprodukten wird nun als Summe der Aufwendungen für die Rohölbereitung, der Aufwendungen für die Mineralölverarbeitung und der Aufwendungen für die Verteilung der Mineralölprodukte berechnet. Es ergeben sich die in Tabelle 7.2-7 dargestellten Werte.

Tabelle 7.2-7: Primärenergieaufwand und Emissionen bei der Bereitstellung von Bitumen, Diesel, leichtem und schwerem Heizöl frei Verbraucher

	spez. Primär- energieaufwand	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[TJ _{PE} /TJ _{EE}]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
Dieselmotortreibstoff und leichtes Heizöl frei Verbraucher	1,13	7.090	7,2	3,1	28,6	25,5
Bitumen frei Verbraucher	1,14	7.860	7,3	3,3	29,7	26,4
Schweres Heizöl frei Verbraucher	1,14	9.770	7,6	3,5	32,0	26,8

Der Bereitstellungsnutzungsgrad von Dieselmotortreibstoff frei Verbraucher beträgt damit rund 88 %. Der höhere Energieeinsatz für die Produktion von schwerem Heizöl zeigt sich sehr deutlich bei den CO₂-Emissionen. Da der Energiebedarf hauptsächlich durch den Eigenverbrauch an Mineralölprodukten gedeckt wird, nimmt der bezogene Primärenergieaufwand nicht in demselben Maße zu wie die CO₂-Emissionen.

7.2.3 Elektrische Energie

7.2.3.1 Einführende Bemerkungen

Die Bereitstellung von elektrischer Energie erfolgt in Deutschland überwiegend in Dampfkraftwerken, die entweder fossil oder nuklear befeuert werden. Ein kleinerer Teil der Stromerzeugung stammt aus Wasserkraftwerken, die die potentielle Energie des Wassers nutzen. Die Umwandlung von Sonnen- und Windenergie hat derzeit eine untergeordnete Bedeutung. Die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen verursacht beträchtliche Emissionen. Energieverluste treten

im Kraftwerk sowie in den Umspannanlagen und Übertragungsleitungen auf (vgl. Abb. 7.2-3). Im Rahmen der vorliegenden Studie werden der Primärenergieaufwand und die Emissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Strom sowohl aus dem Netz der öffentlichen Stromversorgung als auch aus dem Bahnstromnetz der ehemaligen Deutschen Bundesbahn jeweils in der Bundesrepublik Deutschland sowie in Baden-Württemberg untersucht. Als Bezugsjahr wird dabei das Jahr 1992 gewählt. Es wird angenommen, daß der zum Betrieb der Schleusen und der Umschlaganlagen notwendige Strom dem öffentlichen Netz in Baden-Württemberg entnommen wird. Die Herstellungs- und Instandhaltungsprozesse im Zusammenhang mit der Infrastruktur- und Fahrzeugbereitstellung (vgl. Kap. 7.3 und 7.4) finden zum Teil jedoch außerhalb Baden-Württembergs statt. Daher wird der für diese Prozesse notwendige Strom aus dem öffentlichen Netz in den alten Bundesländern bezogen. Die Bahnstromversorgung basiert auf der Erzeugungsstruktur in den alten Bundesländern. Im Rahmen einer Parametervariation wird zusätzlich die Bahnstromerzeugung innerhalb Baden-Württembergs untersucht.

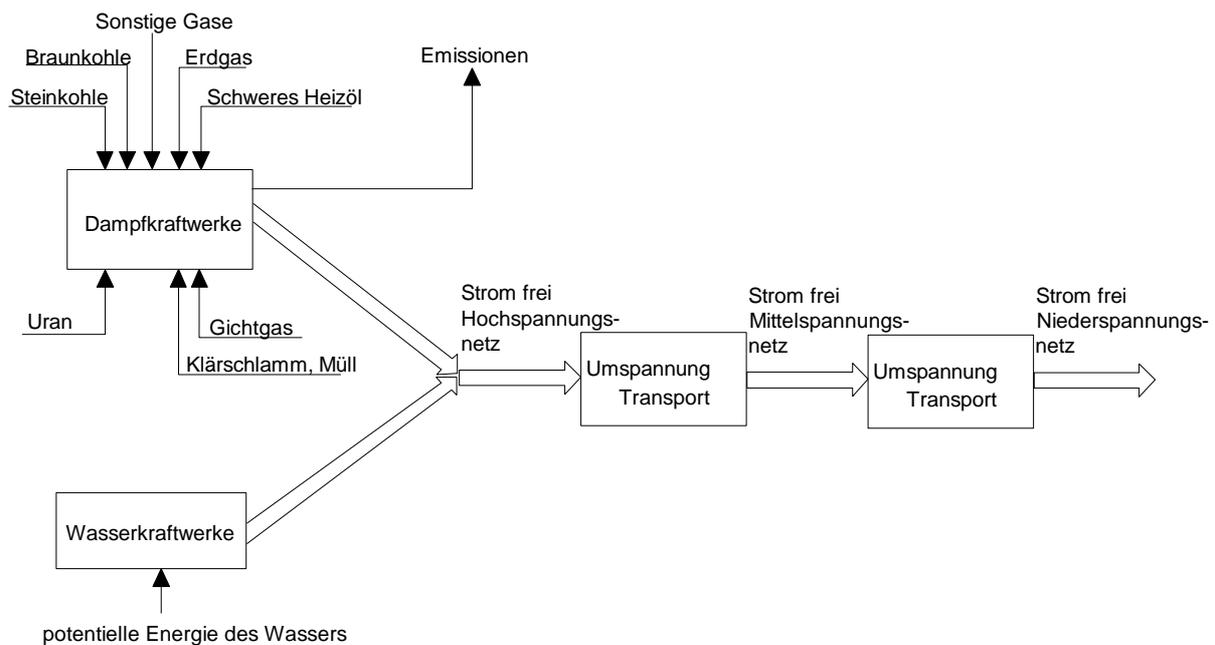


Abbildung 7.2-3: Prozeßschritte und Energieinput der Strombereitstellung

Der Primärenergieaufwand der Strombereitstellung wird aus dem über Bereitstellungsnutzungsgrade primärenergetisch bewerteten Brennstoffeinsatz der Kraftwerke errechnet. Die primärenergetische Bewertung der Stromerzeugung aus Kernbrennstoffen und aus Wasserkraft folgt den Empfehlungen von /VDI, 1995/ (siehe Kap. 7.2.1). Die im Zusammenhang mit der Strombereitstellung freigesetzten Emissionen setzen sich aus den Emissionen aufgrund der Brennstoffbereitstellung (vgl. Tab. 7.2-1) sowie den über energieträgerspezifische Emissions-

faktoren berechneten Prozeßemissionen der Kraftwerke zusammen. Bezogen auf die erzeugte Endenergie erhält man die jeweils bezogenen Strombereitstellungswerte.

Neben den fossilen Energieträgern werden auch Brennstoffe, wie Gichtgas, Müll und Restholz, für die Stromerzeugung genutzt, die Abfall- und Nebenprodukte von industriellen Herstellungs- oder Entsorgungsprozessen sind. Bei der energetischen Verwertung dieser Brennstoffe werden aufgrund der ungünstigen Brennstoffzusammensetzung teilweise größere Mengen an Schadstoffen bezogen auf die Wärmeerzeugung freigesetzt als bei vergleichbaren fossilen Energieträgern. Es erscheint nicht gerechtfertigt, diese Emissionen voll der Stromerzeugung zuzuordnen, da der primäre Entstehungsgrund der Brennstoffe im Herstellungs- oder Entsorgungsprozeß eines anderen Produkts liegt. Der Stromerzeugung mittels dieser Brennstoffe werden daher nur die Emissionen zugeordnet, die bei der Verbrennung einer äquivalenten Menge an Steinkohle entstehen würden.

7.2.3.2 Primärenergieaufwand und Emissionen bei der Netzstrombereitstellung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird die öffentliche Stromversorgung der alten Bundesländer sowie von Baden-Württemberg betrachtet und unter Zugrundelegung des entsprechenden Strommixes der Bereitstellungsgrad sowie die bezogenen Emissionen der Strombereitstellung berechnet. Der in das öffentliche Netz eingespeiste Strom aus Eigenanlagen der Industrie wird ebenfalls betrachtet und in der Berechnung anteilmäßig berücksichtigt.

In Tabelle 7.2-8 ist die Bruttostromerzeugung nach Energieträgern der Kraftwerke des öffentlichen Netzes in den alten Bundesländern und in Baden-Württemberg sowie der dazu notwendige Brennstoffeinsatz dargestellt.

Tabelle 7.2-8: Bruttostromerzeugung und Brennstoffeinsatz der Kraftwerke der öffentlichen Versorgung in den alten Bundesländern und in Baden-Württemberg im Jahr 1992 /VDEW, 1993, VIK, 1993, AG-EB, 1993, VDEW-BW, 1994, WiMi, 1994/

Energieträger	Alte Bundesländer			Baden-Württemberg		
	Bruttostrom- erzeugung	Anteil	Brennstoff- Einsatz	Bruttostrom- erzeugung	Anteil	Brennstoff- einsatz
	[TWh]	[%]	[PJ]	[TWh]	[%]	[PJ]
Steinkohle	112,3	28	1.018	14,6	26	131
Braunkohle	83,2	21	830	-	-	-
Kernkraft	157,7	39	1.720	34,6	62	378
Wasserkraft	17,3	4	73	4,8	8	20
Erdgas	18,5	5	176	0,7	1	6
Heizöl	6,8	2	56	1,3	2	12
Sonstige ¹⁾	3,9	1	39	0,3	1	3
Summe	399,7	100	3.912	56,3	100	550

¹⁾ Raffineriegas, Kokereigas, Stadtgas, Gichtgas, Müll, Klärgas, Klärschlamm

Der Vergleich des Strommixes der alten Bundesländer mit dem Strommix von Baden-Württemberg zeigt gravierende Unterschiede. So dominiert in Baden-Württemberg die Stromerzeugung aus Kernenergie mit einem Anteil von 62 % im Vergleich zu 39 % in den alten Bundesländern.

Entsprechend der in Abschnitt 7.2.3.1 dargestellten Methodik werden der Primärenergieaufwand sowie die Emissionen im Zusammenhang mit der Strombereitstellung für die beiden Netze berechnet und auf den Endverbrauch ab dem Niederspannungsnetz bezogen. Damit ergibt sich der in Tabelle 7.2-9 dargestellte bezogene Primärenergieaufwand sowie die bezogenen Emissionen für die Bereitstellung von Strom aus dem öffentlichen Netz.

Tabelle 7.2-9: Bezogener Primärenergieaufwand und bezogene Emissionen der Bereitstellung von Strom aus dem öffentlichen Netz im Jahr 1992

	Bezogener Primär- energieaufwand	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[kWh _{PE} /kWh _{EE}]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Öffentl. Stromversorgung alte Bundesländer	3,16	633	0,11	0,15	0,65	1,66
Öffentl. Stromversorgung Baden-Württemberg	3,13	339	0,08	0,16	0,44	1,44

Für die alten Bundesländer ergibt sich ein Bereitstellungsgrad für Strom aus dem öffentlichen Netz der untersten Spannungsstufe von 31,7 % und für Baden-Württemberg ein entsprechender Wert von 31,9 %. Der hohe Anteil der Stromerzeugung aus Kernenergie und Wasserkraft in Baden-Württemberg spiegelt sich in den geringeren CO₂-, CO- und NO_x-Emissionswerten wider. Die VOC-Emissionen entstehen überwiegend im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Steinkohle. Partikelemissionen werden in größerem Umfang bei der Uran- und Steinkohlegewinnung freigesetzt. Das bedeutet, daß die Höhe dieser Emissionen in erster Linie

von dem Anteil der Stromerzeugung aus Steinkohle und aus nuklearen Brennstoffen bestimmt wird.

7.2.3.3 Primärenergieaufwand und Emissionen bei der Strombereitstellung der Deutschen Bundesbahn

Die Länge des elektrifizierten Streckennetzes der Deutschen Bundesbahn betrug im Jahr 1992 11.900 km. Damit waren rund 44 % des Streckennetzes mit einer Gesamtlänge von 26.800 km elektrifiziert /BMV, 1995c/. Auf dem elektrifizierten Streckennetz wurden 88 % der Gesamtförderleistung der ehemaligen Deutschen Bundesbahn erbracht /Harprecht, 1993/. Im Gegensatz zur öffentlichen Stromversorgung, die mit 50 Hz Dreiphasendrehstrom betrieben wird, handelt es sich bei der Bahnstromversorgung um ein $16\frac{2}{3}$ Hz Einphasenwechselstromnetz. Damit sind die Deutschen Bahnen gezwungen, ein von der öffentlichen Stromerzeugung unabhängiges Stromversorgungsnetz aufzubauen und zu betreiben.

Die Bahnstromversorgung der ehemaligen Deutschen Bundesbahn stützt sich im wesentlichen auf die Stromerzeugung in Gemeinschaftskraftwerken mit Unternehmen der öffentlichen Stromversorgung (EVU) und der Umformung von Strom aus dem öffentlichen Netz (vgl. Abb. 7.2-4). Der Stromverbund mit den Österreichischen und Schweizerischen Bundesbahnen dient vorrangig der Versorgungssicherheit. Nennenswerte Strommengen werden dabei nicht ausgetauscht. Aufgrund der geringen Bedeutung wird der Stromaustausch mit den Nachbarländern in den weiteren Rechnungen nicht berücksichtigt. In den Gemeinschaftskraftwerken werden Bahnstromturboätze entweder allein oder zusammen mit konventionellen Turboätzen in einem Kraftwerk installiert. Der Betrieb der Anlagen obliegt in aller Regel dem beteiligten EVU, während der Einsatz der Bahnstromgeneratoren durch die Betriebsstellen der Bahn gesteuert wird. Eine Besonderheit stellt die Bahnstromerzeugung im Block II des Kernkraftwerkes Neckarwestheim dar. Dort wird der Bahnstrom nicht in $16\frac{2}{3}$ Hz Bahnstromturboätzen erzeugt, sondern konventionell mit einem 50 Hz Generator. Anschließend wird der Strom dann in einer Umformeranlage in $16\frac{2}{3}$ Hz Einphasenwechselstrom umgeformt. Im Jahr 1992 wurden rund 85 % des eingespeisten Bahnstroms in Gemeinschaftskraftwerken erzeugt. Weitere 15 % des Bahnstroms werden aus dem öffentlichen Netz entnommen und mittels spezieller Umformeranlagen in $16\frac{2}{3}$ Hz Einphasenwechselstrom umgeformt /DBAG, 1995/. Der mittlere Nutzungsgrad liegt dabei bei rund 90 %. Die Bahnstromerzeugung aus Umformeranlagen deckt hauptsächlich die Lastspitzen im Bahnstromnetz ab. Die Vorteile sind schnelle Einsatzbereitschaft und hohe Betriebssicherheit. Als Nachteil ist der hohe Energieverlust bei der Umformung zu nennen.

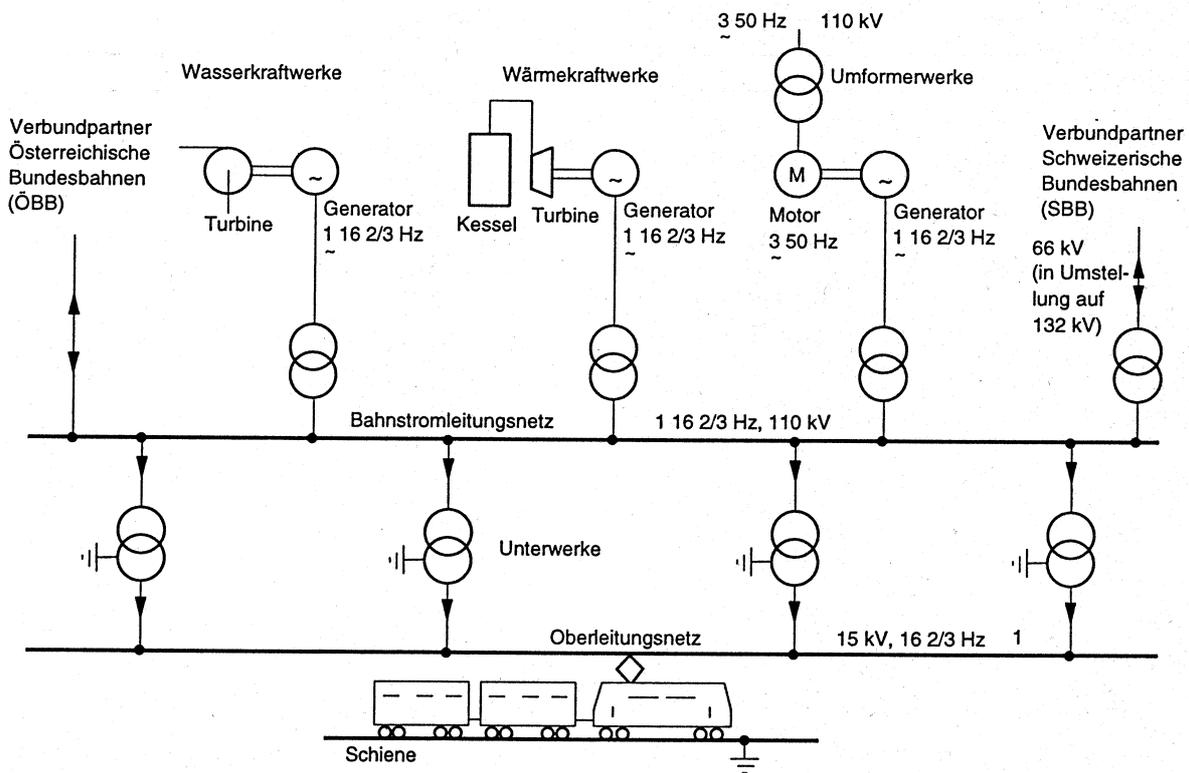


Abbildung 7.2-4: Prinzipdarstellung der Bahnstromerzeugung und -verteilung /Mehltretter, 1986/

In Tabelle 7.2-10 ist die Struktur der Bahnstromerzeugung für das Jahr 1992 in den alten Bundesländern sowie in Baden-Württemberg dargestellt ³.

³ Der Fahrstrombedarf und damit der Lastverlauf im Bahnstromnetz ist starken zeitlichen Schwankungen unterworfen. Je nach Bedarfslage kommen aufgrund von wirtschaftlichen und qualitativen Überlegungen unterschiedliche Stromerzeugungsanlagen in Einsatz. Damit ist der Bahnstromerzeugungsmix zeitabhängig. Für die vorliegende Studie werden zeitliche Aspekte nicht berücksichtigt, da die betrachteten konkreten Transportaufgaben werktags stattfinden. In diesem Zeitraum sind die tageszeitlichen Schwankungen der Netzbelastung nicht so stark ausgeprägt /Jergas, 1992/. Darüber hinaus waren ausreichend detaillierte Wochen-Lastganglinien von der Deutschen Bahn AG nicht zu erhalten.

Tabelle 7.2-10: Struktur der Bahnstromerzeugung und Brennstoffeinsatz der Deutschen Bundesbahn im Jahr 1992 /DBAG, 1995/

	Alte Bundesländer			Baden-Württemberg		
	Bruttostromerzeugung	Anteil	Brennstoffeinsatz	Bruttostromerzeugung	Anteil	Brennstoffeinsatz
	[GWh]	[%]	[PJ]	[GWh]	[%]	[PJ]
Steinkohle	2.707	39,7	28,3	832	23,5	7,9
Kernkraft	2.265	33,2	24,6	2.265	64,0	24,6
Wasserkraft	626	9,2	3,5	-	-	-
Erdgas	354	5,2	3,5	32	0,9	0,3
Heizöl	235	3,4	2,3	158	4,5	1,5
Gichtgas	639	9,4	6,3	-	-	-
Umformerwerke	1.212	17,8	4,9	251	7,1	1,0
Bruttobahnstromerzeugung	8.038	100	73,4	3.538	100	35,3

Von den Bahnstromerzeugungs- und Umformeranlagen gelangt der Strom über das bahneigene 110 kV Hochspannungsnetz bis zu den Unterwerken. Dies sind Transformatorstationen, die im Schnitt in einem Abstand von 100 km an der Strecke angeordnet sind /Kleinschmidt, 1993/. Bei Neubaustrecken reduziert sich der Abstand aufgrund des hohen Leistungsbedarfs des Hochgeschwindigkeitsverkehrs auf etwa 20 km. Die Unterwerke transformieren den Bahnstrom auf eine Spannung von 15 kV und speisen damit das Oberleitungsnetz. Mit Hilfe des Stromabnehmers entnimmt daraus die Lokomotive den Fahrstrom. Der Erdschluß findet über die Schiene statt (vgl. Abb. 7.2-4).

Tabelle 7.2-11: Bezogener Primärenergieaufwand und bezogene Emissionen der Bereitstellung von Bahnstrom ab Einspeisung in das Oberleitungsnetz im Jahr 1992

	Bezogener Primärenergieaufwand	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[TJ/TJ]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Bahnstrom (Alte Bundesländer)	3,06	584	0,12	0,17	0,69	2,17
Bahnstrom (Baden-Württemberg)	3,26	89	0,02	0,05	0,13	0,34

Der Primärenergieaufwand und die Emissionen im Zusammenhang mit der Bahnstrombereitstellung werden entsprechend der in Abschnitt 7.2.3.1 dargestellten Methodik ermittelt. Dabei wird der in Tabelle 7.2-10 dargestellte Erzeugungsmix von Bahnstrom in den alten Bundesländern zugrundegelegt. Darüber hinaus wird im Rahmen einer Parametervariation die Bahnstromerzeugung innerhalb Baden-Württembergs betrachtet. Unter Berücksichtigung der Verluste im 110 kV-Bahnstromnetz und in den Unterwerken in Höhe von 3,5 % der Einspeisung /DBAG, 1995/ ergeben sich die in Tabelle 7.2-11 dargestellten bezogenen Energie- und Emissionswerte für die Bereitstellung von Bahnstrom ab den Unterwerken. Der Bereitstellungsnutzungsgrad von Bahnstrom der Deutschen Bundesbahn ab den Unterwerken beträgt in den alten Bundesländern 32,7 % und liegt damit etwas über dem der öffentlichen Stromversorgung. Die weitaus geringe-

ren Emissionswerte der Bahnstromerzeugung in Baden-Württemberg sind auf den mit 64 % hohen Anteil der Stromerzeugung aus Kernenergie zurückzuführen. Die Fahrleitungsverluste werden dem direkten Verbrauch für die elektrische Zugförderung zugeordnet und sind daher in den Werten in Tabelle 7.2-11 nicht berücksichtigt.

7.2.4 Erdgas

Im Rahmen einer Parametervariation wird der Einsatz von Erdgas als alternativer Kraftstoff für Straßenfahrzeuge untersucht. Im Vergleich mit dem konventionellen Einsatz von Dieselmotoren ist es damit möglich, die Auswirkungen dieser in letzter Zeit viel diskutierte Maßnahme auf den Primärenergieverbrauch sowie auf das Emissionsverhalten anhand konkreter Transportaufgaben zu ermitteln. Die Bereitstellung des Erdgases wird mit Hilfe des Programms GEMIS 2.1 /Fritsche, 1994/ sowie einer Studie von /Liebscher, 1996/ für das Jahr 1992 untersucht. Bezugsraum ist dabei das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Erdgas für den Betrieb in Straßenfahrzeugen werden Energie eingesetzt und Emissionen freigesetzt

- bei der Erdgasförderung,
- bei der Erdgasaufbereitung,
- beim Ferntransport,
- bei der lokalen Verteilung sowie
- bei der Kompression des Erdgases für den Einsatz in Kraftfahrzeugen.

Bei der *Erdgasförderung* wird Energie insbesondere für die Bereitstellung von Kompressionsarbeit benötigt. Neben den Emissionen durch den Energieträgereinsatz sowie der Erdgasabfackelung werden größere Mengen an VOC-Emissionen aufgrund von Leckagen und Entlüftungen freigesetzt. Je nach Förderregion ergeben sich unterschiedliche Emissionswerte. Im Anschluß an die Förderung erfolgt die *Erdgasaufbereitung*. Dabei wird die erforderliche Qualität durch Entschwefelung, Trocknung sowie durch die Abscheidung längerkettiger Kohlenwasserstoffe erreicht. Für den Aufbereitungsprozeß wird insbesondere Prozeßwärme benötigt.

Der *Transport des Erdgases* erfolgt nahezu ausschließlich in Druckgaspipelines. Je nach Transportentfernung und Zustand der Anlagen unterscheidet sich die Transportenergie und die Menge der Gasverluste. Die Anteil des Erdgasbezugs aus den einzelnen Lieferregionen und die jeweiligen zugrundegelegten Transportentfernungen sind in Tabelle 7.2-12 dargestellt.

Tabelle 7.2-12: Struktur des Erdgasaufkommens in Deutschland im Jahr 1992 /Schiffer, 1993/ sowie Transportweiten des Erdgases /Fritsche, 1994/

Ursprungsland	Anteil an Bruttoaufkommen Inland	Transportweite
	[%]	[km]
Inlandsförderung	23%	0
GUS	30%	7.000
Niederlande	32%	600
Norwegen	15%	1.700
Summe	100%	

Basierend auf der Struktur des Erdgasaufkommens in Deutschland sowie den länderspezifischen Energie- und Emissionswerten für Förderung, Aufbereitung und Transport des Erdgases ergeben sich die in Tabelle 7.2-13 dargestellten Werte der Erdgasbereitstellung in Deutschland.

Tabelle 7.2-13: Bezogener Primärenergieaufwand und bezogene Emissionen der Bereitstellung von Erdgas in Deutschland im Jahr 1992 /Fritsche, 1994, Schiffer, 1993/

	Bezogener Primärenergieaufwand	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[TJ/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
Bereitstellung von Erdgas im Inland	1,056	2.309	10,2	0,5	9,1	124,1

Die *überregionale Verteilung* des Erdgases in der Bundesrepublik Deutschland erfolgt ebenfalls in Pipelines. /Fritsche, 1994/ geht dabei von einer durchschnittlichen Transportweite von 250 km aus. Die anschließende *lokale Gasverteilung* erfolgt in einem Niederdrucknetz. Dabei ist kein Verdichtungsaufwand mehr erforderlich. Die durchschnittliche Transportweite beträgt nach /Fritsche, 1994/ 10 km, die Verluste durch Leckagen belaufen sich auf 7 % je 100 km Transportweite.

Im letzten Schritt muß das Erdgas auf den Betriebsdruck der Fahrzeugspeichertanks in Höhe von 200 Bar komprimiert werden. Nach /Liebscher, 1996/ wird dazu für Großtankstellen je MJ getanktes Erdgas 0,02 MJ Strom benötigt. Der Strom wird dabei dem öffentlichen Netz der Bundesrepublik Deutschland entnommen. Damit ergeben sich die in Tabelle 7.2-14 dargestellten Werte für den bezogenen Primärenergieaufwand sowie für die bezogenen Emissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Erdgas frei Tankstelle.

Tabelle 7.2-14: Bezogener Primärenergieaufwand und bezogene Emissionen der Bereitstellung von Erdgas für den Einsatz in Straßenfahrzeugen in Deutschland

	Bezogener Primär- energieaufwand	CO₂	CO	Partikel	NO_x	VOC
	[TJ/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
Erdgas frei Großtankstelle	1,137	6.706	13,27	1,45	13,73	271,31

Damit ergibt sich ein Bereitstellungsnutzungsgrad für Erdgas frei Tankstelle von rund 88 %. Der Vergleich mit der Bereitstellung von Dieselmotorkraftstoff (siehe Kap. 7.2.2.4) zeigt, daß der bezogene Primäraufwand und die bezogenen CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung für beide Kraftstoffe in derselben Größenordnung liegen. Unterschiede zeigen sich insbesondere bei den VOC-Emissionen. Diese liegen bei der Erdgasbereitstellung etwa um den Faktor 10 höher als bei der Dieselmotorkraftstoffbereitstellung.

7.3 Herstellung, Betrieb und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur

7.3.1 Bilanzgrenzen und Methodik

Der Bau, der Betrieb und die Instandhaltung von Verkehrsinfrastrukturanlagen erfordert große Materialbewegungen und einen umfangreichen Materialeinsatz. Damit verbunden sind ein entsprechend großer Energieaufwand sowie daraus resultierende Emissionen. Diese Effekte können nur über geeignete Schlüssel einer konkreten Fahrt oder einem konkreten Transportvorgang zugeordnet werden und stellen somit indirekte Aufwendungen dar.

Im folgenden werden der kumulierte Energieaufwand der Herstellung (KEA_H) und der Nutzung (KEA_N) sowie die entsprechenden kumulierten Emissionen entsprechend der in Kapitel 7.1.3 dargestellten Methodik für konkrete Straßenverkehrswege, Schienenwege, Binnenwasserstraßen und Umschlaganlagen ermittelt. Die Nutzung umfaßt dabei die Aktivitäten der Instandhaltung und des Betriebs. Dabei werden folgende Bilanzgrenzen gezogen:

- Die verwendeten Daten beziehen sich auf die konkret betrachteten Strecken. Falls derartige Daten nicht vorliegen, werden Durchschnittswerte der alten Bundesländer verwendet.
- Das Bezugsjahr der Untersuchung ist 1992. Beziehen sich verwendete Daten auf ein anderes Jahr, so ist dies angegeben.

- Der Bau von Infrastrukturanlagen liegt teilweise schon eine lange Zeit zurück. Inzwischen haben sich viele Baumethoden und Baustoffe geändert. Um dennoch unter einem vertretbarem Aufwand eine Bilanzierung der Material- und Energieträgeraufwendungen der Infrastruktur durchführen zu können, werden heutige Produktionstechniken vorausgesetzt. Es wird also analog der Vorgehensweise bei der Bestimmung von Wiederbeschaffungswerten vorgegangen.
- Es werden nur Aufwendungen für die Herstellung, den Betrieb und die Instandhaltung der Wege bzw. Wasserwege bilanziert. Aufwendungen für sonstige infrastrukturelle Einrichtungen, wie z. B. Garagen, Rastplätze, Bauhöfe und Bahnhöfe, werden nicht betrachtet.
- Der Abbau und die Entsorgung von Infrastruktureinrichtungen werden nicht betrachtet.

Im Verkehrswegebau werden in großem Umfang sogenannte *Mischgüter* eingesetzt. Darunter versteht man Baustoffe, die ein Gemisch mehrerer Materialien darstellen, wie z. B. Beton oder Asphalt. Die Bilanzierung von Mischgütern erfolgt anhand ihrer Ausgangsstoffe sowie dem für die Herstellung notwendigen Energieträgereinsatz /Dübner, 1994, BMV, 1995a, Knoll, 1994/.

7.3.2 Straßeninfrastruktur

7.3.2.1 Technische Grundlagen

Die im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Straßengütertransporte erfolgen auf exakt definierten Strecken (vgl. Kap. 5.2.1). Basierend auf den konkreten Straßendaten werden im folgenden der kumulierte Energieaufwand und die kumulierten Emissionen der Bereitstellung von Straßen ermittelt. Sofern keine streckenspezifischen Angaben vorliegen, muß auf Durchschnittswerte zurückgegriffen werden. Das Straßennetz wird in die Straßenklassen

- Bundesautobahnen,
- Bundesstraßen,
- Landesstraßen und
- Kreisstraßen

eingeteilt. Innerortsstraßen, Gemeindestraßen und Privatstraßen werden in der Kategorie „Unklassifizierte Straßen“ zusammengefaßt. Für diese Straßen liegen weder Aufbau- noch Belastungsdaten vor. Da diese Straßen sowohl hochbelastete Innerortsstraßen als auch gering belastete Zufahrtstraßen umfassen, wird der kumulierte Energieaufwand und die kumulierten Emis-

sionen der unklassifizierten Straßen über die Mittelwerte der entsprechenden Werte der Bundes-, Landes- und Kreisstraßen abgeschätzt.

Der Aufbau einer Straße wird grundsätzlich unterschieden in Untergrund, Unterbau und Oberbau (vgl. Abb. 7.3-1).

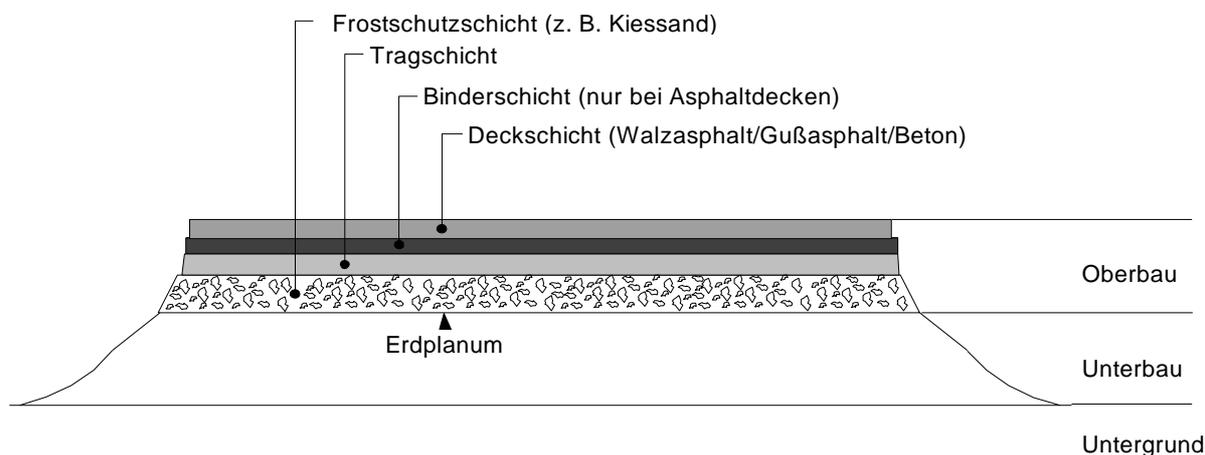


Abbildung 7.3-1: Prinzipskizze des Straßenaufbaus /BMV, 1995a/

Die erste Baumaßnahme beim Neubau einer Straße ist der Erdbau. "Der Erdbau umfaßt Einschnitte, die Be- und Verarbeitung des anstehenden Bodens (Untergrund) sowie die Erstellung von setzungsarmen Dämmen (Unterbau), einschließlich der Hinterfüllung und Überschüttung von Bauwerken" /BMV, 1995a/. In Abhängigkeit von der Topologie des Geländes und den Trassierungsvorgaben sind dafür mehr oder weniger große Erdbewegungen nötig. So sind für den Bau einer Autobahn mit geringen Steigungen und großen Kurvenradien bedeutend größere Erdbewegungen notwendig als für den Bau einer Kreisstraße. Für die Ausführung des Erdbaus werden insbesondere Bagger, Rad- oder Kettenlader, Kipper und Planiertraupen eingesetzt. Als Energieträger wird daher hauptsächlich Dieselkraftstoff benötigt. Ein wichtiger Faktor, welcher den Dieselkraftstoffeinsatz bestimmt, ist die Lösbarkeit des Gesteins. Schwer lösbares Gestein führt zu einem erheblich höheren Energieaufwand.

Auf dem Untergrund werden danach die einzelnen Schichten des Oberbaus eingebaut. Der Oberbau ist standardisiert und wird gemäß den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO)“ in verschiedene Bauklassen eingeteilt. Die Zusammensetzung des Oberbaus hängt von der Straßenbelastung, dem Untergrund sowie von der gewählten Bauart der Fahrbahndecke ab. Die wichtigsten Straßenbaustoffe sind Asphalt, ein Mischgut aus Bitumen mit Sand oder Kies, Beton, und hydraulisch gebundene Mischgüter. Bei letzteren werden Kalk oder Zement als Bindemittel eingesetzt. Der Oberbau besteht aus einer oder mehreren Tragschichten, ggf. einer Frostschuttschicht sowie der Fahrbahndecke. Die Frostschuttschicht

ist bei nicht frostsicherem Untergrund notwendig. Aufgabe der Tragschichten ist die Lastverteilung auf dem Unterbau bzw. Untergrund. Die Fahrbahndecke ist der oberste Teil des Oberbaus. Sie dient als Verschleißschicht und muß die Ebenheit, Griffigkeit und Helligkeit der Straße sicherstellen. Es wird unterschieden in Fahrbahndecken aus Asphalt und in Fahrbahndecken aus Beton.

Entsprechend den topologischen Gegebenheiten ist beim Bau einer Straße die Errichtung von Ingenieurbauwerken (Kunstabauten) notwendig. Darunter versteht man Brücken, Tunnels und Stützwände. Die Bauarten der Bauwerke weisen eine große Vielfalt auf. Brücken können z. B. entweder in Stahlbeton-, Spannbeton-, Verbund- oder Stahlbauweise ausgeführt werden. Bei den Straßentunnels hängt der Material- und Energieeinsatz von den geologischen Gegebenheiten und der Vortriebsweise ab.

Schließlich sind für den sicheren Betriebsablauf auf Straßen und dem Schutz der angrenzenden Wohnbevölkerung noch zahlreiche Zusatzausrüstungen notwendig. Dazu gehören u. a. Verkehrsschilder, Leitplanken, Anlagen der Verkehrsleittechnik, Leitpfosten und Schallschutzwände.

7.3.2.2 Material- und Energieträgereinsatz

Die Grundlage der Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen bildet die Analyse der während der Lebenszyklusphasen Herstellung und Nutzung eingesetzten Materialien und Energieträger. Diese werden im folgenden für die Straßenaggregate Erdbau, Oberbau, Kunstbauten und Straßenausrüstung sowie für den Betrieb und die Instandhaltung der Straßen ermittelt.

Erdbau

Die zum Bau von Straßen notwendigen *Erdbewegungen* hängen sehr stark von der örtlichen Topologie ab und unterscheiden sich entsprechend stark. Die Arbeiten werden hauptsächlich mit dieselbetriebenen Baumaschinen durchgeführt. /Beyert, 1985/ beziffert den Endenergieaufwand für den Erdbau einer Autobahn bezogen auf die befestigte Straßenfläche auf $0,24 \text{ GJ/m}^2$ bzw. einen Dieselmotoreinsatz von $5,7 \text{ kg/m}^2$. Die Lebensdauer der Erdbauwerke beträgt nach /Enderlein, 1992a/ 116 Jahre.

Oberbau

Basierend auf den streckenspezifischen Oberbaudaten in /LfS, 1995/ ist es möglich, den Baustoffeinsatz für die Erstellung des *Oberbaus* der im Rahmen der vorliegenden Studie betrachte-

ten Strecken konkret zu bilanzieren. Der Baustoffeinsatz je Straßenschicht wird über die Schichtdicke, die Straßenbreite und die spezifische Dichte des Baustoffes berechnet. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede bezüglich des Materialeinsatzes zwischen den verschiedenen Straßenklassen sowie auch innerhalb der Straßenklassen. Je nach der Bauklasse des Oberbaus ergibt sich bei Betondecken ein hoher Zementeinsatz (z. B. bei der A 5) oder bei bituminösen Fahrbahndecken ein hoher Bitumeneinsatz (z. B. bei der A 81). Erwartungsgemäß ist der Baustoffeinsatz von Bundesautobahnen am höchsten und der von Kreisstraßen am geringsten. Der gesamte Material- und Energieträgereinsatz wird über die mittlere Lebensdauer der einzelnen Oberbauschichten linear abgeschrieben /Enderlein, 1992a, Hoffmann, 1995/. Diese liegt je nach Schicht zwischen 17 und 55 Jahren.

Der Bedarf an Energieträgern für die Oberbauerstellung ergibt sich zum einen aufgrund der Mischgutherstellung und zum anderen im Zusammenhang mit dem Einbau der Oberbauschichten. Dabei wird Energie hauptsächlich für die Bereitstellung von Prozeßwärme und den Betrieb von Baumaschinen benötigt. Der Energieeinsatz nach Energieträgern für den Einbau der Oberbauschichten für die verschiedenen Straßenklassen basiert auf den Angaben von /Beyert, 1985/ und von /Hoffmann, 1995/ und wird auf eine mittlere Lebensdauer des Oberbaus von 35 Jahren /Enderlein, 1992a/ bezogen.

Kunstbauten

Unter dem Begriff *Kunstbauten* werden im wesentlichen Brückenbauwerke, Tunnelbauwerke und Stützmauern zusammengefaßt. Der Bedarf an Kunstbauten und damit der Materialeinsatz hängt von der örtlichen Topologie ab und variiert entsprechend stark. Zur Berücksichtigung der streckenspezifischen Unterschiede werden daher die Brücken- und Tunnellängen auf den betrachteten Strecken mit Hilfe der Angaben aus /LfS, 1995/ bestimmt.

Der Brückenanteil der betrachteten Autobahnen beträgt rund 65 m/km im Vergleich zu 8 m/km auf Kreisstraßen. Generell ist der mittlere Brückenanteil in Baden-Württemberg aufgrund der Topologie höher als der entsprechende Durchschnittswert in der Bundesrepublik Deutschland. Die Ermittlung des Materialeinsatzes für Straßenbrücken erfolgt mit Hilfe der Angaben zum flächenspezifischen Baustoffeinsatz für die verschiedenen Brückenbauarten /Lünser, 1996/ sowie der entsprechenden Brückenfläche /Knoll, 1994/. Der Anteil der Materialbereitstellung am gesamten KEA einer Brücke beträgt nach /Beyert, 1985/ rund 96 %. Daher werden Transport- und Bauprozesse vernachlässigt. Die Lebensdauer der Brückenbauwerke wird nach /Enderlein, 1992a/ mit 70 Jahren angenommen.

Der Tunnelanteil liegt mit Werten von 5 m/km auf Autobahnen und 3 m/km auf Bundesstraßen weitaus geringer. Spitzenreiter ist dabei die A 81 mit einem Tunnelanteil von 14 m/km. Auf den betrachteten Landes- und Kreisstraßen befinden sich keine Tunnels. Der Baustoffeinsatz für

Straßentunnels wird näherungsweise anhand der Werte für Bahntunnels abgeschätzt (vgl. Kap. 7.3.3.2). Vereinfachend wird angenommen, daß der Baustoffeinsatz für ein Tunnel einer zweispurigen Straße demjenigen einer zweigleisigen Neubaustrecke entspricht. Für Autobahntunnels wird der Baustoffeinsatz verdoppelt. Die Lebensdauer der Straßentunnels wird nach /Enderlein, 1992a/ mit 70 Jahren angenommen.

Straßenausrüstung

Unter dem Begriff der *Straßenausrüstung* werden Anlagen der Straßenbeleuchtung und der Verkehrsleittechnik, Beschilderungen, Leitplanken und -pfosten sowie Schallschutzwände zusammengefaßt. Eine grobe Abschätzung des Materialeinsatzes erfolgt mit Hilfe der Angaben in /Hoffmann, 1995/ und /Enquete, 1995/. In den genannten Quellen werden Angaben zum Gesamtmaterialeinsatz für die Ausrüstungen aller Straßen in den alten Bundesländern gemacht. Die Zuordnung des Materialeinsatzes auf die einzelnen Straßenklassen erfolgt über deren Flächenanteil. Bezogen auf die Straßenlänge nach Straßenklassen /BMV, 1995c/ erhält man den jährlichen spezifischen Materialeinsatz für Straßenausrüstungen nach Straßenklassen. Die mittlere Lebensdauer von Straßenausrüstungen beträgt nach /Enderlein, 1992a/ 20 Jahre.

Instandhaltung und Betrieb

Die *Instandhaltung von Straßen* umfaßt Tätigkeiten zur Wartung und Inspektion sowie Maßnahmen zur Instandsetzung (vgl. Abb. 7.3-2). Die Instandsetzung wird wiederum unterteilt in die bauliche Unterhaltung als eine Maßnahme der laufenden Unterhaltung sowie in Erneuerungs- und Veränderungsmaßnahmen. Die letzteren beiden Maßnahmen werden kostenseitig als Ersatzinvestitionen bezeichnet /Enderlein, 1992a/. Die Maßnahmen der baulichen Unterhaltung verhindern den vorzeitigen Ausfall der Straßenaggregate. Die Arbeiten werden von den Straßen- bzw. Autobahnmeistereien ausgeführt. Der Baustoff- und Energieträgereinsatz für die Maßnahmen der Straßenerneuerung und -veränderung ist durch die Abschreibung des Herstellungsaufwands über die mittlere Lebensdauer bereits berücksichtigt.

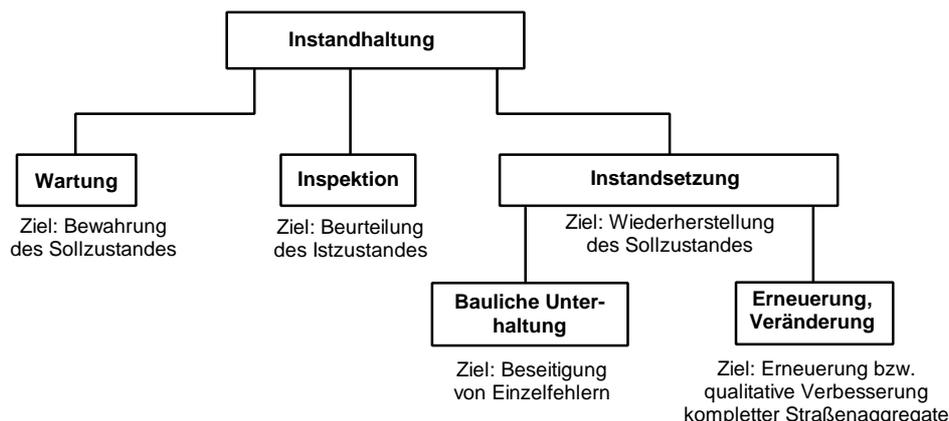


Abbildung 7.3-2: Schema der Straßeninstandhaltung nach DIN 31051

Für Maßnahmen der *baulichen Unterhaltung* auf der A 81 wurden den Angaben von /ABA, 1996/ zufolge 13,7 t bituminöses Mischgut pro km im Jahr 1995 benötigt. Dies entspricht in etwa 4 % des jährlichen Baustoffeinsatzes für die Herstellung des Oberbaus. Der jährliche Fabeinsatz auf einem untersuchten Autobahnabschnitt für die Fahrbahnmarkierung beträgt nach /ABA, 1996/ 0,4 t/km. Für Bundesstraßen wird die Hälfte, für Landes- und Kreisstraßen ein Viertel dieses Wertes angenommen.

Für die Ausführung der Unterhaltungsarbeiten wurde auf einem untersuchten Autobahnabschnitt jährlich rund 1,4 t Dieselkraftstoff je Kilometer von einer Autobahnmeisterei benötigt /ABA, 1996/. Mit Hilfe der Unterhaltungskosten wird der entsprechende Wert für die übrigen Straßenklassen auf 0,49 t/km abgeschätzt /BMV, 1995a/.

Als *Betriebsenergie* für Straßen wird insbesondere Strom für die Straßenbeleuchtung sowie für den Betrieb der Anlagen der Verkehrsleittechnik eingesetzt. /Hoffmann, 1995/ beziffert den Strombedarf in den alten Bundesländern für die Straßenbeleuchtung im Jahr 1992 auf 2.899 GWh und für die den Betrieb der Lichtsignalanlagen auf 400 GWh. Die angegebenen Werte werden vereinfachend auf die Gesamtstraßenlänge der alten Bundesländer bezogen.

Ergebnisse der Stoffbilanz

Damit wird der Baustoff- und Energieträgereinsatz für den Bau, Betrieb und die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur ermittelt. In Tabelle 7.3-1 sind die Mittelwerte für Bundesautobahnen (BAB), Bundesstraßen (B), Landesstraßen (L) und Kreisstraßen (K) je Kilometer dargestellt. Erwartungsgemäß liegt der Baustoff- und Energieträgereinsatz bei Autobahnen am höchsten. Auch innerhalb der Gruppe der Autobahnen ergeben sich Unterschiede, die insbesondere davon abhängen, ob eine bituminöse Fahrbahndecke oder eine Betondecke eingebaut ist. So liegt z. B.

der Zementanteil der A 5 und der A 8 höher als bei der A 81, die dagegen einen höheren Bitumeneinsatz aufweist.

Tabelle 7.3-1: Bilanzierte Baustoffe und Energieträger für die Bereitstellung der Straßeninfrastruktur

Aggregat	Aufwendungen	Einheit	BAB	B	L	K
Erdbau	Dieselmotorkraftstoff	[GJ/km]	6.491	2.093	1.623	1.324
Oberbau	Bitumen	[t/km]	476	432	164	196
	Hydr. Bindemittel (Kalk)	[t/km]	53	9	0	0
	Zement	[t/km]	1.187	0	0	0
	Sand/Kies	[t/km]	18.863	13.990	567	0
	Gebr. Erden	[t/km]	4.283	567	480	445
	Stahl	[t/km]	37	0	0	0
	Strom	[GJ/km]	181	125	50	64
	Heizöl	[GJ/km]	1.818	399	269	202
	Erdgas	[GJ/km]	46	17	11	9
	Dieselmotorkraftstoff	[GJ/km]	1.327	399	269	202
Kunstabau	Zement	[t/km]	596	409	87	49
	Sand/Kies	[t/km]	3.583	2.458	524	297
	Stahl	[t/km]	226	147	28	16
	Strom	[GJ/km]	17	12	3	1
	Bahntransport	[1000 tkm/km]	86	59	13	7
	Straßentransport	[1000 tkm/km]	432	296	63	36
Ausrüstung	Zement	[t/km]	24	8	6	5
	Sand/Kies	[t/km]	149	52	39	32
	Stahl	[t/km]	227	79	60	48
	Aluminium	[t/km]	2	1	1	1
Betrieb und Instandhaltung	Bitumen	[t/km]	19	17	7	8
	Zement	[t/km]	47	0	0	0
	Sand/Kies	[t/km]	755	560	239	293
	Markierungsfarbe	[t/km]	0,4	0,2	0,1	0,1
	Dieselmotorkraftstoff	[GJ/km]	60	25	25	25
	Strom	[GJ/km]	24	24	24	24

7.3.2.3 Wahl eines geeigneten Zuweisungsschlüssels

Die vielfache Nutzung der Straßeninfrastruktur für den Personen- und Gütertransport sowie für verkehrsfremde Aufgaben macht eine Zuordnung zu den einzelnen Verkehrsarten notwendig. Dabei müssen folgende Parameter berücksichtigt werden:

- Unterschiedliche Belastung des Straßenoberbaus aufgrund unterschiedlicher Achslasten und Fahrgeschwindigkeiten der Fahrzeuge,
- Verkehrsaufkommen nach Fahrzeugarten,

- unterschiedliche räumliche und zeitliche Belastung der Straßeninfrastruktur aufgrund der unterschiedlichen Größen und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge.

Die Zuordnung des Material- und Energieträgereinsatzes zu den einzelnen Fahrzeugarten basiert auf der Methodik zur Bestimmung der Wegekosten für den Straßenverkehr nach /Enderlein, 1992b/. Die Wegekosten werden für Bundesautobahnen, Bundesfernstraßen und „Alle Straßen“ ausgewiesen und den Fahrzeugarten Personen- und Kombinationskraftwagen, Nutzfahrzeuge des Güterverkehrs, unterteilt nach Gewichtsklassen, und übrige Kraftfahrzeuge (Busse, Krafträder) zugeordnet. Bezieht man die Wegekosten auf die entsprechenden Fahrleistungen, so können daraus Zuordnungsfaktoren für die verschiedenen Fahrzeugarten abgeleitet werden. Die Werte für Bundesfernstraßen werden für Bundesstraßen angesetzt, diejenigen für „Alle Straßen“ werden den Landes- und Kreisstraßen zugeordnet. Neben den Zuordnungsfaktoren wird das Fahrzeugaufkommen nach Fahrzeugarten für jeden betrachteten Netzabschnitt benötigt. Dazu wird die über ein Jahr gemittelte tägliche Anzahl an Fahrzeugen nach Fahrzeugarten (DTV) für das Jahr 1990 verwendet /Obermeier, 1995/.

Mit diesen Angaben ist es nun möglich, die Aufwendungen beim Bau, Betrieb und der Instandhaltung einer Strecke gemäß Gleichung 7.3-1 einem Lkw zuzuordnen.

$$A_{Lkw} = \frac{A_{ges}}{x_{Lkw} * Anz_{Lkw} + x_{Bus} * Anz_{Bus} + x_{Pkw} * Anz_{Pkw}} * x_{Lkw} \quad (7.3-1)$$

mit: A_{ges} Gesamtaufwendungen für die Bereitstellung des Straßenabschnittes
 A_{Lkw} Aufwendungen, die der Fahrt eines einzelnen Lkw zugeordnet werden
 $x_{Lkw}, x_{Bus}, x_{Pkw}$ Wegekosten pro Fahrzeugkilometer
 $Anz_{Lkw}, Anz_{Bus}, Anz_{Pkw}$ Anzahl der Pkw, Lkw und Busse auf der betrachteten Strecke

Mit Hilfe der Gleichung 7.3-1 können die Aufwendungen beim Bau, Betrieb und der Instandhaltung einer Straßenstrecke einem Lkw einer bestimmten Gewichtsklasse zugeordnet werden. Da die Einteilung der Lkw nach zulässigem Gesamtgewicht und nicht nach dem tatsächlichen Gewicht erfolgt, werden einem voll ausgelasteten und einem leeren Lkw dieselben Infrastrukturaufwendungen zugeordnet.

7.3.2.4 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Straßen

Entsprechend der in Kapitel 0 dargestellten Methodik werden der kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen im Zusammenhang mit dem Bau, dem Betrieb und der In-

standhaltung der Straßeninfrastruktur berechnet. Die Ergebnisse für die ausgewählten Straßen inkl. der kumulierten Emissionen sind in Tabelle 7.3-2 dargestellt.

Tabelle 7.3-2: Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen für Bau, Betrieb und Instandhaltung ausgewählter Straßen sowie Mittelwerte der Straßenklassen pro Lkw und gefahrenen km

	KEA	CO₂	CO	Partikel	NO_x	VOC
	[MJ/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]
A 5	0,35	33,74	0,02	2,77	0,12	0,09
A 8	0,51	26,86	0,02	2,46	0,10	0,08
A 81	1,05	44,67	0,05	3,91	0,19	0,15
B 30	1,16	36,70	0,04	0,79	0,15	0,13
B 32	1,15	39,44	0,06	0,99	0,19	0,15
BAB	0,60	34,40	0,03	3,11	0,13	0,10
BS	1,12	39,79	0,05	1,24	0,17	0,14
LS	1,45	53,09	0,08	2,43	0,27	0,21
KS	2,44	78,00	0,11	2,76	0,39	0,29
Schnitt	0,95	40,47	0,05	2,46	0,17	0,14

Abbildung 7.3-3 zeigt als ein Ergebnis dieser Berechnung den kumulierten Energieaufwand ausgewählter Straßen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit, werden die Werte auf die Straßenlänge bezogen. Auf der Basis der in Kapitel 7.3.2.3 dargestellten Zuordnungsmethodik erhält man hieraus die auf die Streckenbelastung bezogenen Werte (vgl. Abb. 7.3-4).

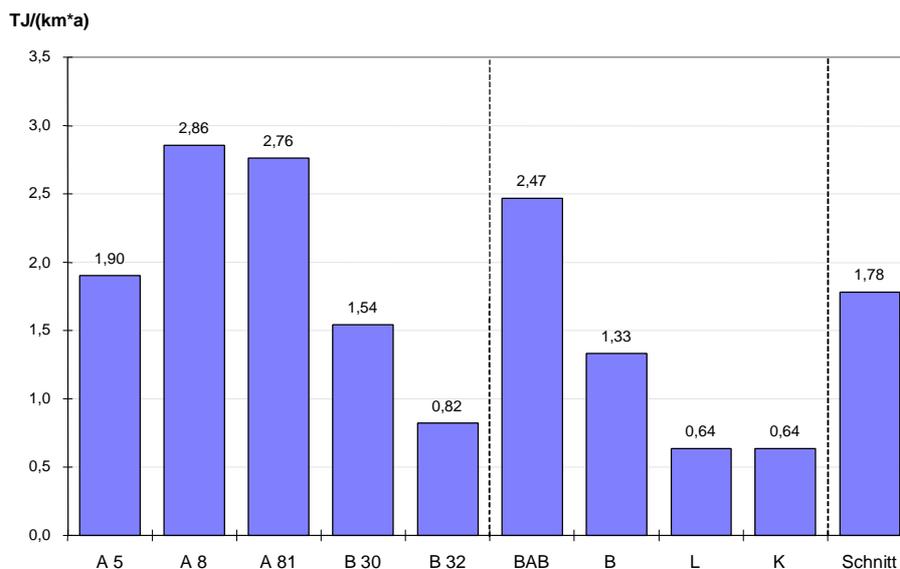


Abbildung 7.3-3: Kumulierter Energieaufwand für Bau, Betrieb und Instandhaltung ausgewählter Straßen sowie Mittelwerte für die Straßenklassen

Im Vergleich mit Abbildung 7.3-3 ist deutlich der Einfluß der Straßenbelastung ersichtlich. Obwohl z. B. Autobahnen absolut den höchsten Energieaufwand erfordern, ergeben sich aufgrund der hohen Belastungswerte die geringsten fahrzeugspezifischen Werte.

Beim Vergleich der Werte der A 5 und der A 8 zeigt sich folgender Effekt. Obwohl der Energieaufwand für die Bereitstellung der A 5 geringer ist als für die A 8, liegen bei der erstgenannten Autobahn die CO₂-Emissionen höher. Dies liegt darin begründet, daß der im Vergleich zur A 5 höhere Bitumenanteil der A 8 als stoffgebundene Energie bilanziert wird, das Bitumen aber nicht energetisch genutzt wird und daher keine Verbrennungsemissionen freigesetzt werden.

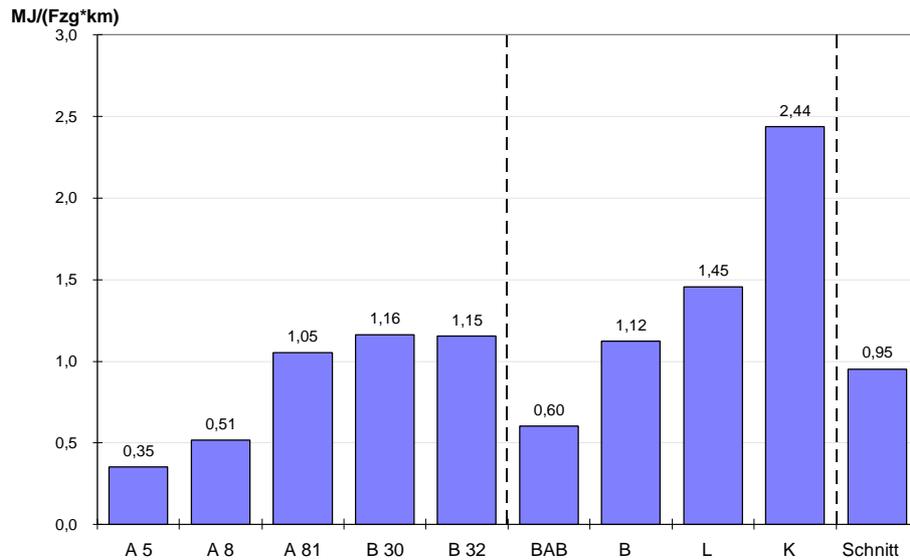


Abbildung 7.3-4: Kumulierter Energieaufwand für den Bau, Betrieb und Instandhaltung ausgewählter Straßenstrecken bezogen auf die Streckenbelastung

Neben den Straßenklassen Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen werden auch Straßen betrachtet, für die weder Informationen zum Aufbau noch Belastungsdaten vorliegen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Innerortsstraßen, teilweise auch Privatstraßen, wie. z. B. Werkszufahrten. Diese Straßen werden unter dem Begriff unklassifizierte Straßen zusammengefaßt. Der kumulierte Energieaufwand und die kumulierten Emissionen aufgrund der Bereitstellung werden mit Hilfe des Mittelwerts der entsprechenden Werte der Bundes-, Landes- und Kreisstraßen abgeschätzt.

Tabelle 7.3-3 zeigt die Aufteilung des kumulierten Energieaufwands auf die Herstellung der einzelnen Straßenaggregate und die Instandhaltung inkl. dem Betrieb. Danach ergibt sich der höchste Energieaufwand im Zusammenhang mit der Bereitstellung des Straßenoberbaus, gefolgt von den Aufwendungen für die Straßenausrüstungen. Der Anteil der Aufwendungen für Kunstbauten liegt für Bundesstraßen und Autobahnen aufgrund des höheren Bedarfs an Bauwerken über den entsprechenden Werten für Landes- und Kreisstraßen.

Tabelle 7.3-3: Aufteilung des kumulierten Energieaufwands auf die Straßenaggregate

	Erdbau	Oberbau	Kunstabauten	Ausrüstungen	Betrieb und Instandhaltung
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
BAB	2	60	9	20	8
B	2	62	11	14	11
L	3	52	4	21	20
K	2	61	2	16	18
Schnitt	2	61	8	17	12

Fazit: Die durchgeführte Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen für die betrachteten Straßenabschnitte zeigt, daß die einer einzelnen Fahrt zuzuordnenden Aufwendungen je nach Straße große Unterschiede aufweisen können. Die Zuordnung der Aufwendungen zu einer untersuchten Fahrt erfolgt dabei über die konkreten Streckenbelastungen. Dabei wird die Methodik des DIW zur Ermittlung der Wegekosten angewandt. Die Ergebnisse zeigen, daß mehr als die Hälfte des Energieaufwands im Zusammenhang mit der Oberbauherstellung anfällt, während die Erdbauarbeiten mit 2 % eine untergeordnete Rolle spielen.

Aufgrund der Vielzahl der betrachteten Streckenabschnitte konnten nicht Daten in jeweils gleicher Detaillierung ermittelt werden. Insbesondere für den Betrieb und die laufende Instandhaltung der Straßeninfrastruktur zeigt sich eine unbefriedigende Datenlage. Aufgrund der großen Bedeutung bezüglich des kumulierten Energieaufwands besteht noch weiterer Forschungsbedarf im Zusammenhang mit der Herstellung des Oberbaus und der damit zusammenhängenden Baustoffbereitstellung.

7.3.3 Bahninfrastruktur

7.3.3.1 Technische Grundlagen

Das Streckennetz der ehemaligen Deutschen Bundesbahn wird eingeteilt in die sogenannten Neubaustrecken des Hochgeschwindigkeitsverkehrs (NBS) und in Altbaustrecken (ABS). Die Altbaustrecken werden entsprechend ihrer betrieblichen Bedeutung weiter unterteilt in

- Hauptabfuhrstrecken (HAS): stark belastete Strecken des IC-Kernnetzes mit mehr als 120 Zugfahrten je Richtung und Tag,

- Nebenfernstrecken (NFS): Anschlußstrecken des internationalen Verkehrs oder Entlastungsstrecken,
- Sonstige Strecken: Übrige Strecken mit durchgehenden Hauptgleisen.

Die Dimensionierung des Schienenoberbaus und damit der notwendige Materialeinsatz orientiert sich weitgehend an den Betriebsbelastungen der Strecken. Daher wird für jeden der genannten Streckentypen eine Material- und Energieträgerbilanz durchgeführt und anhand dieser der kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen für den Bau, Betrieb und die Instandhaltung der konkreten Strecken bestimmt.

Abbildung 7.3-5 zeigt eine schematische Darstellung der verschiedenen Elemente einer Schienenstrecke. Als Untergrund bezeichnet man den natürlich anstehenden Boden. Darauf baut die Dammschüttung und bei Bedarf die Frostschutzschicht auf. Die Frostschutzschicht kann meist nicht aus dem Erdaushub gewonnen werden und muß daher angeliefert werden. Diese Schichten werden unter dem Begriff Unterbau zusammengefaßt; die Oberkante des Unterbaus wird als Erdplanum bezeichnet. Die anschließenden Schichten des Oberbaus umfassen die Planumsschutzschicht, das Schotterbett und schließlich den Gleisrost. Die Planumsschutzschicht besteht aus Kiessand oder Split und wird nur bei Bedarf (hochbelastete Strecken oder schlechter Untergrund) eingebaut. Der Gleisrost besteht aus den Schienen, den Schwellen und den sogenannten Kleineisen zur Befestigung der Schienen auf den Schwellen. Bei der ehemaligen Deutschen Bundesbahn sind teilweise Holz-, Beton- und Stahlschwellen im Einsatz. Je nach Streckenbelastung werden unterschiedlich schwere Schienen eingesetzt. Zum Ausgleich natürlicher Hindernisse werden Kunstbauten wie Brücken und Tunnels benötigt. Die Anzahl der Kunstbauten hängt von den topologischen Gegebenheiten ab, liegt aber aufgrund der Trassierungsparameter von Bahnstrecken in der Regel höher als bei Straßen.

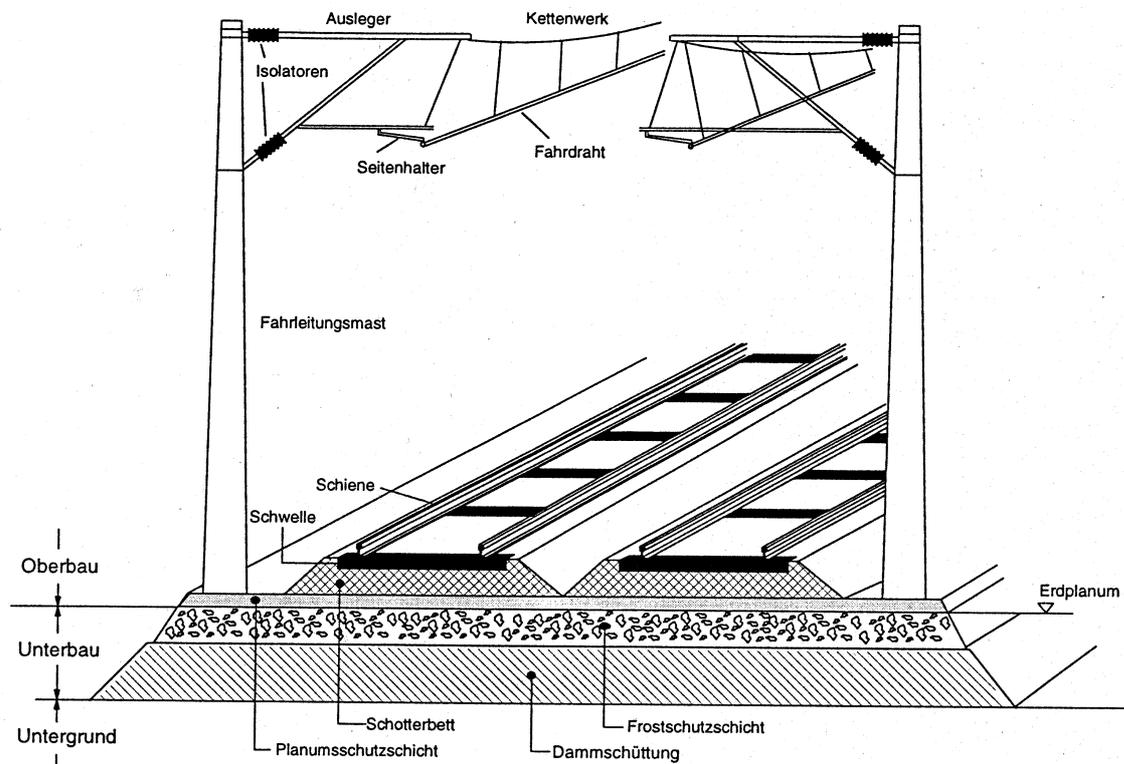


Abbildung 7.3-5: Schematische Darstellung der Elemente von Schienenstrecken /Henn; 1988, Adler, 1990/

Die Brücken werden in die Bauarten Stahlbrücken, Verbundbrücken und Massivbrücken eingeteilt. Verbundbrücken bestehen aus einer Kombination von Beton- und Stahlbauteilen. /Grüter, 1995/ gibt folgende Zusammensetzung des Brückenbestandes der ehemaligen Deutschen Bundesbahn an:

- 24,7 % Stahlbrücken,
- 28,5 % Verbundbrücken und
- 45,6 % Massivbrücken.

Brücken werden in die Bauelemente Brückenüberbau und Brückenunterbau eingeteilt. Der Brückenüberbau ist das Haupttragwerk, auf der die Fahrbahn aufliegt. Der Brückenüberbau stützt sich auf dem Brückenunterbau ab. Darunter sind Pfeiler, Widerlager, Stützen und Fundamente zusammengefaßt /Adler, 1990/.

Weitere Bauwerke sind zur Entwässerung, zur Sicherung von Böschungen sowie zum Schallschutz notwendig. In Abbildung 7.3-5 sind darüber hinaus die Elemente der Oberleitung darge-

stellt. Für den Bahnbetrieb sind weiterhin Einrichtungen der Telekommunikation und der Signalisation notwendig.

7.3.3.2 Material- und Energieträgereinsatz

In diesem Abschnitt wird der Material- und Energieträgereinsatz für den Bau und die Nutzung von Schienenstrecken ermittelt. Die Baumaßnahmen werden aufgegliedert in die Herstellung des Unterbaus, des Oberbaus, der Kunstbauten und der Streckenausrüstung. Während der Nutzungsphase fallen Aufwendungen im Zusammenhang mit dem Betrieb und der Instandhaltung der Strecken an. Die Transportentfernungen für die wichtigsten Baustoffe werden anhand der Lage der Lieferstellen ermittelt /Rebmann, 1981/.

Unterbau

Die Arbeiten zur Herstellung des *Unterbaus* umfassen im wesentlichen die Herstellung des Erdplanums und ggf. den Einbau einer Frostschutzschicht. Die zum Bau von Bahnstrecken notwendigen Erdbewegungen hängen sehr stark von der örtlichen Topologie ab. Die Arbeiten werden hauptsächlich mit dieselbetriebenen Baumaschinen durchgeführt. Angaben zum Umfang der notwendigen Erdbauarbeiten für Bahnstrecken liegen nicht vor. Daher wird näherungsweise der dafür notwendige Dieselkraftstoffbedarf über den entsprechenden Wert für Autobahnen in Höhe von $0,24 \text{ GJ/m}^2$ /Beyert, 1985/ abgeschätzt (vgl. Kap. 0). Die mittlere Lebensdauer des Untergrunds ist in /Enderlein, 1992a/ mit 116 Jahren angegeben.

Auf Neubaustrecken und hochbelasteten Hauptabfuhrstrecken wird zusätzlich eine *Frostschutzschicht* aus Dammschüttgut mit einer Dicke von ca. 50 cm eingebaut. Der notwendige Baustoffbedarf wird durch die mittlere Breite des Unterbaus von etwa 13 m abgeschätzt. Für eine zweigleisige Neubaustrecke ergibt sich damit ein Schüttgutbedarf von 11.880 t/km.

Oberbau

Die unterste Schicht des Oberbaus ist die *Planumsschutzschicht*. Diese hat eine Dicke von ca. 20 cm und besteht aus Planumskiessand. Die Abschätzung der notwendigen Baustoffmenge erfolgt analog der Vorgehensweise bei der Frostschutzschicht. Für eine Neubaustrecke ergibt sich ein Kiessandbedarf von 4.750t/km. Die Planumsschutzschicht wird nur auf Neubaustrecken und Hauptabfuhrstrecken eingebaut. Ihre Lebensdauer entspricht der Frostschutzschicht.

Der *Schotterbedarf* für Neubaustrecken wird mit Hilfe des Regelquerschnittes des Bahnkörpers /Münchschaner, 1993/ auf $5.500 \text{ m}^3/\text{km}$ abgeschätzt. Der entsprechende Wert für ein- bzw. zweigleisige Altbaustrecken beträgt $1.744 \text{ m}^3/\text{km}$ bzw. $3.740 \text{ m}^3/\text{km}$ /Heimerl, 1992/.

Je nach Streckenbelastung und damit nach Streckentyp werden unterschiedlich schwere *Schienen* eingesetzt. Auf Neubaustrecken und Hauptabfuhrstrecken kommen hauptsächlich die Schienen des Typs UIC 60 mit einem Gewicht von 60 kg/m zum Einsatz, auf Nebenfernstrecken des Typs S 54 mit 54 kg/m und auf den sonstigen Strecken des Typs S 49 mit 49 kg/m . Der erhöhte Materialeinsatz aufgrund von Weichen und Überholgleisen wird basierend auf /Schroeder-Baumgart, 1993/ generell durch einen Zuschlag von 5 % auf den Stahlbedarf der Schienen abgeschätzt. Unter *Kleineisen* versteht man im Eisenbahnbau die Teile zur Schienenbefestigung auf der Schwelle. Nach /Fendrich, 1992/ beträgt das Gewicht des verbauten Kleineisens 1,3 Mio. t im Bereich der ehemaligen Deutschen Bundesbahn. Bezogen auf eine Gleislänge von 54.505 km /DB, 1993/ ergibt dies ein Stahleinsatz für Kleineisen von $23,8 \text{ t}$ pro Gleiskilometer. Der Transport von Schienen und von Kleineisen erfolgt von der Stahlhütte zum Walzwerk, von dort zum Schweißwerk und schließlich zum Einbauort.

Auf den durchgehenden Strecken der ehemaligen Deutschen Bundesbahn kommen hauptsächlich *Betonschwellen* und *Holzschwellen* zum Einsatz. Das Gewicht einer Betonschwelle B 70 W beträgt 300 kg . Holzschwellen bestehen in der Regel aus teerölgetränktem Buchenholz. Ihr Gewicht wird mit Hilfe des Schwellenvolumens /Heimerl, 1992/ und der Dichte von Buchenholz auf 81 kg abgeschätzt. Zur Verlängerung der Haltbarkeit wird jede Holzschwelle mit ca. 19 kg Teeröl imprägniert. Die Schwellen liegen in einem durchschnittlichen Abstand von 60 cm /Linkerhägner, 1985/. Analog der Vorgehensweise bei den Schienen wird der zusätzliche Schwellenbedarf aufgrund von Weichen und Überholgleisen mit einem Zuschlag von 5 % abgeschätzt. Der Schwellentransport erfolgt mit der Bahn.

Detaillierte Angaben zum *Energieeinsatz für die Oberbauherstellung* liegen nicht vor. Daher wird für eine erste Näherung der Energieeinsatz über die Motorleistung der notwendigen Baumaschinen abgeschätzt. Unter Berücksichtigung des mittleren Wirkungsgrades von Dieselmotoren ergibt sich für eine zweigleisige Strecke ein Dieselmotorkraftstoffbedarf von 911 kg/km .

Die Lebensdauer der einzelnen Oberbauelemente variiert von 90 Jahren für die Planumsschutzschicht bis zu 20 Jahren für das Schotterbett von Hauptabfuhrstrecken /Enderlein, 1992a, Schroeder-Baumgart, 1993, Heimerl, 1992/.

Kunstabauten

Der Bedarf an *Kunstabauten* hängt von den topologischen Gegebenheiten sowie den Trassierungsparametern der Bahnstrecke ab. Die streckenspezifischen Brücken- und Tunnellängen

werden daher für alle betrachteten Relationen bestimmt /DBAG, 1996c/. Mit Hilfe des durchschnittlichen Baustoffeinsatzes für Brücken und Tunnels wird daraus der Materialbedarf berechnet (vgl.Tab.7.3-4). Die mittlere Lebensdauer von Kunstbauten wird nach /Enderlein, 1992a/ mit 70 Jahren angenommen.

Tabelle 7.3-4: Materialeinsatz für Kunstbauten /DBAG, 1996a, Halberstadt, 1991, Lünser, 1996, DGGT, 1995, Stiller, 1993/

	Bauart	Materialeinsatz	Ein-	Neubaustrecken	Altbaustrecken	Altbaustrecken
				Zweigleisig	eingleisig	zweigleisig
Brücken	Massivbrücke	Stahlbeton	[t/m]	49,1	24,6	49,1
	Verbund-	Stahlbeton	[t/m]	41,2	20,3	41,2
		Stahl	[t/m]	4,6	2,3	4,6
	Stahlbrücke	Stahlbeton	[t/m]	20,3	10,1	20,3
		Stahl	[t/m]	9	4,5	9
Tunnels		Stahlbeton	[t/m]	136,4	-	106,5
Sonstige Bauten		Stahlbeton	[t/km]	1.610	805	1.610

Der mittlere Materialeinsatz für die verschiedenen *Brückenarten* basiert teilweise auf Angaben der /DBAG, 1996a/ oder auf Materialabschätzungen über die Querschnittsdarstellung von Brücken /Halberstadt, 1991/. Sofern keine Daten zu Bahnbrücken vorliegen, wird auf die entsprechenden Werte von Straßenbrücken zurückgegriffen /Lünser, 1996/. Dabei wird die verstärkte Ausführung von Bahnbrücken mittels Materialzuschlagsfaktoren berücksichtigt.

Der Materialeinsatz für den Bau von *Bahntunnels* wird anhand der Angaben in /DGGT, 1995/ ermittelt. Es wird vereinfachend angenommen, daß alle Tunnels in Spritzbetonbauweise ausgeführt sind.

Der Baustoffeinsatz für die Herstellung *sonstiger Kunstbauten*, wie z. B. Stützwände, Entwässerungsanlagen oder sonstige Befestigungen, basiert auf den Angaben in /Stiller, 1993/.

Streckenausrüstung

Unter dem Begriff *Streckenausrüstung* werden die Elemente der Fahrleitung sowie die Signalisations- und Kommunikationsanlagen zusammengefaßt. Die verfügbaren Materialangaben beziehen sich auf den mittleren Materialeinsatz einer zweigleisigen Neubaustrecke /Steierwald, 1994/. Die Werte werden vereinfachend für alle Streckentypen übernommen. Die mittlere Lebensdauer von Streckenausrüstungen beträgt 18 Jahre /Enderlein, 1992a/.

Instandhaltung und Betrieb

Nach DIN 31051 wird die Instandhaltung technischer Systeme in Wartung, Inspektion und Instandsetzung eingeteilt (vgl.Abb. 7.3-2). Die Aufwendungen aufgrund von Erneuerungsarbeiten nach Ablauf der Lebenszeit sind durch die lineare Abschreibung des Herstellungsaufwands über

die Lebensdauer der einzelnen Streckenelemente berücksichtigt. Weitere Angaben zum Material- und Energieträgereinsatz für Maßnahmen der Wartung, Inspektion und der baulichen Unterhaltung liegen nicht vor. Eine wichtige Unterhaltungsarbeit ist die Gleisdurcharbeitung (DUA). In erster Näherung wird der dafür notwendige Dieselmotoreinsatz abgeschätzt. Nach /Junkermann, 1990/ ist eine Gleisdurcharbeitung alle 4 Jahre notwendig. Der dazu notwendige Dieselmotoreinsatz wird anhand der eingesetzten Baumaschinen ermittelt.

Für den *Betrieb von Schienenstrecken* wird im stationären Bereich elektrische Energie für die Weichenbeheizung sowie für die Beleuchtung, für den Betrieb von Signal- und Telekommunikationsanlagen und für andere Verbraucher benötigt. Die Beheizung der Weichen im Winter erfolgt zum größten Teil mit $16 \frac{2}{3}$ Hz Bahnstrom. Entsprechend der Bahnstromstatistik wurden 1992 dafür 36,6 GWh Strom eingesetzt /DBAG, 1995/. Bezogen auf eine Gleislänge von 54.505 km /DB, 1993/ ergibt sich damit ein Bahnstrombedarf von 0,7 MWh/km. Der Strombezug aus dem öffentlichen Netz wird von der ehemaligen Deutschen Bundesbahn nicht nach Verwendungszwecken (z. B. für Betriebszwecke oder für die Versorgung von Bahnhöfen) aufgeschlüsselt. Es wird jedoch davon ausgegangen, daß ein Großteil des eingesetzten Stromes für Betriebszwecke benötigt wird. Nach den Angaben in /Schulz, 1995/ wurden 1991 insgesamt 920 GWh Strom aus dem öffentlichen Netz benötigt. Bezogen auf die gesamte Gleislänge ergibt dies einen Strombedarf von 16,9 MWh/km.

Ergebnisse der Stoffbilanz

Auf der dargestellten Datenbasis wird der Baustoff- und Energieträgereinsatz für den Bau, Betrieb und die Instandhaltung der Schieneninfrastruktur ermittelt. In Tabelle 7.3-5 sind die Mittelwerte für die verschiedenen Streckentypen je Kilometer dargestellt. Teilweise handelt es sich um elektrifizierte (el.) und teilweise um nicht elektrifizierte (n. el.) Strecken. Die Materialaufwendungen für die Herstellung der Kunstbauten hängen von der spezifischen Brücken- und Tunnellänge der Strecke ab. Es zeigt sich, daß der Materialbedarf sowie die bewegten Massen bei Neubaustrecken deutlich höher liegen als z. B. bei einer zweigleisigen Hauptabfuhrstrecke. Generell nimmt der Material- und Energieträgereinsatz mit sinkender Streckenbedeutung ab.

Tabelle 7.3-5: Bilanzierte Materialien und Energieträger für die Bereitstellung der Schieneninfrastruktur

Aggregat	Aufwendungen	Einheit	NBS	HAS	NFS	Sonstige
			zweigleisig el.	Zweigleisig	zweigleisig	eingleisig n.
Erdbau	Dieselmotorkraftstoff	[GJ/km]	3.678	2.904	2.904	1.936
PSS/FSS	PSS/FSS	[t/km]	16.630	16.630	0	0
Oberbau	Zement	[t/km]	145	38	53	34
	Sand/Kies	[t/km]	872	231	318	203
	Schotter	[t/km]	7.970	5.423	5.423	2.529
	Stahl	[t/km]	347	298	274	127
	Holz	[t/km]	0	209	180	76
	Teeröl	[t/km]	0	49	42	18
Kunstabauwerke¹⁾	Zement	[t/km]	6.208	3.605	833	263
	Sand/Kies	[t/km]	37.338	21.685	5.012	1.584
	Stahl	[t/km]	2.024	1.369	373	117
Ausrüstungen	Zement	[t/km]	75	75	69	35
	Sand/Kies	[t/km]	450	450	415	208
	Stahl	[t/km]	49	49	23	11
	Aluminium	[t/km]	2	2	0	0
	Kupfer	[t/km]	5	5	0	0
	Polyethylen	[t/km]	28	28	28	14
Betrieb und Instandhaltung	Strom 50 Hz	[GJ/km]	122	122	122	61
	Strom 16 2/3 Hz	[GJ/km]	5	5	5	2
	Dieselmotorkraftstoff	[GJ/km]	16	10	10	5

¹⁾ beispielhaft anhand der Strecken Mannheim-Stuttgart für NBS, Mannheim-Weil für HAS, Ulm-Lindau für NFS und Ravensburg-Pfullendorf für sonstige Strecken

7.3.3.3 Wahl eines geeigneten Zuweisungsschlüssels

Die Material- und Energieträgeraufwendungen für den Bau, Betrieb und die Instandhaltung einer Bahnstrecke werden mit Hilfe der Streckenbelastung einer einzelnen Zugfahrt zugeordnet. Die Belastung wird durch die Betriebsdichte einer Strecke ausgedrückt. Diese ist definiert als „Belegung der Strecke mit Zügen in einem bestimmten Zeitraum“ /Schroeder-Baumgart, 1993/:

$$\text{Betriebsdichte} = \frac{\text{gefahrte Leistungstonnenkilometer}}{\text{Betriebslänge in km Strecke}} [Lt / a] \quad (7.3-2)$$

Das Leistungsgewicht ist als das Gesamtgewicht des Zuges inkl. des Lokomotivgewichts definiert. Multipliziert mit der gefahrenen Strecke ergibt sich die Betriebsleistung mit der Einheit

Leistungstonnenkilometer [Ltkm]. Die Betriebsdichte liegt für alle betrachteten Strecken vor /DBAG, 1996b/.

Mit der Betriebsdichte als Bezugsgröße erfolgt die Zuordnung der Aufwendungen zu einer Zugfahrt entsprechend Gleichung 7.3-3.

$$a_{\text{Zug}} = \frac{A_{\text{Strecke}}}{BD_{\text{Strecke}}} * m_{\text{Zug}} \quad (7.3-3)$$

mit:	a_{Zug}	Einer Zugfahrt zuzuordnende Aufwendungen
	A_{Strecke}	Jährliche Aufwendungen für Bau, Betrieb und Instandhaltung der Strecke
	BD_{Strecke}	Betriebsdichte auf der betrachteten Strecke
	m_{Zug}	Leistungsgewicht des Zuges

Die einer einzelnen Zugfahrt zuzuordnenden Aufwendungen sind daher proportional zum Zuggewicht. Damit ist es nicht notwendig, zwischen Güter- und Personenverkehr zu unterscheiden.

7.3.3.4 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Schienenstrecken

Entsprechend der in Kapitel 7.1.3 und 7.3.3.3 dargestellten Methodik und basierend auf dem in Kapitel 7.3.3.2 dargestellten Material- und Energieträgereinsatz werden der kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen im Zusammenhang mit dem Bau, dem Betrieb und der Instandhaltung der Schieneninfrastruktur berechnet. Abbildung 7.3-6 zeigt als ein Ergebnis dieser Berechnung den kumulierten Energieaufwand ausgewählter Bahnstrecken. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit, werden die Werte auf die Streckenlänge bezogen. Unter Zugrundelegung der in Kapitel 7.3.3.3 dargestellten Zuordnungsmethodik ergeben sich daraus die auf die Betriebsleistung bezogenen Werte (vgl. Abb. 7.3-7). In Abbildung 7.3-7 zeigt sich sehr deutlich der Einfluß der Streckenbelastung auf die bezogenen Werte. So liegt z. B. der absolute kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung der Strecke Stuttgart-Hafen bis Vaihingen⁴ um das Fünffache über dem vergleichbaren Wert der Strecke Villingen bis Bahnhof Schwenningen, der belastungsbezogene Wert der letztgenannten Relation hingegen liegt aufgrund der geringen Streckenauslastung dennoch um nahezu das Sechsfache über dem der erstgenannten Strecke.

⁴ Zur Strecke gehört ein Tunnelabschnitt mit einer Länge von 9,3 km (S-Bahn Strecke).

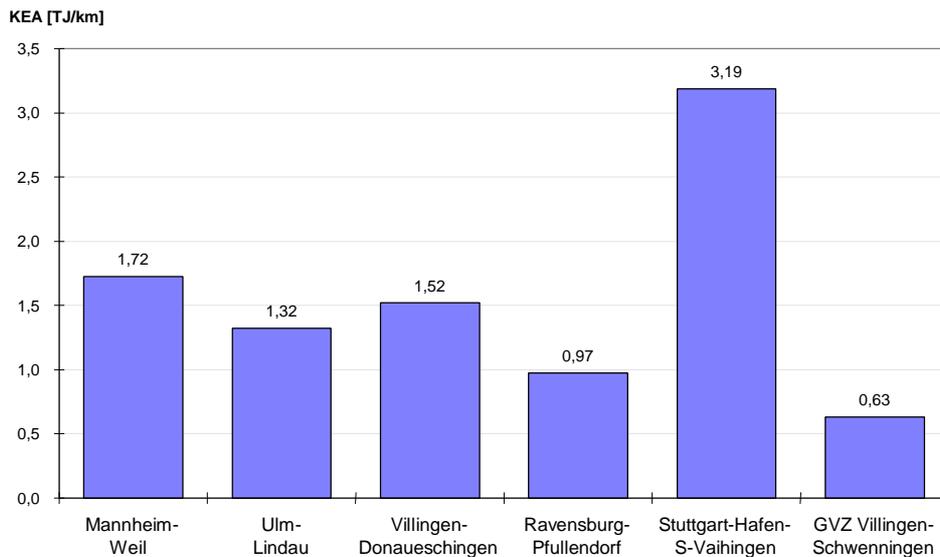


Abbildung 7.3-6: Kumulierter Energieaufwand für den Bau, Betrieb und Instandhaltung ausgewählter Bahnstrecken

Zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen für eine Zugfahrt muß das Leistungsgewicht des Zuges bekannt sein. In Tabelle 7.3-6 werden beispielhaft die Ergebnisse für die Fahrt eines ausgewählten Zuges auf den in Abbildung 7.3-7 betrachteten Strecken dargestellt.

In Tabelle 7.3-7 ist die Verteilung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen auf die einzelnen Aggregate anhand der Relation Mannheim-Basel dargestellt. Es zeigt sich, daß der Oberbau den größten Beitrag zum kumulierten Energieaufwand liefert, gefolgt vom Betrieb und der Instandhaltung und der Streckenausrüstung. Bei den kumulierten Emissionen ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Auffallend ist der sehr hohe Anteil der Oberbauherstellung an den Partikelemissionen. Der im Vergleich zum Energieaufwand geringe Anteil der CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit der Oberbauherstellung ist auf den Einsatz von Holzschwellen zurückzuführen.

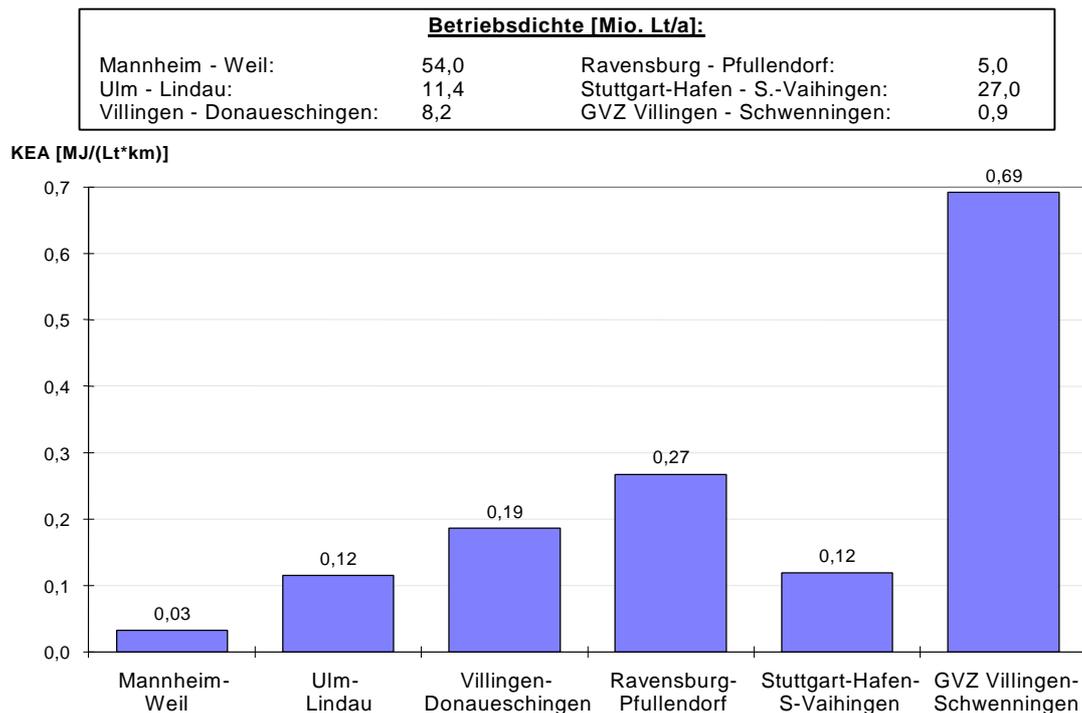


Abbildung 7.3-7: Kumulierter Energieaufwand für den Bau, Betrieb und Instandhaltung ausgewählter Bahnstrecken, bezogen auf die Betriebsdichte der Strecken

Tabelle 7.3-6: Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen beim Bau, Betrieb und der Instandhaltung ausgewählter Bahnstrecken für eine Zugfahrt¹⁾

Relation	KEA	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[MJ/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Mannheim - Basel	14	490	0	188	2	3
Neu-Ulm - Lindau	49	1.323	1	570	6	9
Villingen - Donaueschingen	79	2.251	2	892	10	14
Ravensburg - Pfullendorf	113	3.897	3	1.257	15	21
Stuttgart-Hafen - S-Vaihingen	51	3.279	2	476	10	12
GVZ Villingen - Schwenningen	293	10.792	9	3.173	41	57

¹⁾ Leistungsgewicht des Zuges: 424 t (271 t Leergewicht, 153 t Zuladung)

Tabelle 7.3-7: Anteil der Einzelaggregate der Strecken Mannheim-Basel am kumulierten Energieaufwand und an den kumulierten Emissionen

	Erdbau	Unterbau	Oberbau	Kunstabauten	Ausrüstungen	Betrieb u. Instandhaltung
KEA	2%	2%	42%	13%	18%	24%
CO ₂	3%	3%	12%	34%	27%	21%
CO	24%	6%	28%	18%	15%	9%
Partikel	0%	0%	91%	6%	2%	0%
NO _x	16%	5%	30%	23%	18%	8%
VOC	3%	2%	38%	19%	22%	16%

Fazit: Die für die einzelnen Bahnstrecken ermittelten kumulierten Energieaufwendungen und kumulierten Emissionen zeigen je nach betrachteter Strecke noch deutlichere Unterschiede als es bei den Straßen der Fall ist. Dabei spielt die Streckenbelastung wiederum die entscheidende Rolle. Die Ergebnisse zeigen, daß nahezu die Hälfte des Energieaufwands im Zusammenhang mit der Oberbauerstellung anfällt, während die Erdarbeiten und die Herstellung des Unterbaus mit einem Anteil von jeweils 2 % eine untergeordnete Rolle spielen.

Die vorhandenen Daten zum Material- und Energieträgereinsatz für die Herstellung, den Betrieb und die Instandhaltung von Bahnstrecken weisen noch Lücken auf oder basieren auf relativ unsicheren Abschätzungen. Insbesondere für den Betrieb und die laufende Instandhaltung besteht in Zukunft noch Forschungsbedarf. Aufgrund des hohen Beitrags des Oberbaus zum kumulierten Energieaufwand und zu den kumulierten Emissionen sollte auch dieser im Zentrum weitere Untersuchungen stehen, zumal neue Oberbautechniken, wie z. B. die feste Fahrbahn, insbesondere den Betoneinsatz und damit den Energiebedarf deutlich erhöhen werden.

7.3.4 Binnenwasserstraßen

7.3.4.1 Technische Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird der Gütertransport mit dem Binnenschiff auf den Relationen Weil am Rhein bis Mannheim über den Rhein sowie Plochingen bis Mannheim über den Neckar betrachtet (vgl. Kap. 5.4.1). Die Schiffbarmachung der natürlichen Gewässer erfordert einen großen Materialeinsatz für die Uferbefestigung sowie für die notwendigen Schleusen. Die für den Betrieb den Binnenwasserstraßen notwendigen Hafenanlagen stellen Umschlaganlagen dar und werden im Kapitel 7.3.5 betrachtet.

Die betrachteten Binnenwasserstraßen werden weitestgehend durch die Schiffbarmachung natürlicher Gewässer hergestellt. Dazu sind umfangreiche Erdbewegungen notwendig, um eine den Anforderungen des Binnenschiffsverkehrs entsprechende Fahrrinne sowie Schleusen herzustellen. Aufgrund der Verschlammung bzw. der Sohlenerosion sind zur Unterhaltung des Wasserstraße auch Ausbaggerungen oder die Zugabe von Geschiebe nötig. Der von den Schiffen verursachte Wellenschlag führt zur Erosion des Ufers, daher müssen die Uferböschungen ausreichend befestigt werden. Für Uferbefestigungen kommen verschiedene Bauarten zum Einsatz. Zur Anwendung kommen durchlässiges Deckwerk, dichtes Deckwerk über Ton oder Asphalt sowie Betonmauern. Je nach dem Gefälle des Flusses ist der Einbau von Schleusen notwendig. Diese erfüllen vielfältige Aufgaben. Sie reduzieren zum einen die Fließgeschwindigkeit des Flusses und ermöglichen dadurch die für den Schiffsverkehr notwendige Wassertiefen. Andererseits dienen sie auch zur Regulierung des Wasserstandes und erfüllen damit Aufgaben des Hochwasserschutzes. Als Staustufen mit mehreren Metern Gefälle werden fast alle Flußschleusen auch zur Stromerzeugung genutzt.

7.3.4.2 Material- und Energieträgereinsatz

Die Ermittlung des Material- und Energieträgereinsatz im Zusammenhang mit der Schiffbarmachung sowie mit dem Betrieb und der Instandhaltung der Flüsse Rhein und Neckar basiert weitestgehend auf den Angaben in /Stiller, 1995/.

Nach /Stiller, 1995/ beträgt der für *Erdarbeiten* notwendige Dieselkraftstoffeinsatz $1,2 \text{ l/m}^3$ bewegter Erde. Es wird angenommen, daß die bewegten Erdmassen wieder ortsnah in die Trasse eingebaut werden, daher werden weitergehende Transporte nicht betrachtet. Die Lebensdauer der Trassierung beträgt 116 Jahre /Enderlein, 1992b/.

Die mittlere Lebensdauer der verschiedenen *Uferbefestigungen* liegt zwischen 28 Jahren für loses Deckwerk und 58 Jahren für Betonmauern /Stiller, 1995/.

Für den Bau von *Schleusen* wird hauptsächlich Beton zur Errichtung der Schleusenkammern sowie Stahl zur Herstellung der Schleusentore benötigt. Der Materialbedarf zum Bau der Stau-mauer wird der Stromerzeugung zugeordnet und ist daher nicht Bestandteil der folgenden Betrachtung. Die mittlere Lebensdauer der Schleusentore beträgt 40 Jahre und die der Schleusen-kammern 78 Jahre /Stiller, 1995/.

Die bilanzierten *Instandhaltungsaufwendungen* von Binnenwasserstraßen beschränken sich auf die jährlichen Ausbaggerungen sowie auf die beim Rhein erforderliche Zugabe von Geschiebe infolge von Sohlenerosion.

Auf der dargestellten Datenbasis wird der Baustoff- und Energieträgereinsatz für den Bau und die Instandhaltung der betrachteten Binnenwasserstraßen ermittelt. Es ergibt sich der in Tabelle 7.3-9 dargestellte Material- und Energieträgereinsatz. Aufgrund einer höheren Schleusendichte auf dem Neckar ergibt sich im Vergleich zum Rhein ein höherer Materialeinsatz.

Tabelle 7.3-9: Bilanzierte Materialien und Energieträger für die Bereitstellung der Binnenwasserstraßen

Aggregat	Aufwendungen	Einheit	Rhein	Neckar
Erdbau	Dieselmotorkraftstoff	[GJ/km]	4.827	4.626
Uferbefestigung	Zement	[t/km]	61	61
	Sand/Kies	[t/km]	2.934	2.934
	Stahl	[t/km]	20	20
	Bitumen	[t/km]	33	33
	Schotter	[t/km]	8.706	8.706
	Strom	[GJ/km]	8	8
	Heizöl	[GJ/km]	87	87
	Erdgas	[GJ/km]	93	93
	Transport Schiene	[1000 tkm/km]	44	44
	Transport Straße	[1000 tkm/km]	8,8	8,8
Schleuse	Zement	[t/km]	2.160	2.641
	Sand/Kies	[t/km]	12.990	15.883
	Stahl	[t/km]	1.210	1.382
	Strom	[GJ/km]	62	76
	Transport Schiene	[1000 tkm/km]	1.565	1.914
	Transport Straße	[1000 tkm/km]	313	383
Instandhaltung	Dieselmotorkraftstoff	[GJ/km]	7,8	29,9

7.3.4.3 Wahl eines geeigneten Zuweisungsschlüssels

Der in Kapitel 7.3.4.2 ermittelte Material- und Energieträgereinsatz berücksichtigt nur die Aufwendungen im Zusammenhang mit der Schiffbarmachung der Flüsse und wird daher vollständig der Binnenschifffahrt zugeordnet. Binnenwasserstraßen werden nahezu ausschließlich für den Gütertransport genutzt. Daher wird der Material- und Energieträgereinsatz für die Bereitstellung von Binnenwasserstraßen vollständig dem Güterverkehr zugeordnet und auf die Fahrleistungen der Güterbinnenschifffahrt des Jahres 1992 bezogen. Nach /WSD, 1996/ wurde 1992 auf dem betrachteten Abschnitt des Neckars eine Verkehrsleistung von 2,3 Mio. Schiffskilometern erbracht. Der entsprechende Wert für die untersuchte Rheinstrecke liegt bei 5,4 Mio. Schiffskilometern /BMV, 1995b/.

7.3.4.4 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Binnenwasserstraßen

Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen basiert auf der in Kapitel 7.1.3 dargestellten Methodik. Bezogen auf die auf Rhein und Neckar erbrachte Fahrleistung ergeben sich die in Tabelle 7.3-10 dargestellten Werte.

Tabelle 7.3-10: Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen für Bau und Instandhaltung der betrachteten Wasserstraßen pro Schiffskilometer

	KEA	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[MJ/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]	[g/(Fzg*km)]
Rhein	52	4.050	3	1.086	13	14
Neckar	110	8.778	7	2.080	32	31

Der höhere Energieaufwand und die höheren Emissionen für die Schiffbarmachung des Neckars resultieren aus dem höheren Materialeinsatz und wesentlich stärker aus der geringeren Auslastung des Neckars. Die bilanzierten Instandhaltungsaufwendungen tragen beim Rhein zu etwa 1 % und beim Neckar zu etwa 4 % zum kumulierten Energieaufwand und zu den kumulierten CO₂-Emissionen bei. Die Anteile der CO- und NO_x-Emissionen aufgrund der Instandhaltung liegen beim Rhein mit jeweils etwa 5 % und beim Neckar mit 17 % höher.

Fazit: Die Bilanzierung der Binnenwasserwege basiert weitgehend auf einer Quelle. Daher ist es nicht möglich, die Daten hinsichtlich ihrer Qualität zu überprüfen. Andere verfügbare Quellen nennen ausschließlich den Baustoffeinsatz für Kanäle, die sich allerdings aufgrund der künstlichen Erstellung von natürlichen Wasserstraßen unterscheiden.

7.3.5 Umschlaganlagen

7.3.5.1 Technische Grundlagen

Im Rahmen der betrachteten Transportketten wird das Transportgut in der Regel innerhalb oder zwischen den Verkehrsmitteln umgeschlagen. Die Palette der dafür notwendigen Umschlaganlagen reicht von kleineren Güterschuppen bis zu großen Binnenhafenanlagen. Bei der Bilanzierung der Umschlaganlagen ergeben sich mehrere Probleme:

- Informationen zu den baulichen Aufwendungen der betrachteten Umschlaganlagen liegen nur sehr spärlich vor. Teilweise sind die Umschlaganlagen auch noch nicht realisiert, wie z. B. im Falle der GVZ.

- Umschlaganlagen werden vielfältig genutzt. So dient der Speditionshof zum Abstellen und zur Wartung der Lkws, Hafenanlagen beherbergen Lagerhallen und teilweise auch Produktionsbetriebe. Damit stellt sich das Problem der eindeutigen Zuordnung der bilanzierten Aufwendungen.
- Für den Güterumschlag wird eine große Vielfalt an Anlagen und Geräten eingesetzt. Die Ermittlung der zur Bilanzierung notwendigen Daten ist sehr aufwendig.

In Anbetracht des unverhältnismäßig hohen Datenaufwands wird auf die Bilanzierung der konkret verwendeten Umschlaganlagen verzichtet. Um dennoch den Aspekt größenordnungsmäßig zu erfassen, wird auf vorhandene Quellen zurückgegriffen und es werden folgende drei Typen von Umschlaganlagen betrachtet:

- Containerterminal und Umschlaganlage für Massengut,
- Binnenhafen (Umschlag von Wagenladungen und Massengut),
- Umschlaghalle (Umschlag von Stückgütern).

7.3.5.2 Material- und Energieträgereinsatz

Containerterminals und *Umschlaganlagen für Massengut* erfordern relativ große Anlagen. Der Materialeinsatz basiert auf den Angaben in /INFRAS, 1995a/ und wird für die beiden Anlagentypen gleichgesetzt, da jeweils eine große befestigte Fläche sowie Krananlagen benötigt werden.

Der Güterumschlag aus großen Transporteinheiten wie Binnenschiffen erfordert große Anlagen, die mit einem entsprechend hohen Materialaufwand verbunden sind. So benötigen *Binnenhäfen* großräumige Kaianlagen, befestigte Freilagerflächen, überdachte Lagerflächen, Krananlagen sowie Gleis- und Straßenzufahrten. Der auf die umgeschlagene Gütermenge bezogene notwendige Materialeinsatz wird in /Stiller, 1995/ ermittelt. Er bezieht sich auf das Jahr 1992 und stellt einen Durchschnittswert für westdeutsche Binnenhäfen dar.

Für den Umschlag von Stückgütern wird im wesentlichen eine geschlossene *Umschlaghalle* benötigt, wo die umzuschlagenden Güter zwischengelagert werden können. Die Ausstattung der Halle hängt von dem Güteraufkommen ab und reicht von einfachen Güterschuppen bis zu modernen Hochregallagern mit Unterflurförderanlagen. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird vereinfachend nur der durchschnittliche Materialeinsatz für den Bau einer Halle bilanziert. Der Materialeinsatz für den Bau der Halle pro m² Fläche basiert auf den Angaben von /Stiller, 1995/. Für den Umschlag von jährlich 300.000 t benötigt eine Spedition eine Hallenfläche von 10.000 m³ /Steinle, 1993/.

Der auf dieser Datengrundlage ermittelte Material- und Energieträgereinsatz für die Herstellung von Umschlaganlagen ist in Tabelle 7.3-12 dargestellt.

Tabelle 7.3-12: Bilanzierte Materialien und Energieträger für die Bereitstellung der Umschlaganlagen /INFRAS, 1995a, Stiller, 1995/

Aufwendungen	Einheit	Material- und Energieträgerbedarf je umgeschlagener Tonne		
		Containerterminal/	Binnenhafen	Lagerhalle
Zement	[kg/t]		0,15	0,10
Bitumen	[kg/t]	0,02	0,02	
Stahl	[kg/t]	0,01	0,14	0,10
Sand/Kies	[kg/t]	0,69	1,18	0,97
Schotter	[kg/t]		1,50	
Diesel in Baumaschine	[MJ/t]	0,28		
Strom	[MJ/t]	0,05		
Erdgas	[MJ/t]		0,01	
Transport Straße	[tkm/t]	0,01		0,01
Transport Bahn	[tkm/t]		0,11	0,07

7.3.5.3 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen von Umschlaganlagen

Mit Hilfe der jeweiligen Energie- und Emissionsfaktoren wird für die drei Typen von Umschlaganlagen der kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen ermittelt (vgl.Tab.7.3-13). Es zeigen sich insbesondere bei den Emissionen signifikante Unterschiede. Diese sind auf die unterschiedlichen Materialzusammensetzungen der einzelnen Anlagen zurückzuführen.

Tabelle 7.3-13: Kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen der Herstellung von Umschlaganlagen

	KEA	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[MJ/t]	[g/t]	[g/t]	[g/t]	[g/t]	[g/t]
Terminal	2,0	70,6	0,2	0,5	0,5	0,3
Binnenhafen	6,7	472,2	0,2	130,4	1,2	1,7
Umschlaghalle	4,1	321,1	0,1	15,2	0,8	1,2

7.3.6 Zusammenfassende Bemerkungen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird der kumulierte Energieaufwand und die kumulierten Emissionen für konkrete Verkehrswege ermittelt. Dabei werden soweit wie möglich streckenspezifische Daten verwendet. Dennoch muß aufgrund der Vielzahl der betrachteten Strecken und dem damit zusammenhängenden Aufwand für die Ermittlung der konkreten Daten in größerem Umfang auf Durchschnittswerte zurückgegriffen werden. Als Ergebnis der Bilanzierung sei hervorzuheben, daß die einer einzelnen Fahrt zuzuordnenden Aufwendungen je nach

der verwendeten Strecke große Unterschiede aufweisen können. Maßgeblicher Parameter ist hierbei die Streckenbelastung. Dies ist ein weiteres Argument für die in der vorliegenden Studie gewählten Methodik der konkreten Betrachtung von Transportaufgaben.

Die Betrachtung der Umschlaganlagen zeigt, daß dieser Aspekt bei einer vergleichenden Betrachtung verschiedener Güterverkehrssysteme durchaus nicht zu vernachlässigen ist. Hierbei ist noch ein erheblicher Forschungsbedarf bezüglich des Material- und Energieträgereinsatzes vorhanden.

7.4 Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsmittel

7.4.1 Bilanzgrenzen und Methodik

Die im Güterverkehr genutzten Fahrzeuge zeigen systembedingt deutliche Unterschiede in ihrer Größe und in ihrer Materialzusammensetzung. Darüber hinaus werden die Fahrzeuge aufgrund wirtschaftlicher Erwägungen unterschiedlich lange genutzt und erreichen damit deutlich differierende Lebensfahrleistungen. Aufgrund dieser systembedingten Unterschiede ist es daher notwendig, die indirekten Aufwendungen im Zusammenhang mit der Fahrzeugbereitstellung bei einem Vergleich des Primärenergieaufwandes und der Emissionen verschiedener Verkehrssysteme zu berücksichtigen.

Im folgenden wird der kumulierte Energieaufwand der Herstellung (KEA_H) und der Nutzung (KEA_N) sowie die entsprechenden kumulierten Emissionen entsprechend der in Kapitel 0 dargestellten Methodik der im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Lkws, Schienenfahrzeuge und Binnenschiffe untersucht. Dabei werden folgende Bilanzgrenzen gesetzt:

- Das Bezugsjahr der Untersuchung ist 1992.
- Die Herstellung und Nutzung der Fahrzeuge erfolgt in der Bundesrepublik Deutschland.
- Die notwendigen Betriebsmittel für die Herstellung, Nutzung und ggf. die Entsorgung der Fahrzeuge sind nicht Gegenstand der Bilanzierung.

7.4.2 Straßenfahrzeuge

7.4.2.1 Technische Grundlagen

Die Auswahl der Nutzfahrzeuge orientiert sich an den Angaben der befragten Speditionen. Für die Erfüllung der Transportaufgaben werden insgesamt 19 verschiedene Lkws eingesetzt (vgl. Kap. 5.2.2.2), die sich zum Teil nur geringfügig unterscheiden. Die Fahrzeugbandbreite erstreckt sich vom Lieferwagen bis zum Sattelschlepper. Lkws werden in aller Regel modular angeboten. Das heißt, daß ein Fahrgestell mit verschiedenen Aufbauten geliefert werden kann. Der Materialeinsatz für ein Fahrzeug hängt damit vom Fahrzeuggewicht und vom Aufbau ab.

7.4.2.2 Material- und Energieträgereinsatz

In diesem Kapitel wird der Material- und Energieträgereinsatz über die Lebenszyklusphasen der betrachteten Lkws ermittelt. Dabei wird unterschieden in Aufwendungen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Fahrzeuge.

Herstellung der Lkws

Die Ermittlung des Materialeinsatzes für die Herstellung der verschiedenen Lkws erfolgt anhand deren Materialzusammensetzung. Dabei wird auf die Angaben von /Mauch, 1994, Elsener, 1993 und Frischknecht, 1994/ zurückgegriffen und diese entsprechend den verwendeten Aufbauten ggf. mit eigenen Abschätzungen ergänzt. Charakteristisch für Nutzfahrzeuge ist ein Stahl- und Gußeisenanteil in Höhe von 75 % bis 91 % des Fahrzeuggewichts. Bei Lkws mit einem Kipperaufbau oder Sattelzügen liegt der Stahlanteil höher als bei einem Lkw mit Pritsche.

Der spezifische Endenergieeinsatz für die Herstellung von Lkws beträgt nach /Frischknecht, 1994/ 12 MJ/kg Fahrzeugmasse. Dabei verteilt sich der Energieträgereinsatz zu 45 % auf Erdgas, zu 41 % auf Strom und zu jeweils 7 % auf Kohle und auf leichtes Heizöl.

Instandhaltung der Lkws

Der Begriff Instandhaltung umfaßt nach DIN 31051 die Wartung, Inspektion und Instandsetzung von technischen Systemen (vgl. Abbildung 7.3-2). Im Rahmen der vorliegenden Studie werden ausschließlich Wartungsaufwendungen, wie z. B. der Austausch von Verschleißteilen, betrachtet. Instandsetzungsmaßnahmen infolge von Unfällen oder unsachgemäßer Wartung werden nicht berücksichtigt. Die Instandhaltungsaufwendungen hängen stark vom Einsatzzweck

der Fahrzeuge ab. Für die Ermittlung des Material- und Energieträgereinsatzes werden folgende Wartungsarbeiten betrachtet:

- Reifenwechsel,
- Ölwechsel und Lagerabschmieren,
- Öl- und Luftfilterwechsel sowie
- Auswechseln von Verschleißteilen (Bremsklötze, Auspuff, Batterien).

Der Materialeinsatz aufgrund des Reifenverschleißes hängt von dem verwendeten Reifen, dem Fahrzeugeinsatz sowie der Lebenslaufleistung der Reifen ab. Ein typischer Nutzfahrzeugreifen besteht bei einem Gewicht von 27 kg bis zu 65 kg zu 66,4 % aus Gummi und zu 33,6 % aus Stahl /Conti, 1996/. Berücksichtigt wird auch die übliche Verwendung von runderneuertem Reifen auf den hinteren Achsen und dem Anhänger im Nah- und Baustellenverkehr. Die Lebenslaufleistung von runderneuertem Reifen entspricht in etwa der von Neureifen /Michelin, 1996, Lastauto, 1993/. Für die Runderneuerung werden je nach Reifendimension zwischen 5 kg und 15 kg Gummi benötigt /Ihle, 1996/.

Die Angaben zum Materialeinsatz im Zusammenhang mit dem Schmierstoffwechsel sowie dem Austausch von Verschleißteilen sind /Frischknecht, 1994/ und /Elsener, 1993/ entnommen.

Für den Werkstattbetrieb werden Strom sowie leichtes Heizöl benötigt. Bezogen auf den Fahrzeugkilometer beträgt der Stromeinsatz 0,03 MJ/km für Lkws und 0,06 MJ/km für Lieferwagen und der Heizöleinsatz entsprechend 0,11 MJ/km bzw. 0,20 MJ/km /INFRAS, 1995a/.

Entsorgung von Lkws

Die Entsorgung von Lkws erfolgt in mehreren Stufen. Als erstes werden alle ausbaufähigen Bauteile dem zweckgebundenen Recycling zugeführt, wie z. B. Reifen der Runderneuerung oder intakte Motoren der Aufarbeitung (Wiederverwendung von Teilen). Die verbleibenden Teile werden geshreddert und in die einzelnen Fraktionen aufgeteilt. Metalle und einzelne Kunststoffe bleiben in ihrer Werkstoffstruktur erhalten und können in einem Formgebungsprozeß wieder für neue Bauteile verwertet werden. Nicht wieder verwertbare Stoffe werden teilweise weiterverwertet. So können beispielsweise durch Entgasung Gummi- oder Kunststoffbauteile in ihre chemischen Grundsubstanzen zerlegt werden und anschließend weiterverwendet werden. Die zurückbleibenden Materialbestandteile werden entweder der thermischen Verwertung oder einer Deponie zugeführt. In /Mauch, 1994/ werden alle oben beschriebenen Prozesse unter Berücksichtigung der Bilanzgrenzen energetisch bilanziert. Es ergibt sich dabei für die Entsorgung verschiedener Lkws ein Primärenergieaufwand von 2 GJ je Fahrzeug. Dies entspricht einem

Anteil von 0,01 % des gesamten KEA eines Fahrzeugs. Üblicherweise verlassen aber die Nutzfahrzeuge nach Ablauf der wirtschaftlichen Nutzungsdauer Deutschland, werden im Ausland wieder aufgearbeitet und weitergenutzt. Eine Entsorgung im Inland findet nicht statt. Aufgrund des geringen Anteils des KEA der Fahrzeugsentsorgung sowie der nur schwer erfaßbaren Entsorgungsaufwendungen im Ausland wird der Aspekt der Entsorgung im Rahmen der vorliegenden Studie nicht weiter betrachtet.

Auf dieser Basis ergibt sich im Zusammenhang mit der Fahrzeugbereitstellung der in Tabelle 7.4-14 dargestellte Material- und Energieträgereinsatz. Die dargestellten Instandhaltungsaufwendungen sind über die Nutzungsdauer der Fahrzeuge kumuliert. Aufgrund der Vielzahl der betrachteten Lkws sind die Ergebnisse nur für ausgewählte Lkws dargestellt.

Tabelle 7.4-14: Bilanzierte Materialien und Energieträger für die Bereitstellung von Lkws

Lebensphase	Aufwendungen	Einheit	40 t Zug	32 t Solo	Lkw bis 18 t	Lkw bis 7,5	Lieferwagen
Herstellung	Aluminium	[kg]	902	197	567	280	92
	Glas	[kg]	57	75	48	23	49
	Gummi	[kg]	842	1.147	561	277	79
	Holz	[kg]	805	0	232	114	0
	Kunststoff	[kg]	898	803	619	305	131
	Kupfer	[kg]	77	101	64	32	29
	Lacke	[kg]	79	69	66	33	13
	Schmiermittel	[kg]	48	49	40	20	0
	Eisen/Stahl	[kg]	11.294	9.759	6.603	3.257	1.342
	<i>Summe</i>	<i>[kg]</i>	<i>15.000</i>	<i>12.200</i>	<i>8.800</i>	<i>4.340</i>	<i>1.735</i>
	Strom	[GJ]	81	66	48	23	9
	Erdgas	[GJ]	74	60	43	21	9
	Heizöl leicht	[GJ]	13	10	7	4	1
	Kohle	[GJ]	13	10	7	4	1
Instandhaltung	Gummi	[kg]	2.153	2.303	749	315	117
	Kunststoff	[kg]	34	20	18	4	3
	Papier	[kg]	63	38	34	14	4
	Schmiermittel	[kg]	2.143	926	779	246	87
	Stahl	[kg]	1.193	1.181	593	158	144
	Strom	[GJ]	29	18	16	10	13
	Heizöl leicht	[GJ]	105	63	57	34	47

7.4.2.3 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen der Straßenfahrzeuge

Gemäß der in Kapitel 0 dargestellten Methodik und dem in Kapitel 7.4.2.2 dargestellten Material- und Energieträgereinsatz werden der kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen bei der Herstellung und Instandhaltung der Lkws berechnet. Zur Ermittlung der

fahrleistungsspezifischen Werte werden die absoluten Energie- und Emissionswerte anschließend auf die Lebensfahrleistung der einzelnen Fahrzeuge bezogen. Tabelle 7.4-15 zeigt die ermittelten Werte sowie die zugrundegelegten Lebensfahrleistungen. Der Energieaufwand und die CO₂-Emissionen verteilen sich im Schnitt bei den Lkws in etwa zu 70 % auf die Fahrzeugherstellung und zu 30 % auf die Instandhaltung. Der Anteil der übrigen Emissionen im Zusammenhang mit Instandhaltungsmaßnahmen liegt zwischen 10 % und 20 % der Gesamtemissionen. Bei den Lieferwagen liegt der Anteil des Energieaufwandes und der CO₂-Emissionen aufgrund der Herstellung bei etwa 55 % und aufgrund der Instandhaltung bei etwa 45 %.

Tabelle 7.4-15: Lebensfahrleistung, kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen für ausgewählter Lkws

	Lebensfahrleistung	KEA	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[km]	[MJ/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
MB 2435 40 t Zug Pritsche	1.000.000	1,6	82,0	0,1	0,6	0,2	0,4
MB 2334 32 t Solo Kipper	600.000	2,0	114,0	0,1	0,8	0,2	0,6
MAN 18 262 Solo Lkw 18 t Pritsche	540.000	1,7	89,5	0,1	0,6	0,2	0,4
MB 813 Solo Lkw 7,5 t Pritsche	325.000	1,3	74,1	0,0	0,5	0,1	0,3
MB 210 Lieferwagen	235.000	1,1	64,1	0,0	0,3	0,1	0,2

Es zeigt sich, daß die Lebensfahrleistung der entscheidende Parameter für die Höhe der indirekten Aufwendungen im Zusammenhang mit der Fahrzeugbereitstellung darstellt. Die Lebensfahrleistung kann je nach Einsatzzweck für ein Fahrzeug unterschiedlich hoch sein. Dies bedeutet, daß bei der Betrachtung konkreter Fahrzeuge erhebliche Abweichungen gegenüber Durchschnittswerten auftreten können.

7.4.3 Schienenfahrzeuge

7.4.3.1 Technische Grundlagen

Für die Erfüllung der im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten Transportaufgaben, werden insgesamt 27 Züge betrachtet. Diese setzen sich wiederum aus 5 Lokomotiven, 7 Güterwagen und einem Gütertriebwagen zusammen. Die verwendeten Schienenfahrzeuge und deren technische Daten sind in Kapitel 5.3.2.2 dargestellt.

7.4.3.2 Material- und Energieträgereinsatz

Analog der Vorgehensweise bei den Lkws wird in diesem Kapitel der Material- und Energieträgereinsatz für die Herstellung und Instandhaltung der betrachteten Schienenfahrzeuge ermittelt.

Herstellung von Schienenfahrzeugen

Die Ermittlung der Materialzusammensetzung der einzelnen Schienenfahrzeugtypen basiert zum einen auf der Auswertung von Herstellerangaben /AEG, 1993, ABB, 1996, LHB, 1993/ sowie anderer Studien /INFRAS, 1995a/, die teilweise mit Annahmen und Abschätzungen ergänzt werden mußten. Für die selbstfahrende Transporteinheit liegen bisher nur Konzeptstudien vor. Das Fahrzeug soll sich an Straßennutzfahrzeugkonzepten orientieren. Daher wird die Materialzusammensetzung unter Zugrundelegung der entsprechenden Daten eines 40 t Container-Sattelschleppers abgeschätzt /Mauch, 1994/.

Elektrolokomotiven zeichnen sich durch einen relativ hohen Anteil an Kupfer für die elektrische Einrichtung und an Karbonsäureester für die Trafokühlung auf. Der Aluminiumanteil nimmt bei modernen Lokomotiven aufgrund der Bemühungen zu Leichtbau zu. Bei den betrachteten Diesellokomotiven handelt es sich um dieselhydraulisch angetriebene Maschinen älterer Bauart. Güterwagen bestehen weitestgehend aus Eisen bzw. Stahl. Bei Schiebewandwagen kommt daneben in geringerem Ausmaß Aluminium und Holz für den Fahrzeugaufbau dazu.

Der Energieträgereinsatz für die Herstellung von Lokomotiven beträgt nach /Frischknecht, 1994/ 6,5 MJ Strom und 17,1 MJ leichtes Heizöl je kg Lokomotivgewicht. Dabei ist zu beachten, daß die von Zulieferbetrieben hergestellten Bauteile nicht mitbilanziert werden, so daß nur deren Einbau energetisch verrechnet wird. Der Energieträgereinsatz für die Herstellung von Güterwagen ist in /Frischknecht, 1994/ mit 33 GJ Strom und 46 GJ leichtes Heizöl jeweils pro Wagen angegeben.

Instandhaltung der Schienenfahrzeuge

Schienenfahrzeuge werden turnusgemäß gewartet und bei Bedarf werden Verschleißteile, wie z. B. die Radreifen, Lager, Bremsbeläge und bei Lokomotiven die Zahnräder, oder ggf. die Bürsten der Elektromotoren, ausgetauscht. Analog der Vorgehensweise bei den Lkws werden ausschließlich planmäßige Instandhaltungsarbeiten betrachtet.

Die Ermittlung des Materialeinsatzes im Zusammenhang mit der *Lokomotivinstandhaltung* erfolgt über die durchschnittliche Lebenserwartung der Bauteile einer modernen Elektrolokomotive /ABB, 1995/. Der erhöhte Instandhaltungsaufwand bei älteren Elektrolokomotiven sowie bei Diesellokomotiven wird durch Zuschlagsfaktoren ermittelt. Diese werden über die spezifischen Instandhaltungskosten der Lokomotiven abgeschätzt /Mehltretter, 1986/.

Die *Instandhaltungsmaßnahmen für Güterwagen* umfassen den Austausch der Bremsbeläge und das Abschmieren der Lager. Der sich daraus ergebende Materialeinsatz hängt von der Anzahl der Fahrzeugachsen ab /Frischknecht, 1994/. Nach Angaben der Deutschen Bahn AG muß der Anstrich von Güterwagen über deren Lebensdauer einmal erneuert werden. Je nach Fahrzeug wird dafür zwischen 38 kg und 277 kg Farbe benötigt /INFRAS, 1995, LHB, 1993/.

Der Energieträgereinsatz für die Instandhaltung von Güterwagen über deren Lebensweg entspricht nach /Frischknecht, 1994/ dem Energieaufwand für die Herstellung der Fahrzeuge. Bezogen auf die Lebensfahrleistung von Güterwagen ergibt sich ein Strombedarf von 39 kJ/km und ein Heizölbedarf von 54 kJ/km /Frischknecht, 1994/. Für die Instandhaltung der Lokomotiven liegen keine Angaben vor, daher wird näherungsweise auf die Werte für die Güterwageninstandhaltung zurückgegriffen.

Entsorgung von Schienenfahrzeugen

Schienenfahrzeuge zeichnen sich durch einen sehr hohen Stahl- bzw. Metallanteil aus und können daher in Form von Schrott weiterverwertet werden. Die Demontage von Schienenfahrzeugen ist aufgrund der großen Bauteile und einer modulartigen Bauweise relativ einfach. Der Energieträgerbedarf für die Entsorgung der Fahrzeuge ist daher nochmals geringer als bei den Lkws (vgl. Kap. 7.4.2.2) und wird somit ebenfalls vernachlässigt. Darüber hinaus werden Schienenfahrzeuge nach der Außerdienststellung teilweise an ausländische Bahnverwaltungen verkauft und nach einer Aufarbeitung weiterverwendet.

Auf der dargestellten Datenbasis ergibt sich im Zusammenhang mit der Bereitstellung ausgewählter Schienenfahrzeuge der in Tabelle 7.4-16 dargestellte Material- und Energieträgereinsatz.

Tabelle 7.4-16: Bilanzierte Materialien und Energieträger für die Bereitstellung ausgewählter Schienenfahrzeuge

Lebensphase	Aufwendungen	Einheit	Lokomotiven			Güterwagen		
			BR 120	BR 151	BR 218	Sss-y 715	Tibs 869	Falns 183
<i>Fahrzeug</i>								
Herstellung	Alkydharzlack	[kg]	519	459	646	77	107	277
	Aluminium	[kg]	6.497	5.901	4.728		1.070	
	Brettschichtholz	[kg]	690	927	39		802	
	Glas	[kg]	664	1.074	801			
	Gummi	[kg]	527	495	465	14	7	19
	Karbonsäureester	[kg]	7.805	3.556	0			
	Kunststoffe	[kg]	4.518	5.894	483			
	Kupfer	[kg]	7.717	12.448	474			
	Mineralstoffe	[kg]	405	662	815			
	Sonstige	[kg]	818	1.499	734			
	Eisen/Stahl	[kg]	53.725	84.888	66.775	20.909	13.012	24.704
	<i>Summe Material</i>	<i>[kg]</i>	<i>84.000</i>	<i>118.000</i>	<i>75.960</i>	<i>21.000</i>	<i>15.000</i>	<i>25.000</i>
	Strom	[GJ]	545	766	493	33	33	33
Heizöl	[GJ]	1.435	2.015	1.297	46	46	46	
Instandhaltung	Alkydharzlack	[kg]	1.000	1.278	973	77	107	277
	Gummi	[kg]	114	146	111			
	Kunststoffe	[kg]	1.624	2.075	1.581			
	Öl	[kg]	498	636	485	41	20	41
	Eisen/Stahl	[kg]	33.604	42.929	32.708	6.487	3.358	6.487
	Strom	[GJ]	421	299	228	32	32	32
	Heizöl	[GJ]	587	417	318	44	44	44

7.4.3.3 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen der Schienenfahrzeuge

Gemäß der in Kapitel 0 dargestellten Methodik und dem in Kapitel 7.4.3.2 dargestellten Material- und Energieträgereinsatz werden der kumulierte Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen bei der Herstellung und Instandhaltung der Schienenfahrzeuge berechnet. Zur Ermittlung der fahrleistungsspezifischen Werte werden die absoluten Energie- und Emissionswerte auf die Lebensfahrleistung der einzelnen Fahrzeuge bezogen. Die zugrundegelegten Lebensfahrleistungswerte basieren auf den Angaben von /Mehltretter, 1990/ und /DB, 1993/ (vgl.Tab.7.4-17).

Tabelle 7.4-17: Lebensfahrleistung, kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen ausgewählter Schienenfahrzeuge

		Lebensfahrleistung	KEA	CO₂	CO	Partikel	NO_x	VOC
		[1000 km]	[MJ/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Lokomotiven	BR 120	10.800	0,87	49,2	0,03	0,38	0,09	0,25
	BR 151	7.570	1,83	108,7	0,06	0,77	0,19	0,45
	BR 218	5.840	1,56	97,0	0,06	0,73	0,17	0,44
Güterwagen	Sss-y 715	817	1,84	119,2	0,05	1,44	0,24	0,70
	Tibs 869	817	1,49	85,3	0,06	0,85	0,18	0,46
	Falns 183	817	1,91	123,2	0,05	1,49	0,25	0,84

Die Instandhaltungsmaßnahmen tragen bei den Lokomotiven zwischen 20 % und 30 % zum gesamten kumulierten Energieaufwand bei, bei den Güterwagen liegt der entsprechende Anteil mit durchschnittlich 30 % bis 40 % etwas darüber.

Die Lokomotive der Baureihe 120 wird als Universallokomotive sowohl für die Beförderung von Güter- als auch von Personenzügen eingesetzt. Dadurch werden die Maschinen besser ausgelastet als zum Beispiel die reinrassige Güterzuglokomotive der Baureihe 151 und erreichen damit höhere Lebensfahrleistungen. Dies führt bei der BR 120 zu geringen fahrleistungsspezifischen Energieaufwands- und Emissionswerten.

Für die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen eines Zuges werden die Werte aus Tabelle 7.4-17 entsprechend der Zugkonfiguration addiert.

7.4.4 Binnenschiffe

7.4.4.1 Technische Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden Transporte mit zwei Typen von Binnenschiffen betrachtet. Für den Transport auf dem Rhein wird ein Motorgüterschiff mit einer maximalen Nutzlast von 2.300 t zugrundegelegt, während auf dem Neckar ein Motorgüterschiff der Europa-Klasse mit einer maximalen Zuladung von 1.350 t zum Einsatz kommt.

7.4.4.2 Material- und Energieträgereinsatz

In diesem Kapitel wird der Material- und Energieträgereinsatz für die Herstellung und die Instandhaltung von Binnenschiffen entsprechend der Vorgehensweise bei den Straßen- und Schienenfahrzeugen ermittelt.

Herstellung von Binnenschiffen

Da es sich bei beiden betrachteten Schiffen um Motorgüterschiffe handelt, wird angenommen, daß deren Materialzusammensetzung identisch ist. Binnenschiffe zeichnen sich durch einen hohen Stahl- bzw. Eisenanteil von 96 % aus. Die übrigen Materialien werden hauptsächlich für die elektrische Anlage sowie die Einrichtung der Kabine benötigt. Mit Hilfe der Materialzusammensetzung wird der absolute Materialeinsatz über das Leergewicht der beiden betrachteten Binnenschiffe ermittelt. Das „Europaschiff“ mit einer maximalen Nutzlast von 1.350 t hat ein Leergewicht von ca. 330 t, für das größere Motorgüterschiff mit einer maximalen Zuladung von 2.300 t wird ein Leergewicht von 855 t angesetzt /Bialonski, 1990/.

Da keine Angaben zum Energieträgereinsatz für die Herstellung von Binnenschiffen vorliegen, wird dieser mit Hilfe der energetischen Input-Output-Analyse abgeschätzt (vgl. Kap. 0). Gemäß den Angaben von /Spitzer, 1996/ betragen die Anschaffungskosten des 1.350 t Schiffs etwa 2,5 Mio. DM und des 2.300 t Schiffs etwa 4 Mio. DM. Damit wird der Endenergieeinsatz für die Herstellung der beiden Schiffe errechnet. Die in Tabelle 7.4-18 dargestellten Werte dienen einer ersten Abschätzung des Endenergieeinsatzes. Wünschenswert wäre eine genauere Erfassung des Energieträgereinsatzes der Herstellungsunternehmen. Dies ist allerdings problematisch, da nach Aussage von /MSW, 1996/ Motorgüterschiffe inzwischen ausschließlich im Ausland und damit außerhalb der Bilanzgrenzen produziert werden.

Tabelle 7.4-18: Bilanzierte Materialien und Energieträger für die Bereitstellung von Binnenschiffen

Lebensphase	Aufwendungen	Einheit	Motorgüterschiffe	
			MS 2.300 t	MS 1.350 t
Herstellung	Alkydharzlack	[t]	6	2
	Aluminium	[t]	2	1
	Holzbaustoff Brettschichtholz	[t]	7	3
	Kupfer	[t]	9	3
	Mineralwolle	[t]	4	2
	Sonstige	[t]	4	2
	Eisen/Stahl	[t]	818	315
	Bitumen	[t]	4	1
	Strom	[GJ]	662	414
	Erdgas	[GJ]	721	450
	Heizöl leicht	[GJ]	569	356
Instandhaltung	Alkydharzlack	[t]	13	5
	Aluminium	[t]	1	0
	Holzbaustoff Brettschichtholz	[t]	3	1
	Kupfer	[t]	3	1
	Sonstige	[t]	1	1
	Eisen/Stahl	[t]	277	106
	Bitumen	[t]	1	0
	Strom	[GJ]	223	140
	Erdgas	[GJ]	243	152
	Heizöl leicht	[GJ]	192	120

Instandhaltung von Binnenschiffen

Motorgüterschiffe haben eine sehr hohe Lebensdauer von etwa 65 Jahren. In dieser Zeit legen sie durchschnittlich eine Strecke von 1,35 Mio. km zurück /Stiller, 1995/. Neben kleineren Reparaturen wird ein Binnenschiff durchschnittlich zweimal generalüberholt. Dabei wird in der Regel der Motor ausgetauscht und ggf. der Schiffsboden erneuert. Zudem wird ein neuer Anstrich angebracht. /Stiller, 1995/ verrechnet den Materialeinsatz für eine Generalüberholung mit der Erneuerung von 15 % des Schiffsmaterials, von 50 % der Gummiteile sowie einem komplett neuen Anstrich. Der Materialeinsatz für kleinere Reparaturen ist dabei mitberücksichtigt. Da sich die Arbeiten der Schiffsinstandhaltung nur wenig von denen der Herstellung unterscheiden, wird der Endenergieeinsatz für die Instandhaltungsmaßnahmen je Generalüberholung auf 15 % des Herstellungsaufwandes abgeschätzt.

Entsorgung von Binnenschiffen

Binnenschiffe zeichnen sich durch einen hohen Stahlanteil sowie große, sortenreine Bauteile aus. Die Demontage der Schiffe durch Abwrackunternehmen ist daher relativ einfach und ist mit einem entsprechend geringen Energieaufwand verbunden. Größere Teile der Ausrüstung werden darüber hinaus wiederverwendet. Konkretes Zahlenmaterial liegt hierzu nicht vor, dennoch

dürfte die Vernachlässigung der Entsorgungsaufwendungen aufgrund der oben dargestellten Gründe nur geringe Auswirkungen auf den KEA eines Binnenschiffes haben.

Mit diesen Grundlagen ergibt sich im Zusammenhang mit der Bereitstellung der Binnenschiffe der in Tabelle 7.4-18 dargestellte Material- und Energieträgereinsatz.

7.4.4.3 Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen der Binnenschiffe

Unter Zugrundelegung des in Kapitel 7.4.4.2 dargestellten Material- und Energieträgereinsatzes werden der Primärenergieaufwand sowie die Emissionen ermittelt. Die Zuordnung der Herstellungs- und Instandhaltungsaufwendungen zu einer konkreten Fahrt erfolgt über die Fahrleistung. Gemäß den Angaben von /Stiller, 1995/ beträgt die Lebensfahrleistung 1,35 Mio. km bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 65 Jahren. Es ergeben sich die in Tabelle 7.4-19 dargestellten fahrleistungsspezifischen Energie- und Emissionswerte.

Tabelle 7.4-19: Kumulierter Energieaufwand und kumulierte Emissionen der betrachteten Binnenschiffe

	Lebensfahrleistung	KEA	CO₂	CO	Partikel	NO_x	VOC
	[1000 km]	[MJ/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
MS 1350 t	1.350	14,21	870,54	0,57	12,59	1,80	6,31
MS 2300 t	1.350	34,65	2.130,23	1,43	32,61	4,54	16,03

Etwas mehr als 25 % der gesamten Energieaufwendungen und der Emissionen über den gesamten Lebensweg des Binnenschiffes entstehen im Zusammenhang mit den Instandhaltungsmaßnahmen.

Bezieht man die in Tabelle 7.4-19 dargestellten Werte auf die maximale Nutzlast der Schiffe, so ergibt sich z. B. ein kumulierter Energieaufwand für das Europaschiff in Höhe von 10,5 kJ/(km*t) und für das größere Motorgüterschiff ein entsprechender Wert von 15,1 kJ/(km*t). Bei den Emissionen ergibt sich in etwa dasselbe Verhältnis. Die Durchführung einer Transportaufgabe mit dem kleineren Schiff führt damit bei gleicher Auslastung zu geringeren indirekten umwelt- und klimarelevanten Auswirkungen im Zusammenhang mit der Fahrzeugbereitstellung als mit dem größeren Schiff.

7.4.5 Vergleichende Darstellung des Primärenergieaufwands und der Emissionen verschiedener Verkehrsmittel

Aufgrund der unterschiedlichen Transportkapazitäten der betrachteten Verkehrsmittel hat ein Vergleich der fahrleistungsspezifischen Primärenergie- und Emissionswerte keine Aussagekraft. Bezieht man die Ergebnisse jedoch auf eine bestimmte Transportleistung, so ist eine vergleichende Betrachtung möglich. Dies ist in Tabelle 7.4-20 beispielhaft anhand des Transportes einer 25 t schweren Wagenladung über eine Distanz von 200 km dargestellt. Bei einer angenommenen Auslastung von 100 % für alle Verkehrsmittel sind die umweltrelevanten Effekte im Zusammenhang mit der Fahrzeugbereitstellung für das Binnenschiff am geringsten. Die Höhe der Partikelemissionen wird im wesentlichen durch den Stahleinsatz bestimmt, d. h., daß Bahnfahrzeuge und Binnenschiffe aufgrund ihres hohen Stahlanteiles im Vergleich zu den Lkws relativ höhere Partikelemissionen bedingen. Ein ähnlicher Effekt ist bei den VOC-Emissionen zu erkennen. Dies wird auf die Anstricherneuerung von Bahnfahrzeugen und von Binnenschiffen zurückgeführt, die bei den Lkws in aller Regel aufgrund der kürzeren Lebensdauer entfällt.

Tabelle 7.4-20: Energieaufwand und Emissionen aufgrund der Fahrzeugherstellung und -instandhaltung für den Transport einer 25 t Wagenladung über eine Distanz von 200 km

	Auslastung	KEA	CO ₂	CO	Partikel	NO _x	VOC
	[%]	[MJ]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Lkw 40 t Zug (vgl.Tab.7.4-10)	100%	318	16.403	11	111	30	77
Bahn (vgl.Tab.7.4-13)	100%	269	15.676	9	162	33	85
Binnenschiff 1350 t (vgl.Tab.7.4-15)	100%	53	3.224	2	47	7	23
Binnenschiff 2300 t (vgl.Tab.7.4-15)	100%	75	4.631	3	71	10	35

7.4.6 Zusammenfassende Bemerkungen

Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen für eine große Anzahl an verschiedenen Fahrzeugen macht zahlreiche Abschätzungen und eigene Annahmen notwendig, da es im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich ist, konkretes Zahlenmaterial für alle Lebensphasen der einzelnen Fahrzeuge zu erfassen. Dennoch können mit Hilfe der Ergebnisse der kumulierte Energieaufwand und die kumulierten Emissionen größenordnungsmäßig erfaßt werden und im Vergleich der einzelnen Transportsysteme durchaus aussagekräftige Schlüsse gezogen werden. Aufgrund des hohen Stahlanteils aller betrachteten Güterverkehrsmittel sind der kumulierte Energieaufwand und die kumulierten Emissionen weitestgehend proportional zum Fahrzeugleergewicht. Betrachtet man einen konkreten Transport, werden damit neben der Fahrzeugauslastung die Lebensfahrleistung des Fahrzeugs sowie das Ver-

hältnis der maximalen Nutzlast zum Fahrzeugleergewicht zu den entscheidenden Einflußgrößen für die Höhe der zuzuordnenden Aufwendungen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere im Zusammenhang mit der Herstellung und Instandhaltung von Schienenfahrzeugen und Binnenschiffen. Dagegen ist der Material- und Energieträgereinsatz über die Lebensphasen der Straßennutzfahrzeuge eingehender untersucht. Aufgrund der Tendenz zum Leichtbau der Landverkehrsmittel und der damit einhergehenden rasanten Entwicklung neuer Werkstoffe und Fertigungsmethoden sollte die Ermittlung der umwelt- und klimarelevanten Effekte für jede Fahrzeuggeneration erneut durchgeführt werden.

8 Vorstellung der Ergebnispräsentation

Inhalt dieses Kapitels ist die Erläuterung der Vorgehensweise bei der Datenverarbeitung, der aus den Berechnungen gewonnenen Werte und ihre Weiterverarbeitung zu Ergebnis-Tabellen und Diagrammen.

Die Berechnungen zu den Energieverbräuchen und Emissionen der Transportaufgaben wurden mit den gezeigten Programmen und erläuterten Verfahren durchgeführt, und im Anschluß daran die Ergebnisse in vorbereiteten Standard-Tabellen festgehalten. Auf diesen Tabellen basierend wurden dann die auf einer CD-ROM befindlichen Diagramme erstellt.

Abbildung 8-1 zeigt den Aufbau der Ergebnisverarbeitung.

Um eine effektive Form der Ergebnisaufbereitung zu erreichen war es zunächst notwendig einen Verfahrensablauf zur Zusammenführung aller Berechnungsergebnisse zu definieren. Die Kette der Bearbeitung gestaltete sich dabei folgendermaßen. Das Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover (ISB) berechnete die direkten antriebsbedingten Energieaufwendungen und Emissionen für die schienenseitige Transportaufgaben und übergab die ausgefüllten Ergebnistabellen an das Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart (ISV). Dort wurden die entsprechenden Berechnungen für den Lkw, das Binnenschiff sowie die Umschläge durchgeführt und an den dafür vorgesehenen Stellen in die Ergebnistabellen eingefügt. Danach wurden die Files mit den Ergebnistabellen dem Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER), ebenfalls Universität Stuttgart, geschickt. Dieses Institut zeichnete sich für alle indirekten Energieaufwendungen und Emissionen verantwortlich. Anhand der durch die schienen-, straßen-, binnenschiff- und umschlagsseitigen Berechnungen gemachten Vorgaben hinsichtlich Fahrzeugen, Wegen und Anlagen, ermittelte man den kumulierten Energieaufwand sowie die kumulierten Emissionen. Diese teilen sich in die antriebsbedingten indirekten und die nicht-antriebsbedingten Energieaufwendungen und Emissionen auf. Im Anschluß an diese Berechnungen gingen die Tabellen zurück an das Institut für Straßen- und Verkehrswesen, wo sie gesammelt und zu Diagrammen weiterverarbeitet wurden.

Die Form in der die Ergebnisse dargestellt und weitergeleitet werden sollten war so zu wählen, daß eine Bearbeitung durch alle drei an der Studie beteiligten Institute unabhängig voneinander möglich war. Die gewonnenen Daten wurden in der Form von Ergebnis-Files auf Disketten oder per E-Mail verschickt.

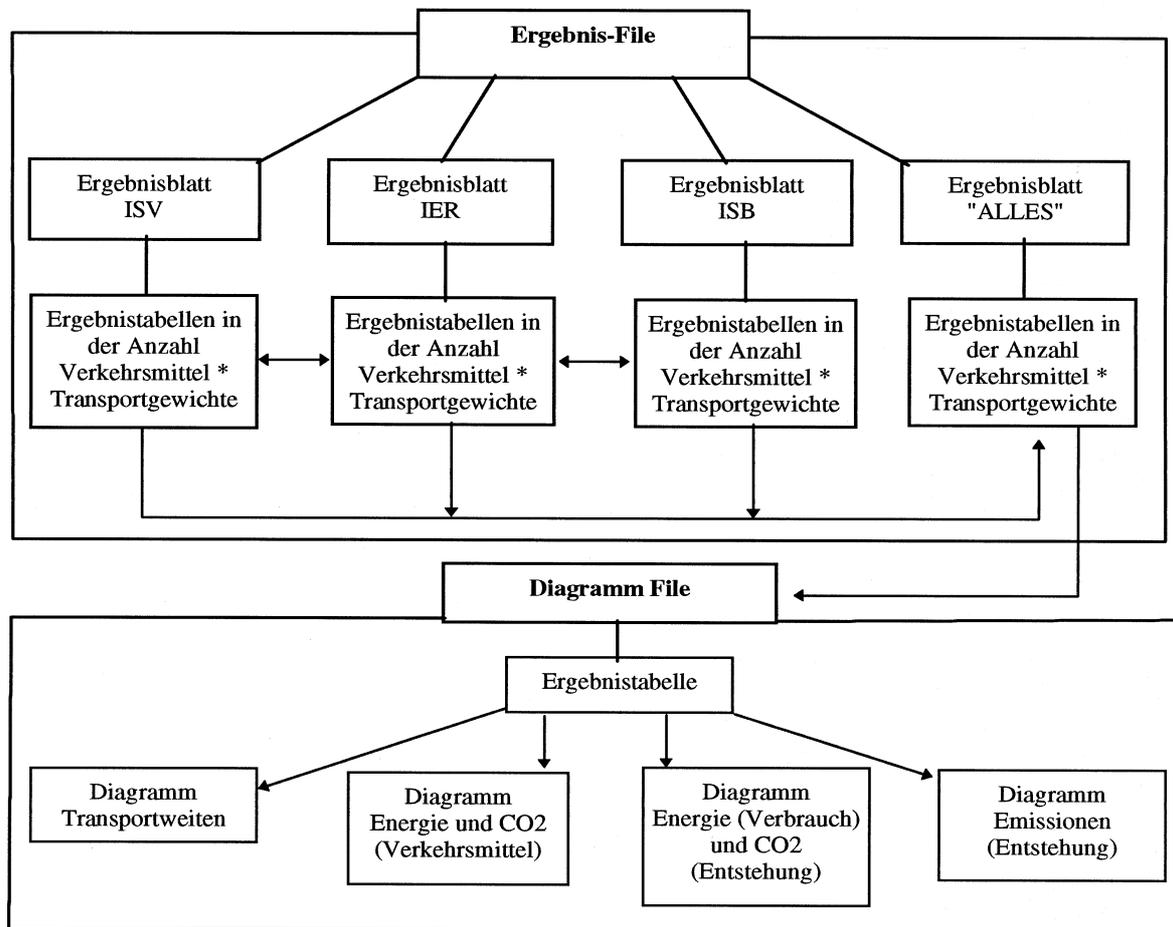


Abbildung 8-1: Ergebnisverarbeitung

Ein Ergebnis-File besteht aus insgesamt 4 einzelnen Ergebnisblättern; je einem Blatt für jedes Institut und ein Blatt "ALLES", in dem die Berechnungen der Institute zusammengeführt werden. Auf jedem Ergebnisblatt befinden sich Ergebnistabellen in der Anzahl wie Verkehrsmittel zur Erfüllung der Transportaufgabe gewählt wurden. Die Anzahl der Tabellen auf jedem Blatt vervielfacht sich bei Wagenladung und Massengut entsprechend der definierten Transportgewichte. Formal sind alle 4 Ergebnisblätter genau gleich aufgebaut und die darauf befindlichen Tabellen sind durch Verweise untereinander verknüpft. Das Blatt "ALLES" erhält alle seine Inhalte vollständig aus den Instituts-Blättern. Intern sind die Instituts-Blätter so gestaltet, daß Berechnungen, wie z. B. die der direkten Emissionen der Bahn bei Dieselbetrieb, direkt in der betreffenden Ergebnistabelle durch Eintragen des Dieselenergiebedarfs in MJ durchgeführt werden. Tabelle 8-1 zeigt den formalen Aufbau einer Ergebnistabelle.

Tabelle 8-1: Aufbau der Ergebnistabelle

Direkt	Direkter Energiebedarf bzw. direkte Emissionen
EM	Emissionen
EV	Energieverbrauch
EB	Energiebereitstellung
AB	Antriebsbedingte Energie
HL	Hauptlauf
NL	Nachlauf
Indirekt	Indirekter Energiebedarf bzw. indirekte Emissionen
TW	Transportweite
VL	Vorlauf
US	Umschlag

Relation											
Transportgut											
Transportkette											
Auslastung											
Sonstiges											
Verkehrsmittel		Straße			Schiene			Schiff		Summe	
Transportglied		VL+NL	HL	US	VL+NL	HL	US	HL	US		
Bearbeiter		ISV	ISV	ISV	ISB	ISB	ISB	ISV	ISV		
TW	Diesel	km	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Strom	km	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe	km	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EV direkt	Diesel	MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Strom	MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe	MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EB	Primärenergie	MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AB		MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Indirekt		MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtenergie		MJ	0								
Emissionen	CO2 direkt	kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO2 EB	kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO2 AB	kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO2 indirekt	kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO2 Summe	kg	0								
	CO direkt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO EB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO AB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO indirekt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO Summe	g	0								
	NOX direkt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NOX EB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NOX AB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NOX indirekt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NOX Summe	g	0								
	VOC direkt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	VOC EB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	VOC AB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	VOC indirekt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	VOC Summe	g	0								
	Staub/Partikel direkt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Staub/Partikel EB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Staub/Partikel AB	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Staub/Partikel indirekt	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Staub/Partikel Summe	g	0								

Für jede Transportaufgabe existiert ein Ergebnis-File. Ein solcher File besteht aus den eben bereits erwähnten 4 Blättern mit der entsprechenden Anzahl von Tabellen darauf. Ein Beispiel: Für die Transportaufgabe Transit-Güterverkehr-Wagenladung von Mannheim nach Ulm stehen laut Tabelle X.Y-Z die Verkehrsmittel

1. Bahn konventionell
2. Bahn Abrollcontainer
3. Lkw
4. Bahn + Binnenschiff und
5. Lkw + Binnenschiff

zur Verfügung. Da bei der Wagenladung die Transportgewichte 0 t, 15 t und 25 t betrachtet werden, hat jedes Blatt des Ergebnis-Files (5 Verkehrsmittel * 3 Transportgewichte) = 15 Tabellen.

Der Name eines Ergebnis-Files repräsentiert die Transportaufgabe. Er besteht aus 7 Zeichen, wobei die Zeichen 1 und 2 für die Planungsaufgabe, Zeichen 3 für das Transportgut, Zeichen 4 und 5 für die Quelle und Zeichen 6 und 7 für das Ziel des Transports stehen. Die Möglichkeit der Verwendung von 8 Zeichen mußte nicht ausgeschöpft werden, was eine Reserve von einem Zeichen für die zusätzliche Markierung der Parametervariationen, Kombinationen der Transportaufgaben und alternativen Berechnungsmethoden ergab. Zum Beispiel ergibt sich der Name der oben erwähnten Transportaufgabe zu:

Planungsaufgabe Transit-Güterverkehr =	T_
Transportgut Wagenladung =	W
Startpunkt Mannheim =	MA
Zielpunkt Ulm =	UL
File-Name =	T_WMAUL

Alle zur Charakterisierung der Ergebnis-Files notwendigen Abkürzungen verzeichnet die Tabelle 8-2.

Tabelle 8-2: Zusammensetzung des File-Namens

1. und 2. Stelle des File-Namens	3. Stelle des File-Namens	4. bis 7. Stelle des File-Namens
Planungsaufgabe	Transportgut	Quelle / Ziel (Planungsaufgabe)
S_ Ballungsraum "Stuttgart"	L leichtes Stückgut (Paket 5 kg)	ES Esslingen-Mettingen (S_) LE Oberaichen (S_)
KA Ballungsraum "Karlsruhe"	W Wagenladung (0 t, 15 t und 25 t)	ET Ettlingen-West (KA) WO Wörth am Rhein (KA) KH Hafen Karlsruhe (KA)
FR Ballungsraum "Oberrhein (Freiburg)"	M Massengut (0 t und 15 t)	LO Lörrach (FR) ST Staufen im Breisgau (FR) HW Hafen Weil am Rhein (FR)
T_ Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg	Bem: Bei den Ballungsräu- en erfolgte keine Berech- nung der Wagenladung	MA Mannheim (T_) UL Ulm (T_) LI Lindau (T_) S_ Stuttgart (T_) SI Singen (T_)
RV ländlich strukturierter Raum "Oberschwaben (Ravensburg)"		GR GVZ Ravensburg (RV) RV Ravensburg (RV) ME Meckenbeuren (RV) PF Pfullendorf (RV)
VS ländlich strukturierter Raum "Schwarzwald (Villingen- Schwenningen)"		GV GVZ VS Villingen (VS) VS Villingen-Schwenningen (VS) DO Donaueschingen (VS) SG St. Georgen (VS)

Aus den fertiggestellten Ergebnis-Files werden mittels des Blatts "ALLES" die Diagramme zur graphischen Darstellung der Ergebnisse erstellt. Für die folgenden Ergebnisse wird ein Diagramm erstellt:

- Transportweiten für jedes Verkehrsmittel
- Energie und CO2 in Abhängigkeit von den Verkehrsmitteln*
- Energie nach Verbrauch und CO2 nach der Entstehung *
- Emissionen nach der Entstehung*

* Bei Wagenladung und Massengut vervielfacht sich die Anzahl dieser Diagramme gemäß der Anzahl von Transportgewichten dieser Güter.

Die graphische Aufbereitung der Ergebnisse erfolgt in der Form von Balkendiagrammen: Dabei ist darauf hinzuweisen, daß bei einer gemeinsamen Darstellung von Energie und CO2 in einem

Diagramm, aufgrund der verschiedenen Einheiten, bei CO₂ der Bezug auf eine sekundäre y-Achse hergestellt wird.

Zusammen mit dem Blatt "ALLES", welches in der graphischen Darstellung den Namen "ERGEBNIS" trägt, werden die Abbildungen in der oben genannten Reihenfolge in einem Diagramm-File unter demselben Namen wie das zugehörige Ergebnis-File abgespeichert.

Diese Files befinden sich zusammen mit denjenigen der Parametervariationen, der Kombinationen der Transportaufgaben und der alternativen Berechnungsmethoden auf der CD-ROM. Die Erläuterungen zu den Parametervariationen, den Kombinationen der Transportaufgaben und den alternativen Berechnungsmethoden sind u. a. Inhalt des Kapitels 9.

Die CD-ROM mit den Ergebnistabellen kann am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart, Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart (e-mail: wacker@isvs.uni-stuttgart.de) kostenlos angefordert werden.

9 Ergebnisse

9.1 Einführung

Wie in Kapitel 4 dargelegt, basieren die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Berechnungen auf einer Vielzahl von Transportaufgaben. Die auf die jeweilige Transportaufgaben bezogenen Ergebnisse im einzelnen zu diskutieren, würde den Rahmen dieses Berichts sprengen. Vielmehr sind diese Einzelergebnisse, wie in Kapitel 8 dargelegt, auf der diesem Bericht beigefügten CD-ROM veröffentlicht. An dieser Stelle kann daher nur eine cursorische Diskussion der Ergebnisse erfolgen.

Bei der Diskussion der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Bezeichnung "Verkehrsmittel" nicht nur das jeweils direkt angesprochene Verkehrsmittel meint, sondern die gesamte für den Transport mit dem erwähnten Verkehrsmittel im Hauptlauf notwendige Transportkette mit gfs. vorhandenen Vor- und Nachläufen. Diese Transportaufgaben sind im einzelnen in Kapitel 4 beschrieben.

Auf eine Diskussion der Staub / Partikel - Emissionen wird verzichtet, da unter dieser Bezeichnung die Emissionen beider Komponenten zusammengefaßt sind. Dabei werden die insbesondere im Dieselmotorbetrieb entstehenden direkten Partikelemissionen mengenmäßig überlagert von den bei der Herstellung und Instandhaltung der Verkehrswege entstehenden Staubemissionen. Eine sinnvolle vergleichende Diskussion ist daher nicht möglich. Bei Interesse können für die einzelnen Transportaufgaben die Staub / Partikel -Emissionen auf der CD-ROM eingesehen werden.

Die nachfolgende Ergebnisdiskussion erfolgt angesichts der Fülle der Einzelergebnisse stets als eine vergleichende Diskussion auf der Basis der Verhältniszahlen der zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel zu diesem. Dabei wird der reine Lkw-Transport stets mit 100 % angesetzt. Die absoluten Einzelergebnisse können von der CD-ROM abgerufen werden.

9.2 Güterverkehr in Ballungsgebieten

9.2.1 Leichtes Stückgut

Zunächst fällt auf, dass die einzelnen Verkehrsmittel innerhalb der einzelnen Transportaufgaben sehr unterschiedliche Transportweiten aufweisen. Dies spiegelt letztlich die dort untersuchten Logistikkonzepte wider. Auffallend ist, dass für den Beispielraum "Stuttgart" die alternativ zum heute üblichen Lkw-Transport (Umschlag bei einer Spedition am Rande des Ballungsraums) untersuchten Transporte über Güterverkehrszentren, die im Ballungsraum selbst liegen, zu einer deutlichen Verringerung der Transportentfernungen führen (Lkw über GVZ: -46 %, Bahn über GVZ: -51 %). Umgekehrt weisen diese Alternativen im Beispielraum "Karlsruhe" deutlich längere Transportentfernungen auf (Lkw über GVZ und Bahn über GVZ: +173 % (Ettlingen-West - Wörth am Rhein) bzw. +164 % (Wörth am Rhein - Ettlingen-West)), da hier durch die Einbindung der Güterverkehrszentren gegenüber dem reinen Transport über die (zufällig) ausgewählte Spedition längere Fahrtstrecken entstehen. Im polyzentrischen Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" sind diese Unterschiede wesentlich geringer. Hier führt die Führung der Güterströme über die Güterverkehrszentren zu um 11 % (Lkw) und 6 % (Bahn) längeren Transportweiten.

Die im Grundsatz gleiche Reihung findet man bei Betrachtung der Wirkungskomponenten Energie und Emissionen, wenngleich - mit Ausnahme der Staub / Partikel - Emissionen nicht mehr in der großen Spannweite wie bei den Transportweiten. Die durch die deutliche Verminderung der Transportweiten zu erwartende Verbesserung der umweltrelevanten Wirkungen im Beispielraum "Stuttgart" findet sich insgesamt sogar noch deutlich verstärkt, da bei allen Wirkungskomponenten mit Ausnahme Staub / Partikel die Werte nur noch 5 - 10 % der Ausgangswerte betragen. Diese deutliche Verstärkung der Effekte wird insbesondere durch eine verbesserte Auslastung durch die Bündelung von Transporten über die Güterverteilzentren erreicht.

In den Beispielräumen "Karlsruhe" und "Oberrhein (Freiburg)" erhöhen sich bei den Lkw-Transporten über die Güterverkehrszentren die jeweiligen auf den Transport eines 5 kg schweren "leichten Stückguts" bezogenen Energieaufwendungen um ca. 5 (Oberrhein (Freiburg)) und ca. 20 % (Karlsruhe). Hier wirken sich die erhöhten Transportweiten aus. Im Beispielraum "Karlsruhe" weisen auch die Bahntransporte um ca. 10 % erhöhte Energieaufwendungen auf, während im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" diese um ca. 10 - 15 % niedriger liegen als beim konventionellen Lkw.

Die CO₂-Emissionen liegen mit Ausnahme des Beispielraums "Stuttgart" für die verschiedenen Verkehrsmittel nahezu in der gleichen Größenordnung, wobei sie für die Bahn bis u 20 % geringer sind als für den Lkw. Die Unterschiede in der Reihung gegenüber dem Energieaufwand resultieren aus dem jeweils erforderlichen Umschlag und der damit verbundenen anderen Energiebereitstellung.

Die CO-Emissionen sind im Beispielraum "Karlsruhe" für den Lkw-Transport über die Güterverkehrszentren und den konventionellen Bahntransport um jeweils 20 % und für den Bahntransport mit dem automatischen Einzelwagen um 27 % niedriger als für den konventionellen Lkw-Transport. Im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" stellen sich diese Ergebnisse etwas anders dar. Hier ist der Lkw-Transport über die Güterverkehrszentren nur um 5 %, der konventionelle Bahntransport dagegen um 24 % und der automatische Einzelwagen nur um knapp 10 % günstiger als der konventionelle Lkw-Transport.

Bei den NO_x-Emissionen gibt es im Beispielraum "Karlsruhe" nur sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsmitteln, wobei der Lkw-Transport über die Güterverkehrszentren geringfügig höhere und die Bahntransporte geringfügig geringere Emissionen aufweisen. Auch im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" weist der Lkw-Transport über das Güterverkehrszentrum geringfügig höhere Emissionen auf, während der konventionelle Bahntransport ca. 30 % und der automatische Einzelwagen ca. 10 % geringere Emissionen verursacht.

Die VOC-Emissionen liegen in den Beispielräumen "Karlsruhe" und "Oberrhein (Freiburg)" leicht für den Lkw-Transport über die Güterverkehrszentren und die Bahntransporte leicht über den Emissionen des klassischen Lkw-Transports (Ausnahme: automatischer Einzelwagen im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)").

Die Berücksichtigung der indirekten Effekte führte in keinem Fall zu einer nennenswerten Beeinflussung der Ergebnisse.

Die Untersuchungen im Beispielraum "Ulm" bezogen sich auf den Vergleich unterschiedlicher Logistikkonzepte zur Güterverteilung in Ulm. Dabei stützten sich alle vier untersuchten Konzepte ausschließlich auf den Lkw ab. Da es ferner bei allen Konzepten zu nur einem zentralen Güterumschlag kam, waren auch aufgrund dieser Einflußgröße keine Unterschiede zu erwarten. Unterschiedliche Ergebnisse können daher nur aus aufgrund der verschiedenen Logistikkonzepten unterschiedlichen Auslastungen der Lkw und aus den unterschiedlichen Transportweiten resultieren. Wie die Ergebnisse zeigen, dominiert dabei der Einfluß der Transportweite, da alle Wirkungskomponenten die gleiche Reihung für die vier Logistikkonzepte ergeben, wie sie sich aus der Betrachtung der Transportweite ergibt. Die jeweils ungünstigsten Werte liefert die unkoordinierte Güterverteilung über die einzelnen Speditionen. Die drei untersuchten Logistikkonzepte liefern alle deutlich bessere Werte und für alle Wirkungskomponenten sind die Unter-

schiede zwischen diesen drei Logistikkonzepten geringer als die Differenz zur unkoordinierten Auslieferung. Die günstigsten Werte liefert dabei das Logistikkonzept mit einem Güterverkehrszentrum am Güterbahnhof, gefolgt von dem in Ulm bereits erprobten City-Logistik-Konzept CLOU. Das Logistikkonzept mit einem Güterverkehrszentrum Ulm-West an der Autobahnausfahrt Ulm-West liefert die schlechtesten Ergebnisse der drei Logistikkonzepte.

9.2.2 Massengut

Die Transportweiten erhöhen sich gegenüber dem reinen Transport mit dem Lkw beim konventionellen Bahntransport um 5 (Beispielraum "Karlsruhe") bzw. 10 % (Beispielräume "Stuttgart" und "Oberrhein (Freiburg)") und beim kombinierten Transport Bahn / Lkw mit dem Abrollcontainer um ca. 30 % (Beispielräume "Stuttgart" und "Karlsruhe") bzw. 84 % (Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)").

Ein hiervon abweichendes und auch für die Beispielräume unterschiedliches Bild ergibt sich bei Betrachtung des notwendigen Energieaufwands. Im Beispielraum "Stuttgart" benötigt im beladenen Zustand der konventionelle Bahntransport 17 % beladen mehr Energie als der reine Lkw-Transport, leer benötigt er 56 % weniger. Der kombinierte Transport mit dem Abrollcontainer benötigt beladen 66 % mehr und unbeladen 23 % mehr. Die Unterschiede zwischen beladen und unbeladen können hier auch aus der Transportrichtung resultieren, da die unbeladenen Transporte bei der Bahn zu großen Anteilen im Gefälle und nahezu ohne verlorene Steigung stattfinden. Allerdings weisen auch in den anderen Beispielräumen die leeren Transporte mit der Bahn (konventionell) oder kombiniert mit dem Abrollcontainer relativ günstigere Werte im Vergleich zum reinen Lkw-Transport auf als im beladenen Zustand. Dies kann auch an einem günstigeren Verhältnis von Nutzlast zu Fahrzeugeigengewicht liegen. In den beiden Beispielräumen "Karlsruhe" und "Oberrhein (Freiburg)" weist der konventionelle Bahntransport jeweils günstigere Werte auf als der reine Transport mit dem Lkw (beladen: ca. - 50 %, leer: ca. - 30 %), während der kombinierte Transport mit dem Abrollcontainer deutlich höhere Werte aufweist (Karlsruhe: beladen: +127 %, leer: + 100 %; Oberrhein (Freiburg): beladen: + 50 %, leer: + 40 %).

Die CO₂-Emissionen spiegeln mit einer Ausnahme näherungsweise die gleichen Verhältnisse wider wie die Energieaufwendungen. Die Ausnahme bilden die CO₂-Emissionen des beladenen konventionellen Bahntransports im Beispielraum "Stuttgart", die nunmehr um 3 % unter denen des reinen Lkw-Transports liegen, während der Energieaufwand 17 % höher war. Hier zeigt sich der Einsatz des Stroms als Energieträger, der für diese relativ günstigeren CO₂-Emissionen verantwortlich ist.

Die CO-Emissionen sind im konventionellen Bahntransport in den Beispielräumen "Stuttgart" und "Karlsruhe" sowohl beladen als auch unbeladen jeweils um ca. 90% geringer als beim reinen Lkw-Transport, während sie im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" beladen um 16% höher, unbeladen allerdings um 44% geringer sind. Dieser Unterschied ist dadurch begründet, dass in den Beispielräumen "Stuttgart" und "Karlsruhe" Elektrolokomotiven zum Einsatz kommen, während für den Massenguttransport im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" Diesellokomotiven zum Einsatz kommen. Zusätzlich wird dieser Effekt von den Höhenunterschieden in den jeweiligen Transportrichtungen überlagert. Die CO-Emissionen für den Transport mit dem Abrollcontainer liegen im Beispielraum "Stuttgart" sowohl beladen (- 28% als auch unbeladen (- 11%)) unter denen des reinen Lkw-Transports. Im Beispielraum "Karlsruhe" liegen die CO-Emissionen für den Transport mit dem Abrollcontainer sowohl beladen als auch unbeladen um deutlich mehr als 100% höher als beim reinen Lkw-Transport, im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" beladen um 31%, leer um 9%.

Die NO_x-Emissionen liegen in allen Beispielräumen für den konventionellen Bahntransport sowohl beladen als auch unbeladen deutlich unter denen des reinen Lkw-Transports (Stuttgart: beladen: - 82%, leer: - 90%; Karlsruhe: beladen: - 88%, leer: - 92%; Oberrhein (Freiburg): beladen: - 14%, leer: - 49%). Der kombinierte Transport mit dem Abrollcontainer führt im Beispielraum "Stuttgart" beladen zu 20% und leer zu 30% geringeren NO_x-Emissionen und im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" beladen zu 14% und leer zu 20% geringeren NO_x-Emissionen. Abweichend hiervon steigen die NO_x-Emissionen beim Transport mit dem Abrollcontainer im Beispielraum "Karlsruhe" beladen um 63% und unbeladen um 53% an.

Die VOC-Emissionen steigen bis auf eine Ausnahme bei allen beladenen Transporten deutlich gegenüber dem reinen Lkw-Transport an. Für den Transport mit dem Abrollcontainer liegen die Werte zwischen + 153% für den Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" und + 262% für den Beispielraum "Stuttgart", während sie für den konventionellen Bahntransport im Beispielraum "Stuttgart" + 167% und im Beispielraum "Karlsruhe" + 15% betragen. Die Ausnahme bildet der konventionelle Bahntransport im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)": Hier betragen die VOC-Emissionen 14% weniger als beim reinen Lkw-Transport. Bei den unbeladenen Transporten liegt der konventionelle Bahntransport immer günstiger als der reine Lkw-Transport (Stuttgart: - 22%, Karlsruhe: - 35%, Oberrhein (Freiburg): - 48%), während der kombinierte Transport mit dem Abrollcontainer höhere Werte aufweist (Stuttgart: + 85%, Karlsruhe: + 205%, Oberrhein (Freiburg): + 112%). Auch die VOC-Emissionen spiegeln deutlich den bei den einzelnen Verkehrsmitteln unterschiedlichen Anteil von Strom als Energieträger wider.

Bei den Massenguttransporten in den Planungsaufgaben "Güterverkehr in Ballungsräumen" erlangen über alle Wirkungsgrößen die indirekten Aufwendungen eine besondere Bedeutung, da

diese relativ gegenüber dem reinen Lkw-Transport stets stärker ansteigen als die antriebsbedingten Aufwendungen.

9.3 Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg

9.3.1 Leichtes Stückgut

Die Transportweiten für die beiden untersuchten Verkehrsmittel Lkw und Bahn (konventionell) unterschieden sich insgesamt nur gering. Fast keine Unterschiede sind auf den Relationen Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim (Bahn: + 1 %) und Mannheim - Weil am Rhein/ Weil am Rhein - Mannheim (Bahn: - 2 %) festzustellen. Auf der Relation Ulm - Lindau / Lindau - Ulm ist die Transportweite der Bahn 13 % und auf der Relation Stuttgart - Singen / Singen - Stuttgart 27 % größer.

Hinsichtlich des notwendigen Energieaufwands weist die Bahn stets günstigere Werte auf als der Lkw. Die Spanne reicht dabei von 30 % (Ulm - Mannheim) bis zu 70 % (Stuttgart - Singen) des Werts des Lkw. Die Unterschiede sind bedingt durch die unterschiedlichen Transportentfernungen, unterschiedliche verlorene Steigungen, welche beim Lkw wesentlich höher sind als bei der Bahn, und die unterschiedlichen indirekten Aufwendungen. Diese sind in Abhängigkeit von der Streckenauslastung bei der Bahn teilweise geringer und teilweise höher als beim Lkw. Stets sind die relativen Vorteile der Bahn bei den indirekten Aufwendungen aber geringer als beim antriebsbedingten Energieeinsatz.

Dieselbe Aussage wie für den notwendigen Energieaufwand gilt für die CO₂-Emissionen. Hier reicht die Spanne der Werte der Bahn von 22 % (Weil am Rhein - Mannheim) bis 50 % (Lindau - Ulm und Stuttgart - Singen) der jeweilig korrespondierenden Werte des Lkw.

Ein etwas anderes Bild bietet sich bei Betrachtung der CO-Emissionen. Hier zeigt die Bahn auf drei Transitrouten deutlich günstigere Werte als der Lkw mit einer Spanne von 4 % (Ulm - Mannheim, Mannheim - Weil am Rhein und Weil am Rhein - Mannheim) bis zu 12 % (Stuttgart - Singen) der jeweils entsprechenden Lkw-Werte. Auf den mit Diesellokomotiven betriebenen Relationen Ulm - Lindau (100 %) und Lindau - Ulm (109 %) erreicht die Bahn aber den entsprechenden Wert des Lkw bzw. übersteigt diesen sogar.

Auch bei den NO_x-Emissionen ist der Einfluß des Dieselbetriebs deutlich ablesbar. Wiederum liegt die Bahn auf drei der vier Transitrouten deutlich bessere Werte als der Lkw. Die Spanne reicht von 4 % (Ulm - Mannheim) bis zu 13 % (Stuttgart - Singen) der jeweiligen Werte des

Lkw. Höhere Werte sind wiederum auf den Relationen Ulm - Lindau (77 %) und Lindau - Ulm (83 %) zu beobachten, die aber dennoch unter den Werten des Lkw liegen.

Bei den VOC-Emissionen ist nun zusätzlich der Einfluß der Strombereitstellung abzulesen. Hier liegt die Bahn zwar in der Mehrzahl der Relationen günstiger als der Lkw, wobei die Spanne nunmehr von 59 % (Weil am Rhein - Mannheim) bis zu 82 % (Mannheim - Ulm) reicht. Auf drei Relationen hat die Bahn höhere Werte als der Lkw (Lindau - Ulm: 101 %, Singen - Stuttgart: 123 %, Stuttgart - Singen: 143 %).

Interessant ist die Betrachtung der indirekten Aufwendungen. Hier läßt sich über alle Wirkungskomponenten deutlich der Einfluß der Streckenauslastung ablesen. Während diese indirekten Aufwendungen auf den Relationen Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim und Mannheim - Weil am Rhein / Weil am Rhein - Mannheim jeweils in der Größenordnung von 50 bis 70 % der Aufwendungen für den Lkw betragen, liegt dieser Wert für die schwächer ausgelasteten Strecken im Bereich 120 bis 210 %.

9.3.2 Wagenladung

Für das Transportgut "Wagenladung" werden zunächst die selben Relationen untersucht wie für das Transportgut "Stückgut". Dabei sind im Vergleich zwischen Lkw und Bahn die gleichen Transportweiten zu berücksichtigen. Neu hinzu kommen Transporte mit dem Binnenschiff. Auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein / Weil am Rhein - Mannheim beträgt die Transportweite mit dem Binnenschiff 1 % mehr als diejenige des Lkw. Damit haben auf dieser Relation alle drei Verkehrsmittel (Lkw: 100 %, Bahn: 98 %, Binnenschiff: 101 %) nahezu die gleiche Transportweite. Auf der Relation Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim wird das Binnenschiff zwischen Mannheim und Plochingen eingesetzt. In Plochingen wird dann auf den Lkw oder die Bahn umgeschlagen. Die Transportweite im gebrochenen Verkehr Binnenschiff und Bahn beträgt 126 % , diejenige im gebrochenen Verkehr Binnenschiff und Lkw 127 % der Transportweite des Lkw. Damit sind im gebrochenen Verkehr die Transportweiten nahezu identisch, aber deutlich höher als bei Lkw (100 %) und Bahn (101 %).

Bei Auswertung des notwendigen Energieaufwands zeigt sich zunächst bei Betrachtung der Wagenladung 0 t (Leerfahrt), dass die Bahn in allen untersuchten Formen (konventionell, Container, Trailerzug) gegenüber dem Lkw günstigere Werte aufweist. Dabei lassen sich allerdings zwei Gruppen feststellen. Deutlich günstigere Werte erreicht die Bahn auf den Relationen Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim und Mannheim - Weil am Rhein / Weil am Rhein - Mannheim. Hier liegen die Werte in einer Spanne von 27 % (Weil am Rhein - Mannheim, Container) bis zu 47 % (Mannheim - Ulm, Trailerzug) der korrespondierenden Werte des Lkw.

Auf den anderen beiden Relationen Ulm - Lindau / Lindau - Ulm und Stuttgart - Singen / Singen - Stuttgart liegen die Werte im Bereich von 52 % (Ulm - Lindau, Container) bis zu 83 % (Stuttgart - Singen, Trailerzug) der entsprechenden Werte des Lkw. Innerhalb der Bahntransporte läßt sich generell die Reihung feststellen, dass der Container-Transport die günstigsten Werte liefert. Dann folgt der konventionelle Bahntransport, während der Trailerzug die ungünstigsten Werte liefert, die aber immer noch mehr oder weniger deutlich günstiger sind als diejenigen des Lkw. Einzigste Ausnahme von dieser Reihung bildet die Relation Lindau - Ulm. Hier liegt die Wagenladung (58 %) relativ zum Lkw um einen Prozentpunkt günstiger als der Container (59 %). Der reine Binnenschifftransport erreicht auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein 21 % und in der Gegenrichtung (Weil am Rhein - Mannheim) 16 % der Werte des Lkw. Damit ist das Binnenschiff auf dieser Relation energetisch betrachtet bei Leerfahrt das günstigste Verkehrsmittel. Deutlich ist der Einfluß der Berg- und Talfahrt abzulesen. Die Talfahrt benötigt nur rund drei Viertel der Energie der Bergfahrt. Der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Bahn auf der Relation Mannheim - Ulm (41 %) / Ulm - Mannheim (34 %) liegt in der Größenordnung des konventionellen Bahntransportes. Hier ist der Einfluß der Berg- und Talfahrt noch ablesbar. Der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Lkw erreicht 62 % (Mannheim - Ulm) und 63 % (Ulm - Mannheim) der entsprechenden Werte des reinen Lkw-Transportes. Aufgrund des Streckenanteils des Lkw mit verlorenen Steigungen ist der Einfluß der Berg- und Talfahrt nunmehr nicht mehr ablesbar. Bemerkenswert ist, dass Bahn und Binnenschiff günstigere Relativwerte gegenüber dem jeweiligen Lkw-Transport erreichen würden, wenn nur die antriebsbedingten Aufwendungen betrachtet würden. Die Einbindung der indirekten Aufwendungen bewirkt eine relative Verschlechterung.

Beim Übergang zur Wagenladung mit 15 t Gewicht zeigt sich nun ein interessanter Effekt beim Bahntransport. Der Vorteil des Bahntransportes gegenüber dem Lkw schmilzt. Nach wie vor sind die beiden Gruppen von Relationen erkennbar. Günstigere Werte im Vergleich zum Transport mit dem Lkw werden wiederum auf den Relationen Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim und Mannheim - Weil am Rhein / Weil am Rhein - Mannheim erreicht, wobei die Spanne von 45 % (Ulm - Mannheim, Container) bis 65 % (Mannheim - Ulm, Trailerzug) reicht. Auf den anderen beiden Relationen Ulm - Lindau / Lindau - Ulm und Stuttgart - Singen / Singen - Stuttgart sind die Werte für den Bahntransport nun teilweise schon um bis zu 20 % höher als beim jeweils entsprechenden Lkw-Transport. Die Spanne der Werte im Vergleich zum Lkw reicht von 86 % (Ulm - Lindau, Bahn konventionell) bis zu 119 % (Stuttgart - Singen, Trailerzug). Auch die interne Reihung innerhalb der diversen Varianten des Bahntransportes ändert sich. Hier haben nunmehr Bahn Container und Bahn konventionell annähernd gleiche Werte. Die Unterschiede betragen nur noch bis zu maximal vier Prozentpunkte bezogen auf den jeweiligen Vergleichswert des Lkw, wobei in Abhängigkeit von der Relation beide Verkehrsmittel günstigere Werte aufweisen können. Eine Ausnahme bildet die Relation Lindau - Ulm. Hier ist die konventionelle

Bahn mit 89 % des entsprechenden Wertes des Lkw bereits deutlich günstiger als der Container (101 %). Auch beim Binnenschiff schmilzt der Vorsprung gegenüber dem Lkw. Auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein (62 %) / Weil am Rhein - Mannheim (46 %) ist das Binnenschiff aber immer noch deutlich günstiger als der Lkw. Beim gebrochenen Verkehr Binnenschiff und Bahn auf der Relation Mannheim - Ulm (94 %) / Ulm - Mannheim (78 %) ist die Einbindung des Binnenschiffs zwar noch günstiger als der Transport mit dem Lkw, für den gebrochenen Verkehr Binnenschiff und Lkw trifft dies aber nicht mehr zu (Mannheim-Ulm: 112 %, Ulm - Mannheim: 102 %). Hier wäre es nun bereits günstiger, durchgehend mit dem Lkw zu fahren. Bahn und Binnenschiff hätten durchgängig deutlich günstigere Werte, wenn nur die antriebsbedingten Effekte betrachtet würden. Lediglich im gebrochenen Verkehr Binnenschiff und Lkw auf der bergaufwärts führenden Relation Mannheim - Ulm wäre diese Kombination um 1 % ungünstiger als die reine Fahrt mit dem Lkw.

Die angesprochenen Trends setzen sich beim Übergang zur Wagenladung mit 25 t Gewicht fort. Auf den Relationen Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim und Mannheim - Weil am Rhein / Weil am Rhein - Mannheim erreicht die Bahn nun auf den reinen Lkw-Transport bezogene Werte von 51 % (Ulm - Mannheim, Container) bis zu 72 % (Mannheim - Ulm und Mannheim - Weil am Rhein, jeweils Trailerzug). Auf den Relationen Ulm - Lindau / Lindau - Ulm und Stuttgart - Singen / Singen - Stuttgart hat die Bahn nun durchweg höhere Werte als der jeweils vergleichbare Transport mit dem Lkw. Eine Ausnahme bildet der konventionelle Bahntransport auf der Relation Ulm - Lindau, der denselben Energieaufwand aufweist wie der Lkw. Der höchste Energieaufwand ist zu verzeichnen mit dem Trailerzug auf der Relation Stuttgart - Singen (135 %). Bei der Reihenfolge innerhalb der drei Alternativen des Bahntransports bleiben der konventionelle Bahntransport und der Bahntransport mit dem Container gleichauf die günstigsten Varianten. Der Unterschied beträgt bezogen auf die jeweilige Vergleichsfahrt mit dem Lkw maximal vier Prozentpunkte, wobei nunmehr der konventionelle Bahntransport stets günstiger ist als der Bahntransport mit dem Container. Auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein (83 %) / Weil am Rhein - Mannheim (62 %) bleibt das Binnenschiff günstiger zwar als der Lkw, ist nun aber ungünstiger als der Bahntransport. Im gebrochenen Verkehr mit dem Binnenschiff auf der Relation Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim ist nur noch der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Bahn in der bergab führenden Relation Ulm - Mannheim günstiger als der jeweils vergleichbare Lkw. Der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Bahn in der Relation Mannheim - Ulm erreicht 116 %, der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Lkw 131 % auf der Relation Mannheim - Ulm und 118 % in der Gegenrichtung. Auch bei der Wagenladung mit 25 t Gewicht wäre die Bahn das durchgängig günstigste Verkehrsmittel, wenn nur die antriebsbedingten Effekte betrachtet würden. Das Binnenschiff wäre allerdings auch bei ausschließlicher Betrachtung nur der antriebsbedingten Effekte im gebrochenen Verkehr mit dem Lkw auf der Relation Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim ungünstiger als der reine Lkw-Transport.

Im Hinblick auf die CO₂-Emissionen lassen sich im Grundsatz die gleichen Schlüsse ziehen wie für die notwendigen Energieaufwendungen. Lediglich ein bedeutender Unterschied bleibt festzuhalten: Die Bahn bleibt auch bei den Wagenladungen mit 15 t und 25 t Gewicht günstiger als der jeweils vergleichbare Transport mit dem Lkw. Ausnahmen bilden bei der Wagenladung mit 25 t Gewicht nur der Container-Transport auf der Relation Lindau - Ulm mit 106 % und der Trailerzug auf den Relationen Ulm - Lindau (111 %) und Lindau - Ulm (115 %). Auch bei den CO₂-Emissionen gilt für Bahn und Binnenschiff, dass die Indirekten Aufwendungen relativ gegenüber dem Lkw stärker zu Buche schlagen als die antriebsbedingten Effekte.

Bei den CO-Emissionen zeigt sich ergänzend zu den bereits bei der Diskussion der notwendigen Energieaufwendungen beschriebenen Entwicklungen deutlich der Einfluß der mit Strom betriebenen Verkehrsmittel. So erreichen auf den elektrifizierten Bahnstrecken selbst beim aus Sicht der Bahn wiederum ungünstigsten Fall der Wagenladung mit 25 t die relativ zum jeweilig entsprechenden Lkw-Transport zu interpretierenden Werte maximal 22 % (Stuttgart - Singen, Trailerzug). Anders auf der diesel-betriebenen Relation Ulm - Lindau / Lindau - Ulm. Hier emittiert bereits bei der Leerfahrt (Wagenladung 0 t) der Trailerzug mit 115 % (Ulm - Lindau) und 123 % (Lindau - Ulm) mehr CO als jeweils vergleichbar der Lkw. Deutlich zeigt sich das schlechte Emissionsverhalten des Binnenschiffs, das den ebenfalls bereits im Zusammenhang mit den notwendigen Energieaufwendungen beschriebenen Trend zu höheren Aufwendungen mit zunehmendem Transportgewicht verstärkt. So emittiert das Binnenschiff auf der Relation Mannheim - weil am Rhein bei der Leerfahrt (Wagenladung 0 t) nur 34 % des entsprechenden Lkw-Transports und auf der Relation Weil am Rhein - Mannheim sogar nur 24 %. Bei einem Gewicht der Wagenladung von 15 t emittiert das Binnenschiff bei der Talfahrt auf dieser Relation (Weil am Rhein - Mannheim) zwar nur 80 % des entsprechenden Lkw, bei der Bergfahrt (Mannheim - Weil am Rhein) sind es aber bereits 114 %. Bei einer Wagenladung von 25 t betragen die entsprechenden Werte bei der Talfahrt (Weil am Rhein - Mannheim) 114 % und bei der Bergfahrt (Mannheim - Weil am Rhein) 158 %. Ähnliche Trends sind bei den gebrochenen Verkehren des Binnenschiffs mit Bahn und Lkw auf der Relation Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim zu beobachten. Allerdings ist hier der gebrochene Verkehr mit Ausnahme der Relation Ulm - Mannheim bei der Verkehrsmittelkombination Bahn und Binnenschiff (92 %) bereits bei einem Gewicht der Wagenladung von 15 t ungünstiger als der vergleichbare Lkw-Transport und natürlich auch ungünstiger als die Bahn. Bei der Wagenladung mit 25 t Gewicht ist dann auch auf der Relation Ulm - Mannheim (126 %) der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Bahn ungünstiger als der korrespondierende Transport mit dem Lkw.

Für die NO_x-Emissionen gelten in ihrem grundsätzlichen Trend die selben Aussagen wie für die CO-Emissionen. Allerdings liegen die NO_x-Emissionen für die Bahn auf einem etwas höheren relativen Niveau als bei den CO-Emissionen. Daher emittiert der Trailerzug auf der Relation Ulm - Lindau bereits bei der Wagenladung 0 t mit 106 % mehr als der entsprechende Lkw-

Transport. Dies gilt entsprechend für die Relation Lindau - Ulm mit einem Wert von 112 %. Bei der Wagenladung 15 t emittieren alle Varianten des Bahntransports auf der Relation Ulm - Lindau / Lindau - Ulm mehr als der jeweils entsprechende Lkw. Die Spanne reicht dabei von 120 % (Ulm - Lindau, Bahn konventionell) bis 172 % (Lindau - Ulm, Trailerzug). Bei der Wagenladung 25 t liegt diese Spanne bereits zwischen 140 % (Ulm - Lindau, Bahn konventionell) und 200 % (Lindau - Ulm, Trailerzug). Für das Binnenschiff können ebenfalls die selben Trends abgelesen werden wie bei den CO-Emissionen, allerdings ebenfalls wieder auf einem höheren relativen Niveau. Dies führt dazu, dass bereits bei der Wagenladung sowohl der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Bahn als auch Binnenschiff und Lkw ungünstiger als der reine Lkw-Transport.

Ein anderes Bild ergibt sich, allerdings wiederum in Folge der Strombereitstellung für den elektrischen Fahrstrom der Bahn für die VOC-Emissionen. Hier erreichen die Emissionen der Bahn bereits auf den Relationen mit den hohen Streckenauslastungen Werte zwischen 57 % (Ulm - Mannheim und Weil am Rhein - Mannheim, jeweils Container) und 82 % (Mannheim - Ulm, Trailerzug). Auf der diesel-betriebenen Relation Ulm - Lindau / Lindau - Ulm treten Werte zwischen 93 % (Ulm - Lindau, Container) und 122 % (Lindau - Ulm, Trailerzug) auf. Auf der Relation Stuttgart - Singen / Singen - Stuttgart werden Werte zwischen 116 % (Singen - Stuttgart, Container) und 155 % (Stuttgart - Singen, Trailerzug) erreicht. Im Fall der Wagenladung 15 t steigen diese Relativwerte gegenüber dem jeweiligen Lkw-Transport erheblich an. Bei den Relationen mit den hohen Streckenauslastungen der Bahn werden nunmehr Werte zwischen 94 % (Ulm - Mannheim, Container) und 132 % (Mannheim - Ulm, Trailerzug) erreicht. Auf der diesel-betriebenen Relation Ulm - Lindau / Lindau - Ulm liegen die Werte nun zwischen 155 % (Ulm - Lindau, Bahn konventionell) und 201 % (Lindau - Ulm, Trailerzug). Auf der Relation Stuttgart - Singen / Singen - Stuttgart werden Werte zwischen 197 % (Singen - Stuttgart, Bahn konventionell) und 252 % (Stuttgart - Singen, Trailerzug) erreicht. Beachtenswert ist, dass ähnliche Werte auch bei Betrachtung ausschließlich der antriebsbedingten Effekte erreicht werden. Bei der Wagenladung 25 t haben alle Transporte mit der Bahn höhere Emissionen als die jeweilig entsprechenden Transporte mit dem Lkw. Die Wertespanne reicht von 114 % (Ulm - Mannheim, Bahn konventionell) bis zu 307 % (Stuttgart - Singen, Trailerzug). Auch hier weist die Bahn auch allein bei Betrachtung der antriebsbedingten Effekte höhere Emissionen als der jeweilig entsprechende Lkw-Transport auf. Beim Binnenschiff wirkt sich nun das im Hinblick auf VOC günstige Emissionsverhalten aus. So ist es bei der Wagenladung 0 t auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein mit 27 % des entsprechenden Lkw-Werts und in der Gegenrichtung mit 20 % das günstigste Verkehrsmittel. Auf der Relation Mannheim - Ulm stellt der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Bahn mit 64 % des entsprechenden Werts für den Lkw-Transport und in der Gegenrichtung mit 53 % das VOC-emissionsfreundlichste Verkehrsmittel dar. Der gebrochene Verkehr Binnenschiff und Lkw ist in der Relation Mannheim - Ulm mit 75 % nach

dem Containertransport der Bahn das zweitgünstigste Verkehrsmittel, in der Gegenrichtung mit 71 % allerdings das zweitungünstigste. Hier weist lediglich die Lkw-Direktfahrt höhere Werte auf. Bei der Wagenladung 15 t ist auch beim Binnenschiff das relative Emissionsniveau höher. Dennoch bleibt das Binnenschiff, allerdings aufgrund der relativ betrachtet geringeren indirekten Effekte, auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein (89 %) / Weil am Rhein - Mannheim (68 %) das günstigste Verkehrsmittel. Auf der Relation Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim sind die gebrochenen Verkehre des Binnenschiffs mit Bahn und Lkw nunmehr die jeweils ungünstigsten Verkehrsmittel. Die Spanne der Werte reicht von 137 % (Ulm - Mannheim, Bahn und Binnenschiff) bis zu 165 % (Mannheim - Ulm, Bahn und Binnenschiff). Dieses letzte Ergebnis spiegelt wiederum die starke Abhängigkeit der Aufwendungen für das Binnenschiff, aber auch für die Bahn, von der Berg- bzw. Talfahrt wider. Im reinen Binnenschiffverkehr (Relation Mannheim - Weil am Rhein / Weil am Rhein - Mannheim) verringern die indirekten Aufwendungen das relative Niveau der Gesamtaussage, bei den gebrochenen Verkehren (Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim) erhöhen sie dieses. Bei der Wagenladung 25 t ist das Binnenschiff nur noch auf der Relation Weil am Rhein - Mannheim (Talfahrt) mit 97 % der Aufwendungen des entsprechenden Lkw-Transports das günstigste Verkehrsmittel. In der Gegenrichtung (Bergfahrt) übersteigt es die Emissionen des Lkw um 26 %. Die gebrochenen Transporte auf der Relation Mannheim - Ulm / Ulm - Mannheim sind mit Werten zwischen 185 % (Ulm - Mannheim, Bahn und Binnenschiff sowie Lkw und Binnenschiff) und 221 % (Mannheim - Ulm, Bahn und Binnenschiff) die Varianten dieses Transports mit den höchsten VOC-Emissionen. Die indirekten Aufwendungen wirken wiederum wie bei den VOC-Emissionen der Wagenladung 15 t beschrieben.

9.3.3 Massengut

Die Transportweiten entsprechen denjenigen der Wagenladung.

Der konventionelle Bahntransport benötigt bei der Leerfahrt (Massengut 0 t) stets geringere Energieaufwendungen als der entsprechende Transport mit dem Lkw. Allerdings zeigen sich in Abhängigkeit von der Streckenauslastung der Bahn wiederum zwei Kategorien von Relationen. Auf den Relationen mit den hohen Streckenauslastungen bei der Bahn (Ulm - Mannheim, Weil am Rhein - Mannheim) benötigt die Bahn jeweils nur ein Drittel des Energieaufwands des Lkw, auf den Relationen mit geringerer Streckenauslastung bei der Bahn allerdings deutlich mehr (Lindau - Ulm: 53 %, Singen - Stuttgart: 69 %). Deutlich höher als für den konventionellen Bahntransport liegen die notwendigen Energieaufwendungen für den Bahntransport mit dem Abrollcontainer. Hier werden auf der Relation Ulm - Mannheim 45 % und auf der Relation Weil am Rhein - Mannheim 64 % der Energieaufwendungen des entsprechenden Lkw-Transports

benötigt. Auf den beiden Relationen Lindau - Ulm (85 %) und Singen - Stuttgart (98 %) sind dies wiederum jeweils deutlich höhere Werte als beim konventionellen Bahntransport. Das Binnenschiff benötigt auf der Relation Weil am Rhein - Mannheim 52 % des Energieaufwands des entsprechenden Lkw-Transports und ist damit das zweitgünstigste Verkehrsmittel. Allerdings hat der konventionelle Bahntransport mit 34 % einen deutlich geringeren Energieaufwand. Bei den gebrochenen Verkehren Ulm - Mannheim benötigt das Binnenschiff in Kombination mit der Bahn 62 % und in Kombination mit dem Lkw 87 % der Energieaufwendungen des reinen Lkw-Transports. Damit sind diese Kombinationen ungünstiger als die beiden Formen des Bahntransports. Wiederum verringert sich mit zunehmender Auslastung der Unterschied zwischen den Bahn- und Binnenschifftransporten und dem jeweils korrespondierenden Lkw-Transport. Beim Massenguttransport im beladenen Zustand (Massengut 15 t) benötigt der konventionelle Bahntransport auf den stark frequentierten Bahnstrecken Mannheim - Ulm 52 % und Mannheim - Weil am Rhein 40 % der Aufwendungen des entsprechenden Lkw-Transports. Auf den schwächer frequentierten Relationen sind die von Ulm nach Lindau 71 % und von Stuttgart nach Singen 94 %. Auch beladen führt der Abrollcontainer zu gegenüber dem entsprechenden Lkw-Transport relativ höheren Energieaufwendungen. Auf den stark belasteten Relationen Mannheim - Ulm und Mannheim - Weil am Rhein sind dies rund 65 %, auf der schwächer belasteten Relation Ulm - Lindau 92 % und auf der Relation Stuttgart - Singen benötigt der Bahntransport mit Abrollcontainer mit 125 % sogar deutlich mehr als der entsprechende Lkw-Transport. Das Binnenschiff benötigt auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein nunmehr 60 %, die kombinierten Transporte auf der Relation Mannheim - Ulm 80 % (Binnenschiff und Bahn) und sogar 115 % (Binnenschiff und Lkw). Zu beachten ist, dass mit Ausnahme des reinen Binnenschifftransports auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein/Weil am Rhein - Mannheim die Betrachtung der indirekten Effekte die Verhältniszerte gegenüber dem jeweils entsprechenden Lkw-Transport zu Ungunsten des Transports mit Bahn oder Binnenschiff verändert gegenüber einer Betrachtung, die nur auf den antriebsbedingten Effekten beruhen würde.

Im Hinblick auf die CO₂-Emissionen lassen sich wiederum die gleichen Schlüsse ziehen wie bei der Diskussion des Energieaufwands. Lediglich ein Unterschied ist festzuhalten. Der reine Binnenschifftransport auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein/Weil am Rhein - Mannheim weist nun auch höhere CO₂-Emissionen auf als der Bahntransport mit dem Abrollcontainer, so dass das Binnenschiff auf dieser Relation nur noch günstiger als der entsprechende Lkw-Transport ist.

Die CO-Emissionen spiegeln ergänzend zu den bereits gezogenen Schlüssen wiederum die Struktur der Energieversorgung deutlich wider. Beide Formen des Bahntransports sind auf den elektrifizierten Relationen sowohl beladen als auch unbeladen wesentlich günstiger als die jeweils korrespondierenden Lkw-Transporte. Die Spanne reicht von 3 % (Massengut 0 t, Ulm - Mannheim, Bahn konventionell) bis 21 % (Massengut 15 t, Stuttgart - Singen, Bahn Abroll-

container). Auf der im Bahnbetrieb mit Diesellokomotiven betriebenen Relation Ulm-Lindau / Lindau – Ulm ist der Bahntransport nur noch bei der Leerfahrt mit 86 % günstiger als der korrespondierende Lkw-Transport. In allen anderen Fällen (Abrollcontainer beladen (173 %) und unbeladen (137 %), Bahn konventionell beladen (133 %)) ist der Bahntransport ungünstiger. Das Binnenschiff weist auf der Relation Mannheim- Weil am Rhein/ Weil am Rhein-Mannheim ebenfalls recht hohe CO-Emissionen auf und erreicht unbeladen (Massengut 0 t) 76 % der Werte des Lkw, wodurch es auch deutlich schlechter als der Bahntransport ist, und beladen sogar 114 %, womit es die höchsten CO-Emissionen aller untersuchten Verkehrsmittel aufweist. Bei den kombinierten Transporten auf der Relation Mannheim - Ulm/ Ulm - Mannheim liegen die Relativwerte gegenüber dem Lkw in etwa auf dem Niveau des Vergleichs der Energieaufwendungen.

Für die Transporte auf den elektrisch betriebenen Relationen gelten für die NO_x-Emissionen des Bahntransports im Grundsatz die gleichen Aussagen wie für die CO-Emissionen. Im dieselbetriebenen Bahntransport sind diese relativ allerdings günstiger. Dies führt dazu, dass im beladenen Zustand (Massengut 15 t) der konventionelle Bahntransport mit einem relativen Wert von 94 % nunmehr wieder günstiger ist als der reine Lkw-Transport. Das Binnenschiff weist bei den NO_x-Emissionen höhere relative Werte auf als bei den CO-Emissionen. Dies führt dazu, dass der leere Binnenschifftransport (Massengut 0 t) von Weil am Rhein nach Mannheim nunmehr 111 % der Emissionen des reinen Lkw-Transports auf dieser Relation emittiert. Auch auf der Relation Ulm - Mannheim weist die Kombination Binnenschiff und Lkw beim Leertransport (Massengut 0 t) nun mit einem Wert von 127 % höhere Emissionen als der reine Lkw-Transport aus.

Auch die VOC-Emissionen spiegeln die Struktur der Energiebereitstellung beim Strom wider. Dies führt nun dazu, dass der Bahntransport mit dem Abrollcontainer bereits bei der Leerfahrt (Massengut 0 t) stets höhere Emissionen hat als der jeweils entsprechende Lkw-Transport (Ulm - Mannheim: 102 %, Weil am Rhein - Mannheim: 120 %, Lindau - Ulm: 142 %, Singen - Stuttgart: 188 %). Der konventionelle Bahntransport ist bei der Leerfahrt (Massengut 0 t) in drei von vier Fällen günstiger als der entsprechende Lkw-Transport (Ulm - Mannheim: 69 %, Weil am Rhein - Mannheim: 70 %, Lindau - Ulm: 93 %). Auf der Relation Singen - Stuttgart ist er nunmehr mit 137 % allerdings ungünstiger als der Lkw. Das Binnenschiff ist auf der Relation Weil am Rhein - Mannheim mit 68 % der Emissionen des Lkw nunmehr das günstigste Verkehrsmittel. Die mit dem Binnenschiff kombinierten Transporte auf der Relation Ulm - Mannheim erreichen mit 99 % (Binnenschiff und Bahn) bzw. übersteigen mit 113 % (Binnenschiff und Lkw) die Emissionen des reinen Lkw-Transports. Im beladenen Zustand (Massengut 15 t) haben die zum Lkw alternativen Verkehrsmittel Bahn und Binnenschiff bzw. auf der Relation Mannheim - Ulm die beiden mit dem Binnenschiff kombinierten Varianten höhere auf den jeweilig vergleichbaren Lkw-Transport bezogene Emissionen. Sie sind daher bis auf zwei Aus-

nahmen (Mannheim - Weil am Rhein: Bahn 94 %, Binnenschiff 90 %) stets ungünstiger als der Lkw. Das Binnenschiff ist daher auf der Relation Mannheim- Weil am Rhein bezogen auf die VOC-Emissionen das günstigste Verkehrsmittel. Die Werte der beiden Formen des Bahntransports (konventionell, Abrollcontainer), die bis auf die genannte Ausnahme alle ungünstiger als der Lkw sind, liegen in einer Spanne von 129 % (Mannheim - Ulm, Bahn konventionell) bis 293 % (Stuttgart - Singen, Bahn Abrollcontainer). Die beiden Kombinationen mit dem Binnenschiff auf der Relation Mannheim - Ulm erreichen nun jeweils ca. 160 % der Werte des reinen Lkw-Transports.

9.4 Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum

9.4.1 Leichtes Stückgut

Die Bahntransporte haben bei elf der zwölf in den Vergleich einbezogenen Relationen eine kürzere Transportweite als der Lkw-Transport. Die Spanne reicht dabei von 34 % der Transportweite des Lkw (Meckenbeuren - Pfullendorf und Pfullendorf - Meckenbeuren) bis zu 99 % (St. Georgen - Donaueschingen). Nur auf der Relation Ravensburg - Pfullendorf hat die Bahn mit 128 % der Transportweite des Lkw eine größere Transportweite. Generell fällt die große Variation der Transportweiten auf, die durch die Verteilfahrten der Lkw bedingt ist.

Bei Betrachtung des notwendigen Energieaufwands ergeben sich Unterschiede zwischen den Beispielräumen Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) und Oberschwaben (Ravensburg). Im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) kommen bei der Bahn Diesel- und Elektrolokomotiven zum Einsatz, im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) nur Diesellokomotiven. Im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) übersteigt der notwendige Energieaufwand der Bahn stets denjenigen des Lkw. Die Spanne reicht dabei von 122 % (Donaueschingen - St. Georgen) bis zu 251 % (VS-Schwenningen - Donaueschingen). im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) ist die Bahn dagegen nur in zwei Fällen ungünstiger als der Lkw (Ravensburg - Pfullendorf: 168 %, Ravensburg - Meckenbeuren: 170 %), während sie in den vier anderen Fällen günstiger ist. Die Spanne reicht dabei von 69 % (Pfullendorf - Ravensburg) bis 78 % (Meckenbeuren - Pfullendorf).

Die tendenziell selbe Aussage ergibt sich für die CO₂-Emissionen, wobei die Bahn jeweils um wenige Prozentpunkte günstiger liegt als beim Energieaufwand.

Auch bei den CO-Emissionen ist festzustellen, dass die Bahn im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) relativ höhere Werte erreicht im Vergleich zum jeweiligen Lkw-Transport als im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg). Im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) ist die Bahn in zwei Fällen günstiger als der Lkw (Donaueschingen - St. Georgen: 81 %, Donaueschingen - VS-Schwenningen: 91 %). In den übrigen Fällen ist sie ungünstiger, wobei die Spanne von 129 % (St. Georgen - VS-Schwenningen) bis 180 % (VS-Schwenningen - Donaueschingen) reicht. Im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) ist die Bahn nur in zwei Fällen ungünstiger als der Lkw (Ravensburg - Meckenbeuren und Ravensburg - Pfullendorf: jeweils ca. 115 %), in den übrigen vier Fällen erzeugt sie jeweils nur ca. 50 % der CO-Emissionen des entsprechenden Lkw-Transports.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei den NO_x-Emissionen. Wiederum erreicht die Bahn im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) relativ höhere Werte als im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg), jeweils bezogen auf den entsprechenden Lkw-Transport. Im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) ist die Bahn in zwei Fällen ungünstiger als der Lkw (VS-Schwenningen - St. Georgen: 113 %, VS-Schwenningen - Donaueschingen: 118 %). In den übrigen vier Fällen hat sie geringere NO_x-Emissionen als der jeweils entsprechende Lkw-Transport, wobei die Spanne von 47 % (Donaueschingen - St. Georgen) bis 87 % (St. Georgen - VS-Schwenningen) reicht. Im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) hat die Bahn nunmehr durchgängig geringere NO_x-Emissionen als der jeweils entsprechende Lkw-Transport. Die Spanne reicht dabei von 31 % (Meckenbeuren - Ravensburg) bis 83 % (Ravensburg - Pfullendorf).

Bei den VOC-Emissionen ist wiederum deutlich der Einfluß der Elektrotraktion abzulesen. Ferner führt hier die Berücksichtigung der indirekten Effekte zu deutlich höheren dem Bahntransport anzurechnenden Emissionen. In drei Fällen führt dies sogar dazu, dass dem Bahntransport in der Summe höhere VOC-Emissionen als dem jeweils entsprechenden Lkw-Transport anzurechnen sind, obwohl bei ausschließlicher Berücksichtigung der antriebsbedingten Effekte dem Bahntransport geringere VOC-Emissionen anzurechnen gewesen wären als dem Lkw (St. Georgen - VS-Schwenningen: antriebsbedingt: 96 % / Summe: 133 %; Donaueschingen - St. Georgen: antriebsbedingt: 79 % / Summe: 104 %; Ravensburg - Pfullendorf: antriebsbedingt: 57 % / Summe: 103 %). Besonders das letzte Beispiel zeigt diesen Effekt sehr deutlich. Generell ist wiederum festzustellen, dass die Bahn im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) relativ höherer Werte erreicht als im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg). Im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) ist die Bahn nur in einem Fall günstiger als der Lkw (Donaueschingen - VS-Schwenningen). In den übrigen Fällen ist die Bahn ungünstiger als der jeweils entsprechende Lkw-Transport, wobei die Spanne von 104 % (Donaueschingen - St. Georgen) bis zu 179 % (VS-Schwenningen - Donaueschingen) reicht. Im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) sind dem Bahntransport nur in einem Fall höhere VOC-

Emissionen zuzurechnen als dem entsprechenden Lkw-Transport (Ravensburg - Pfullendorf: 103 %). In den übrigen Fällen ist die Bahn günstiger als der Lkw, wobei die Spanne von 36 % (Meckenbeuren - Ravensburg) bis 89 % (Ravensburg - Meckenbeuren) reicht.

9.4.2 Wagenladung

In drei der sechs Relationenpaare unterschreiten die Transportweiten der Bahn diejenigen des Lkw geringfügig (Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen: 90 %; VS-Schwenningen - St. Georgen / St. Georgen - VS-Schwenningen: 94 %; Ravensburg - Meckenbeuren / Meckenbeuren - Ravensburg: 96 %). In den anderen drei Relationenpaaren hat die Bahn größere Transportweiten (VS-Schwenningen - Donaueschingen / Donaueschingen - VS-Schwenningen: 135 %; Meckenbeuren - Ravensburg / Ravensburg - Meckenbeuren: 143 %; Pfullendorf - Ravensburg / Ravensburg - Pfullendorf: 143 %).

Bei Betrachtung des für die jeweiligen Transportaufgaben bei den beiden Verkehrsmitteln notwendigen Energieaufwands fällt wiederum auf, dass die Bahn im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) wiederum relativ höhere Werte aufweist als im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg). Wie bereits bei den anderen Planungsaufgaben ist ebenfalls wiederum festzustellen, dass mit zunehmender Auslastung die Werte der Bahn gegenüber dem jeweiligen Lkw-Transport relativ zunehmen. Dadurch verringert sich über die Transportaufgaben "Wagenladung 0 t", "Wagenladung 15 t" und "Wagenladung 25 t" der Bereich, in dem die Bahn die günstigeren Werte aufweist, und der Lkw wird zunehmend günstiger. Ferner haben wiederum die indirekten Effekte einen großen Einfluß auf das Ergebnis, indem sie eine in allen Fällen eine deutliche relative Erhöhung des Energieaufwands der Bahn gegenüber der alleinigen Betrachtung der antriebsbedingten Effekte bewirken. Im Falle der Leerfahrt (Wagenladung 0 t) ist der Bahn nur auf drei Relationen ein höherer notwendiger Energieaufwand zuzurechnen als dem entsprechenden Lkw. Den Höchstwert nimmt dabei mit 136 % die Relation Donaueschingen - VS-Schwenningen ein. Den relativ geringsten notwendigen Energieaufwand weist die Bahn mit 47 % auf der Relation Ravensburg - Meckenbeuren auf. Diese beiden Relationen markieren auch für die beiden Fälle "Wagenladung 15 t" und "Wagenladung 25 t" die jeweiligen Extreme. Bei der Transportaufgabe "Wagenladung 15 t" ist die Bahn nur noch in fünf der zwölf Fälle günstiger als der jeweils entsprechende Lkw-Transport, bei der "Wagenladung 25 t" nur noch in zwei Fällen.

Bei den CO₂-Emissionen ergibt sich grundsätzlich ein dem notwendigen Energieaufwand vergleichbares Bild. Wiederum weist die Bahn im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) relativ höhere Werte auf als im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg). Wiederum steigen die relativen Werte der Bahn mit zunehmender Auslastung an. Wiederum erhöhen die

indirekten Aufwendungen die Werte der Bahn erheblich gegenüber einer reinen Betrachtung nur der antriebsbedingten Effekte. Im Falle der Leerfahrt sind der Bahn nur auf der Relation Donaueschingen - VS-Schwenningen mit 105 % höhere CO₂-Emissionen zuzuweisen als dem jeweils vergleichbaren Lkw-Transport. Auf allen anderen Relationen sind dem Bahntransport jeweils geringere CO₂-Emissionen zuzuweisen. Die geringsten relativen CO₂-Emissionen hat die Bahn mit 39 % wiederum auf der Relation Ravensburg - Meckenbeuren. Diese beiden Relationen markieren wiederum auch bei den Transportaufgaben "Wagenladung 15 t" und "Wagenladung 25 t" die Extremwerte. Bei der Transportaufgabe "Wagenladung 15 t" ist die Bahn nunmehr noch in fünf der zwölf Fälle ungünstiger als der jeweils entsprechende Lkw-Transport, bei der "Wagenladung 25 t" in sechs Fällen.

Bei den CO-Emissionen ist zunächst wiederum der starke Einfluß der Elektrotraktion bei der Bahn abzulesen. Dies fällt am deutlichsten auf dem Relationenpaar "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" auf, da hier der höchste Anteil der Elektrotraktion am Bahntransport ist. Entsprechend betragen die CO-Emissionen auf diesem Relationenpaar für die Transportaufgabe "Wagenladung 0 t" nur ca. 8 % des jeweiligen Lkw-Transports, für die Transportaufgabe "Wagenladung 15 t" nur ca. 15 % und für die Transportaufgabe "Wagenladung 25 t" nur ca. 20 %. Damit liegen sie deutlich unter den nächst folgenden Werten. Generell ist wiederum festzustellen, dass mit zunehmender Auslastung die relativen Werte der Bahn gegenüber dem jeweiligen Lkw-Transport ansteigen. Bei der Transportaufgabe "Wagenladung 0 t" sind der Bahn nur in zwei Fällen höhere CO-Emissionen zuzurechnen als dem Lkw. Dabei erreicht die Bahn auf der Relation Pfullendorf - Ravensburg mit 114 % den ungünstigsten Wert. Bei den Fällen, in denen der Bahn geringere CO-Emissionen zuzurechnen sind als dem Lkw reicht die Wertespanne - mit Ausnahme des Relationenpaars "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" - von 33 % (VS-Schwenningen - St. Georgen) bis 95 % (Meckenbeuren - Pfullendorf). Im Fall der Transportaufgabe "Wagenladung 15 t" sind der Bahn auf sechs Relationen höhere CO-Emissionen zuzurechnen als dem jeweils entsprechenden Lkw-Transport. Der Höchstwert tritt dabei wiederum auf der Relation Pfullendorf - Ravensburg mit 210 % auf. In den Fällen, bei denen der Bahn geringere CO-Emissionen zuzurechnen sind, reicht die Wertespanne - mit Ausnahme des Relationenpaars "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" - von 57 % (wiederum VS-Schwenningen - St. Georgen) bis 87 % (St. Georgen - VS-Schwenningen). Bei der Transportaufgabe "Wagenladung 25 t" sind der Bahn mit Ausnahme des Relationenpaars "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" nur noch auf der Relation VS-Schwenningen - St. Georgen mit 70 % des entsprechenden Werts für den Lkw-Transport geringere CO-Emissionen zuzurechnen. Auf allen anderen Relationen weist die Bahn jeweils höhere CO-Emissionen auf, wobei der Höchstwert von 263 % auf den Relationen Pfullendorf - Ravensburg und Pfullendorf - Meckenbeuren erreicht wird.

Auch bei den NO_x-Emissionen ist festzustellen, dass mit zunehmender Auslastung die auf den jeweilig vergleichbaren Transport mit dem Lkw bezogenen Werte der Bahn ansteigen. Ebenfalls ist wiederum zu erkennen, dass das Relationenpaar "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" aufgrund seines hohen Anteils des elektrifizierten Bahntransports deutlich günstigere Werte aufweist als die anderen Relationen. So betragen die NO_x-Emissionen auf diesem Relationenpaar für die Transportaufgabe "Wagenladung 0 t" nur ca. 10 % des jeweiligen Lkw-Transports, für die Transportaufgabe "Wagenladung 15 t" nur ca. 20 % und für die Transportaufgabe "Wagenladung 25 t" ebenfalls nur ca. 20 %. Bei der Transportaufgabe "Wagenladung 0 t" sind der Bahn wiederum nur in zwei Fällen höhere NO_x-Emissionen zuzurechnen als dem Lkw. Dabei erreicht die Bahn ebenfalls wieder auf der Relation Pfullendorf - Ravensburg mit 111 % den ungünstigsten Wert. Bei den Fällen, in denen der Bahn geringere NO_x-Emissionen zuzurechnen sind als dem Lkw reicht die Wertespanne - mit Ausnahme des Relationenpaars "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" - von 32 % (wiederum VS-Schwenningen - St. Georgen) bis 85 % (wiederum Meckenbeuren - Pfullendorf) Im Fall der Transportaufgabe "Wagenladung 15 t" sind der Bahn auf sechs Relationen höhere NO_x-Emissionen zuzurechnen als dem jeweils entsprechenden Lkw-Transport. Der Höchstwert tritt dabei auf der Relation Pfullendorf - Meckenbeuren mit 177 % auf. In den Fällen, bei denen der Bahn geringere NO_x-Emissionen zuzurechnen sind, reicht die Wertespanne - mit Ausnahme des Relationenpaars "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" - von 47 % (wiederum VS-Schwenningen - St. Georgen) bis 80 % (St. Georgen - VS-Schwenningen). Bei der Transportaufgabe "Wagenladung 25 t" sind der Bahn mit Ausnahme des Relationenpaars "Donaueschingen - St. Georgen / St. Georgen - Donaueschingen" auf vier Relationen geringere NO_x-Emissionen zuzurechnen. Die Wertespanne reicht dabei von 53 % (wiederum VS-Schwenningen - St. Georgen) bis 88 % (Ravensburg - Meckenbeuren). Auf sechs Relationen weist die Bahn jeweils höhere NO_x-Emissionen auf, wobei der Höchstwert von 208 % auf der Relation Pfullendorf - Meckenbeuren erreicht wird.

Bei den VOC-Emissionen sind der Bahn nahezu ausschließlich höhere Werte zuzurechnen als den jeweils entsprechenden Lkw-Transporten. Lediglich für die Transportaufgabe "Massengut 0 t" auf den Relationen Ravensburg - Pfullendorf (86 %), Pfullendorf - Ravensburg (95 %), Meckenbeuren - Pfullendorf (80 %) und Pfullendorf - Meckenbeuren (84 %) sind der Bahn geringere VOC-Emissionen anzurechnen. Die Höchstwerte der auf den jeweiligen Lkw-Transport bezogenen Werte der Bahn erreichen für die Transportaufgabe "Massengut 0 t" 210 %, für die Transportaufgabe "Massengut 15 t" 405 % und für die Transportaufgabe "Massengut 25 t" 513 %, jeweils erreicht auf der Relation Donaueschingen - VS-Schwenningen. Bei den VOC-Emissionen ist wieder festzustellen, dass im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) generell relativ höhere Werte als im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) auftreten. Auffallend ist der starke Einfluß der indirekten Aufwendungen, die, mit Ausnahme der Relatio-

nenpaare "Ravensburg - Pfullendorf / Pfullendorf - Ravensburg" und "Meckenbeuren - Pfullendorf / Pfullendorf - Meckenbeuren" zu einer drastischen Erhöhung des Summenwerts im Vergleich zur Betrachtung nur der antriebsbedingten Effekte führen. In einigen Fällen ist dies eine Verdoppelung des jeweiligen relativen Werts.

9.4.3 Massengut

Die Transportweiten der Bahn sind auf vier fünf untersuchten Relationen geringer als beim Lkw. Die Spanne reicht dabei von 80 % (GVZ VS-Villingen - St. Georgen) bis 91 % (GVZ VS-Villingen - VS-Schwenningen). Lediglich auf der Relation GVZ Ravensburg - Pfullendorf ist die Transportweite beim Bahntransport mit 149 % größer als beim entsprechenden Transport mit dem Lkw.

Beim Vergleich der notwendigen Energieaufwendungen der beiden untersuchten Verkehrsmittel Bahn und Lkw fällt zunächst auf, dass abweichend von den bisherigen Befunden die Bahn im beladenen Zustand (Massengut 15 t) nunmehr die relativ günstigeren Werte aufweist als im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t). Lediglich auf dem Relationenpaar Meckenbeuren - GVZ Ravensburg / GVZ Ravensburg - Meckenbeuren ist dies umgekehrt (Massengut 0 t: 41 %, Massengut 15 t: 51 %). Auffallend ist generell der große Einfluß der indirekten Aufwendungen. Bei der Transportaufgabe "Massengut 0 t" hat die Bahn mit Ausnahme der erwähnten Relation Meckenbeuren - GVZ Ravensburg stets höhere relative Energieaufwendungen als der vergleichbare Lkw-Transport. Der Höchstwert wird dabei auf der Relation St. Georgen -GVZ VS-Villingen mit 221 % erreicht. Bei der Transportaufgabe "Massengut 15 t" weist die Bahn mit einer Ausnahme (GVZ VS-Villingen - Donaueschingen: 128 %) einen höheren Energieaufwand auf als der entsprechende Lkw-Transport. In allen anderen Fällen sind die notwendigen Energieaufwendungen geringer als beim entsprechenden Lkw-Transport. Der geringste Wert wird auf der bereits erwähnten Relation GVZ Ravensburg - Meckenbeuren mit 51 % erreicht.

Im Trend vergleichbare Aussagen können auch für die CO₂-Emissionen getroffen werden, allerdings auf einem wesentlich geringeren Niveau. Hier liegen die auf den jeweils vergleichbaren Lkw-Transport bezogenen CO₂-Emissionen im Wertebereich von 15 % (Relation GVZ VS-Villingen - St. Georgen, Massengut 15 t) bis 87 % (Relationen VS-Schwenningen - GVZ VS-Villingen und Pfullendorf - GVZ Ravensburg, jeweils Massengut 0 t).

Auch bei den CO-Emissionen zeigt sich eine uneinheitliche Entwicklung. Auf den Relationenpaaren GVZ VS-Villingen - VS-Schwenningen / VS-Schwenningen - GVZ VS-Villingen, GVZ Ravensburg - Meckenbeuren / Meckenbeuren - GVZ Ravensburg und GVZ Ravensburg - Pfullendorf / Pfullendorf - GVZ Ravensburg sind die auf den jeweiligen Lkw-Transport bezo-

genen CO-Emissionen im beladenen Zustand größer als im unbeladenen, auf den Relationenpaaren GVZ VS-Villingen - Donaueschingen / Donaueschingen - GVZ VS-Villingen und GVZ VS-Villingen - St. Georgen / St. Georgen - GVZ VS-Villingen niedriger. Generell betragen die CO-Emissionen auf den beiden letzt genannten Relationenpaaren im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t) nur 9 % und im beladenen Zustand (Massengut 15 t) ca. 5 % der jeweiligen Emissionen des jeweils entsprechenden Lkw-Transports. Im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t) weist nur die Relation Pfullendorf - GVZ Ravensburg mit 119 % relativ höhere CO-Emissionen als der entsprechende Lkw-Transport auf. Auf den Relationen VS-Schwenningen - GVZ VS-Villingen und Meckenbeuren - GVZ Ravensburg betragen die CO-Emissionen ca. 60 % der Emissionen des entsprechenden Lkw. Im beladenen Zustand (Massengut 15 t) weisen die Relationen GVZ VS-Villingen - VS-Schwenningen (109 %) und GVZ Ravensburg - Pfullendorf (146 %) höhere CO-Emissionen auf als der entsprechende Lkw-Transport, die Relation GVZ Ravensburg - Meckenbeuren weist mit 82 % geringere CO-Emissionen bei der Bahn auf als beim entsprechenden Lkw-Transport.

Die NO_x-Emissionen weisen tendenziell nahezu die selben Aussagen auf wie die CO-Emissionen. Wiederum sind auf den Relationenpaaren GVZ VS-Villingen - VS-Schwenningen / VS-Schwenningen - GVZ VS-Villingen und GVZ Ravensburg - Meckenbeuren / Meckenbeuren - GVZ Ravensburg die auf den jeweiligen Lkw-Transport bezogenen NO_x-Emissionen im beladenen Zustand größer als im unbeladenen. Allerdings sind nunmehr auf dem Relationenpaar GVZ Ravensburg - Pfullendorf / Pfullendorf - GVZ Ravensburg wie auch auf den Relationenpaaren GVZ VS-Villingen - Donaueschingen / Donaueschingen - GVZ VS-Villingen und GVZ VS-Villingen - St. Georgen / St. Georgen - GVZ VS-Villingen die NO_x-Emissionen im beladenen Zustand niedriger als im unbeladenen. Generell betragen die NO_x-Emissionen auf den beiden letzt genannten Relationenpaaren im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t) nur 15 % und im beladenen Zustand (Massengut 15 t) wiederum ca. 5 % der jeweiligen Emissionen des jeweils entsprechenden Lkw-Transports. Im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t) weist nur die Relation Pfullendorf - GVZ Ravensburg mit 116 % relativ höhere NO_x-Emissionen als der entsprechende Lkw-Transport auf. Auf den Relationen VS-Schwenningen - GVZ VS-Villingen und Meckenbeuren - GVZ Ravensburg betragen die NO_x-Emissionen ca. 60 % der Emissionen des entsprechenden Lkw. Im beladenen Zustand (Massengut 15 t) weist die Relation GVZ Ravensburg - Pfullendorf mit 100 % gleich hohe NO_x-Emissionen auf wie der entsprechende Lkw-Transport, die Relationen GVZ VS-Villingen - VS-Schwenningen (87 %) und GVZ Ravensburg - Meckenbeuren (60 %) weisen geringere NO_x-Emissionen bei der Bahn auf als beim entsprechenden Lkw-Transport.

Die Betrachtung der VOC-Emissionen zeigt insgesamt ein uneinheitliches Bild im Vergleich der Verkehrsmittel Lkw und Bahn. Während auf den drei Relationenpaaren im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) im beladenen Zustand (Massengut 15 t) relativ niedri-

gere VOC-Emissionen festzustellen sind, ist dies bei den beiden Relationenpaaren im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) umgekehrt. Wiederum ist der Einfluß der indirekten Aufwendungen erheblich. Würden nur die antriebsbedingten Effekte berücksichtigt, wäre die Bahn nur im beladenen Zustand auf der Relation GVZ Ravensburg - Pfullendorf mit 102 % geringfügig ungünstiger als der entsprechende Lkw-Transport. Auf allen anderen Relationen wäre die Bahn sowohl beladen als auch unbeladen günstiger als der Lkw. Die Berücksichtigung sowohl der antriebsbedingten als auch der indirekten Effekte führt in der Summe dazu, dass der Bahn vielfach und teilweise sehr deutlich höhere VOC-Emissionen zuzurechnen sind als dem jeweils entsprechenden Lkw-Transport. Im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t) ist die Bahn nur auf den Relationen im Beispielraum Oberschwaben (Ravensburg) (Meckenbeuren - GVZ Ravensburg: 69 %, Pfullendorf - GVZ Ravensburg: 90 %) günstiger als der Lkw. Auf den drei Relationen im Beispielraum Schwarzwald (Villingen-Schwenningen) sind der Bahn höhere VOC-Emissionen zuzurechnen als dem Lkw. Die Spanne reicht dabei von 112 % (Donau- eschingen - GVZ VS-Villingen) bis 239 % (VS-Schwenningen - GVZ VS-Villingen). im beladenen Zustand ergibt sich ein vollkommen anderes Bild. Hier sind der Bahn auf den Relationen GVZ Ravensburg - Pfullendorf (114 %) und GVZ VS-Villingen - VS-Schwenningen (132 %) höhere Emissionen zuzurechnen als dem Lkw. Auf den übrigen drei Relationen weist die Bahn geringere Werte als der Lkw auf, wobei die Spanne von 53 % (GVZ VS-Villingen - St. Georgen) bis 99 % (GVZ Ravensburg - Meckenbeuren) reicht.

9.5 Kombination der Transportaufgaben

9.5.1 Leichtes Stückgut

Die beispielhafte Bildung Planungsaufgaben überschreitender Relationen führt bereits bei der Transportweite zu unterschiedlichen Ergebnissen. So führen bei der kombinierten Relation Esslingen-Mettingen - Pfullendorf die alternativen Transportformen mit dem Lkw über Güterverkehrszentren, mit der Bahn und dem Lkw im Vor- und Nachlauf (Bahn konventionell I) sowie mit der Bahn und dem Lkw im Vorlauf und der Bahn im Nachlauf (Bahn konventionell II) stets zu kürzeren Transportweiten. Die veränderten Betriebsbedingungen in der Abwicklung über zwei Güterverkehrszentren führen zu einem deutlich geringeren Energieeinsatz beim über die Güterverkehrszentren geführten Lkw-Transport in Höhe von 22 % des Wertes des nur über ein Güterverkehrszentrum geführten Lkw-Transports. Der Bahntransport erreicht mit 14 % (Bahn konventionell I) bzw. 11 % (Bahn konventionell II) nochmals günstigere Werte. Dieses Ergebnis schlägt sich in ähnlichen Größenordnung bei den CO₂- und Schadstoffemissionen nieder,

wobei gewisse schadstoff-spezifische Schwankungen aus der Energiebereitstellung für den Fahrstrom der Bahn resultieren. Dennoch bleibt stets die Reihenfolge erhalten, dass die Bahn konventionell II die günstigsten Werte liefert, gefolgt von der Bahn konventionell I und dem über zwei Güterverkehrszentren geführten Lkw-Transport. Aber auch dieser erreicht maximal ein Viertel des jeweiligen Wertes des nur über ein Güterverkehrszentrum geführten Lkws. Ursache für dieses deutliche Ergebnis ist die räumliche Lage des Speditionshofes im nordwestlich von Stuttgart und damit der eigentlichen Transportrichtung entgegengesetzt. Dies führt bei den ungünstigen Randbedingungen des Verteilerverkehrs zu den hohen spezifischen Aufwendungen. Bei den Transporten über die Güterverkehrszentren wird das Stückgut wesentlich schneller dem Hauptlauf zugeführt.

Die Kombination Ettlingen-West . Staufen zeigt bereits bei der Transportweite ein von der vorhergehenden Relation abweichendes Ergebnis. Hier hat das mit dem Lkw über zwei Güterverkehrszentren geführte Stückgut eine um 20 % und die Bahn (konventionell I) eine um 17 % größere Transportweite. Entsprechend benötigt das mit dem Lkw über zwei Güterverkehrszentren geführte Stückgut 10 % mehr Energieaufwand. Bei der Bahn sind trotz größerer Transportweite 17 % weniger Energieaufwand nötig. Dieses Ergebnis ist, modifiziert durch die Spezifika der Bereitstellung der elektrischen Energie, bei allen untersuchten Schadstoffkomponenten zu finden. Grundsätzlich findet sich die Reihenfolge, dass die Bahn das günstigste Verkehrsmittel darstellt, während auf dieser Relation der über zwei Güterverkehrszentren geführte Lkw-Transport die ungünstigste Variante darstellt. Lediglich bei den VOC-Emissionen ist der nur über ein Güterverkehrszentrum geführte Lkw-Transport die günstigste Variante. Dieses Ergebnis ist bedingt durch die im Beispielraum Karlsruhe angenommene räumliche Verteilung der Güterverkehrszentren und die örtliche Festlegung der untersuchten Spedition. Dies führt dazu, dass im Verteilerverkehr der Spedition nunmehr der Vorlauf deutlich kürzer ist als zum Güterverkehrszentrum. Dies zeigt aber auch den großen Einfluß, den die Organisation der Güterverteilung im Vor- und Nachlauf auf das Gesamtergebnis hat.

Auf der Relation St. Georgen - Esslingen-Mettingen hat der über zwei Güterverkehrszentren geführte Lkw-Transport eine um 15 % kürzere Transportweite als der nur über ein Güterverkehrszentrum geführte Lkw-Transport, während der Bahntransport jeweils eine um ca. 10 % größere Transportweite hat. Unabhängig von diesen Unterschieden in der Transportweite haben aber die mit einer besseren Bündelung der Güter arbeitenden Alternativen einen Energieaufwand, der nur ca. 15 % des Energieaufwands des nur über ein Güterverkehrszentrum geführten Lkw-Transports beträgt. Die Emissionen der unterschiedlichen Schadstoffe spiegeln dieses Ergebnis mit den aus der Bereitstellung der elektrischen Energie resultierenden Schwankungen wider. Dabei liegen für alle drei Alternativen sowohl beim notwendigen Energieaufwand als auch bei den Emissionen die Werte stets deutlich unter 20 % des jeweiligen Wertes des nur über ein Güterverkehrszentrum geführten Lkw-Transports. Ursache für dieses klare Ergebnis ist wie-

derum die in Bezug auf diesen Transport ungünstige Lage des untersuchten Speditionshofes im Nordwesten von Stuttgart mit einer langen Transportstrecke im ungünstigen Vor- und Nachlauf mit dem Lkw. Die Reihung der Verkehrsmittel ist stets so, dass die Bahn konventionell II das günstigste Verkehrsmittel darstellt, gefolgt von Bahn konventionell I und dem über zwei Güterverkehrszentren geführten Lkw-Transport. Ausnahmen bilden lediglich der notwendige Energieaufwand, bei dem Bahn konventionell I und der über zwei Güterverkehrszentren geführte Lkw-Transport gleichauf sind, und die VOC-Emissionen, bei denen der über zwei Güterverkehrszentren geführte Lkw-Transport die günstigste Alternative darstellt, gefolgt von Bahn konventionell II und Bahn konventionell I. Dabei liegen diese drei Verkehrsmittel allerdings jeweils nur um einen Prozentpunkt auseinander.

9.5.2 Wagenladung

Auf der Relation Mannheim - Meckenbeuren haben die drei bahn-bezogenen Alternativen jeweils eine um drei Prozent höhere Transportweite als der direkte Lkw-Transport. Die Transportweite der drei das Binnenschiff einbeziehenden Varianten ist jeweils um ca. 20% größer als diejenige des direkten Lkw-Transports. Dennoch haben alle Alternativen zum reinen Lkw-Transport auf dieser Relation bei der Leerfahrt (Wagenladung 0 t) einen geringeren notwendigen Energieaufwand als der reine Lkw-Transport. Den günstigsten Wert weist mit 45 % der Container-Transport der Bahn auf. Es folgt der traditionelle Bahntransport mit 49 %. Bahn und Binnenschiff I (direkter Bahntransport vom Hafen Plochingen nach Meckenbeuren) (56 %), Bahn Trailerzug (58 %) und Bahn und Binnenschiff II (Nachlauf mit Lkw ab GVZ Ravensburg) (59 %) liegen nahezu gleichauf. Die Kombination Lkw und Binnenschiff benötigt bei der Leerfahrt nur 11 % weniger als der reine Lkw-Transport. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Betrachtung der CO₂-Emissionen. Allerdings ist nun hier aufgrund der relativ höheren CO₂-Emissionen des Binnenschiffs der Trailerzug der Bahn auch günstiger als Bahn und Binnenschiff I. Aufgrund der Bereitstellung der elektrischen Energie verursachen bei den CO-Emissionen die drei Bahnalternativen nur 24 % (Bahn Container) bis zu 36 % (Bahn Trailerzug) der Emissionen des reinen Lkw-Transports. Bahn und Binnenschiff benötigen bei beiden Alternativen etwa 50 % der Werte des reinen Lkw-Transports, Lkw und Binnenschiff 85 %. Bei den NO_x-Emissionen ergibt sich ein ähnliches Bild, allerdings emittieren Lkw und Binnenschiff nunmehr gleichviel wie der reine Lkw-Transport. Ein abweichendes Bild ergibt sich bei den VOC-Emissionen. Hier wirken sich die hohen VOC-Emissionen der Energiebereitstellung bei der elektrifizierten Bahn und beim Binnenschiff aus. Daher sind nur noch der Bahntransport mit dem Container (86 %) und der konventionelle Bahntransport (94 %) günstiger als der reine Transport mit dem Lkw. Dem Bahntransport mit dem Trailerzug sind genau so viele VOC-Emissionen zuzurechnen wie dem reinen Lkw-Transport, während den Transporten, die das Binnenschiff einbeziehen, höhere

VOC-Emissionen zuzurechnen sind. Dabei reicht die Spanne von 107% (Bahn und Binnenschiff I) bis 113 % (Lkw und Binnenschiff).

Im beladenen Zustand (Wagenladung 15 t) weisen auf der Relation Mannheim - Meckenbeuren die zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel sowohl für den notwendigen Energieaufwand als auch für die Emissionen wiederum relativ höhere Werte auf. Beim notwendigen Energieaufwand sind wiederum die Bahntransporte die günstigste Alternative (Bahn Container: 67 %, Bahn konventionell: 68 %, Bahn Trailerzug: 78 %). Die Kombinationen Bahn und Binnenschiff sind um 9 % (Bahn und Binnenschiff I) bzw. 6 % (Bahn und Binnenschiff II) günstiger als der reine Lkw-Transport. Nur die Kombination Lkw und Binnenschiff benötigt mit 110 % einen höheren Energieaufwand als der reine Lkw-Transport. Das für den notwendigen Energieaufwand beschriebene Ergebnis spiegelt sich auch bei den CO₂-Emissionen wider. Auch bei den CO-Emissionen stellen die Bahntransporte die günstigste Alternative dar (Bahn Container: 44 %, Bahn konventionell: 45 %, Bahn Trailerzug: 58 %). Den das Binnenschiff einbeziehenden Transporten sind in der Kombination mit der Bahn jeweils um 20 % und in der Kombination mit dem Lkw um 35 % höhere CO-Emissionen zuzurechnen. Ein in der Tendenz gleiches Bild findet sich bei den NO_x-Emissionen. Allerdings liegen hier die Werte der Bahn um ca. 10 % - Punkte niedriger (Bahn konventionell: 36 %, Bahn Container: 37 %, Bahn Trailerzug: 47 %) und die Werte bei den das Binnenschiff einbeziehenden Transporte um ca. 5- 15 % - Punkte höher (Bahn und Binnenschiff I: 125 %, Bahn und Binnenschiff II: 126 %, Lkw und Binnenschiff: 151 %) als bei den CO-Emissionen, wodurch sich die Spanne zwischen den einzelnen Verkehrsmitteln vergrößert. Ein wiederum deutlich abweichendes Ergebnis liefern die VOC-Emissionen, da hier alle zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel höhere VOC-Emissionen aufweisen als der reine Lkw-Transport (Bahn Container: 139 %, Bahn konventionell: 143 %, Lkw und Binnenschiff: 147 %, Bahn Trailerzug: 153 %, Bahn und Binnenschiff I und II: jeweils 173 %).

Auf der Relation Ulm - Pfullendorf haben alle Bahntransporte größere Transportweiten als der direkte Lkw-Transport. Dabei liegt der konventionelle Bahntransport mit einer um 4 % größeren Transportweite in der Größenordnung des Lkw-Transports, während die über ein Umschlagterminal und entsprechenden Vor- und Nachläufen geführten Transporte mit dem Container und dem Trailerzug eine um 32 % größere Transportweite aufweisen. Diese längeren Transportweiten finden ihren Niederschlag auch bei Betrachtung der notwendigen Energieaufwendungen. So benötigt bei der Leerfahrt (Wagenladung 0 t) nur die konventionelle Bahn mit 67 % der notwendigen Energieaufwendungen des direkten Lkw-Transports weniger als dieser. Der Bahntransport mit dem Container erweist sich als energetisch günstiger als der Transport mit dem Trailerzug, da der Container-Transport den selben Energieaufwand benötigt wie der direkte Lkw-Transport, während dem Trailerzug ein um 18 % höherer Energieaufwand zuzurechnen ist. Ein dem notwendigen Energieaufwand vergleichbares Bild ergibt sich bei den CO₂-Emissionen. Allerdings

sind nun die CO₂-Emissionen des Containertransports mit 93 % geringer als diejenigen des Lkw-Transports. Ähnlich, wenn auch vom Niveau etwas höher, liegen die Verhältnisse bei den CO- und NO_x-Emissionen. Allerdings sind diese Emissionen beim Container-Transport wieder höher als beim direkten Lkw-Transport (CO: 104 %, NO_x: 111 %). Die VOC-Emissionen sind bei allen die Formen des Bahntransports höher als beim direkten Lkw-Transport, wobei die Spanne von 112 % (Bahn konventionell) bis 141 % (Bahn Trailerzug) reicht.

Im beladenen Zustand (Wagenladung 15 t) haben alle Bahntransporte höhere Emissionen als der direkte Lkw-Transport. Die Spanne reicht dabei von 102 % (Bahn konventionell) bis 151 % (Bahn Trailerzug). Dieses Grundmuster der Reihung (Bahn konventionell - Bahn Container - Bahn Trailerzug) bleibt auch bei allen untersuchten Emissionen erhalten, wobei die Emissionen der Bahntransporte auch stets höher sind als diejenigen des direkten Lkw-Transports. Einzige Ausnahme bilden hierbei die CO₂-Emissionen des konventionellen Bahntransports, die nur 86 % der CO₂-Emissionen des direkten Lkw-Transports betragen.

Auf der Relation Stuttgart - St. Georgen haben alle drei Formen des Bahntransports ca. 30 % größere Transportweiten als der direkte Lkw-Transport. Dennoch hat der konventionelle Bahntransport bei der Leerfahrt (Wagenladung 0 t) mit 94 % einen geringen notwendigen Energieaufwand als der direkte Lkw-Transport. Ferner zeigt sich wiederum, dass der Container-Transport (102 %) energetisch günstiger ist als der Transport mit dem Trailerzug (125 %). Diese Reihung der drei unterschiedlichen Bahntransporte (Bahn konventionell - Bahn Container - Bahn Trailerzug) bleibt auch bei allen untersuchten Emissionen erhalten. Allerdings ändert sich das jeweilige Niveau zum direkten Lkw-Transport in Abhängigkeit von der untersuchten Emissionskomponente sehr stark. Dies spiegelt in erster Linie die Energiebereitstellung für die überwiegend elektrisch betriebene Bahn wider. So haben alle drei Bahntransporte bei den CO₂-, CO- und NO_x-Emissionen geringere Werte als der direkte Lkw-Transport, während sie bei den VOC-Emissionen um ca. 100 % höhere Werte aufweisen.

Auch im beladenen Zustand (Wagenladung 15 t) bleibt über alle untersuchten umweltrelevanten Wirkungskomponenten die bereits für den unbeladenen Zustand beschriebene Reihung der Bahntransporte (Bahn konventionell - Bahn Container - Bahn Trailerzug) erhalten. Beim notwendigen Energieaufwand benötigen alle drei Bahntransporte mehr als der direkte Lkw-Transport. Die Spanne reicht von 137 % (Bahn konventionell) bis zu 166 % (Bahn Trailerzug). Bei den CO₂-Emissionen weist der konventionelle Bahntransport mit 96 % einen geringeren Wert als der direkte Lkw-Transport auf, während der Container-Transport mit der Bahn (106 %) und der Trailerzug (119 %) höhere Emissionen haben. Bei den CO- und NO_x-Emissionen weisen alle drei Bahntransporte deutlich geringere Werte als der direkte Lkw-Transport auf, während bei den VOC-Emissionen alle drei um mehr als 200% höhere Emissionen haben als der direkte Lkw-Transport.

Auf der Relation Stuttgart - Ravensburg haben der konventionelle Bahntransport eine um 7 % und der Container-Transport mit der Bahn sowie der Trailerzug eine um 6 % geringere Transportweite als der direkte Lkw-Transport. Dies führt in Verbindung mit dem etwa hälftigen Anteil der Dieseltraktion beim Bahntransport dazu, dass alle Bahntransporte stets sowohl beim notwendigen Energieaufwand als auch bei den Emissionen niedrigere Werte aufweisen als der direkte Lkw-Transport. Generell ist immer der Container-Transport die günstigste Alternative, gefolgt von dem konventionellen Bahntransport und dem Trailerzug. Einzige Ausnahme bildet bei den VOC-Emissionen der Trailerzug mit 102 % des Werts des direkten Lkw-Transports.

Im beladenen Zustand (Wagenladung 15 t) ergibt sich ein weitgehend ähnliches Bild, allerdings liegt bei allen Komponenten das auf den jeweiligen Lkw-Transport bezogene relative Niveau höher. Ferner ist nun immer der konventionelle Bahntransport geringfügig geringer als der Container-Transport. Eine Ausnahme bilden die VOC-Emissionen, bei denen alle drei Bahntransporte höhere Werte als der direkte Lkw-Transport aufweisen (Bahn Container: 142 %, Bahn konventionell: 143 %, Bahn Trailerzug: 157 %). Ursache hierfür ist nunmehr der ca. 50 % - ige Anteil der Elektrotraktion am Bahntransport.

Auf der Relation Mannheim - Lindau weisen alle die reinen Bahntransporte (konventionell, Trailerzug, Container) eine um 6 % größere Transportweite auf als der direkte Lkw-Transport. Die Kombination Lkw und Binnenschiff hat eine um 18 % und die Kombination Bahn und Binnenschiff eine um 22 % größere Transportweite. Dennoch haben im unbeladenen Zustand (Wagenladung 0 t) alle zum direkten Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel einen geringeren notwendigen Energieaufwand. Die Spanne reicht dabei von 44 % (Bahn Container) bis 80 % (Lkw und Binnenschiff). Die tendenziell selbe Bewertung findet sich bei den CO₂-, CO- und NO_x-Emissionen. Bei den VOC-Emissionen haben die Kombinationen mit dem Binnenschiff mit jeweils 87 % und der Bahntransport mit dem Container (91 %) geringere Emissionen als der reine Lkw-Transport, die VOC-Emissionen des konventionellen Bahntransports sind gleich hoch und diejenigen des Trailerzugs um 6 % höher.

Im beladenen Zustand (Wagenladung 15 t) sind wiederum die auf den jeweiligen Lkw-Transport bezogenen relativen Emissionen der Alternativen höher als im unbeladenen Zustand. So hat nunmehr die Kombination Lkw und Binnenschiff mit 105 % einen höheren Energieaufwand als der reine Lkw-Transport. Der notwendige Energieaufwand der anderen alternativen Verkehrsmittel ist geringer als derjenige des reinen Lkw-Transports. Den günstigsten Wert hat dabei der Container-Transport mit der Bahn mit 68 %. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Betrachtung der CO₂-Emissionen. Bei den CO-Emissionen ist nunmehr auch der Kombination Bahn und Binnenschiff mit 128 % ein deutlich höherer Wert als dem direkten Lkw-Transport zuzurechnen. Den höchsten Wert mit 132 % hat die Kombination Lkw und Binnenschiff. Die reinen Bahntransporte sind alle günstiger als der direkt Lkw-Transport. Den geringsten Wert hat wiederum

der Container-Transport mit der Bahn mit 53 %. Bei den NO_x -Emissionen ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die relativen Werte der drei Bahntransporte etwas geringer und diejenigen der Kombinationen mit dem Binnenschiff etwas höher sind als bei den CO-Emissionen, so dass die Spanne zwischen den Verkehrsmitteln insgesamt größer wird. Ein völlig anderes Bild findet sich bei den VOC-Emissionen. Hier sind allen zum direkten Lkw-Transport alternativen Verkehrsmitteln höhere Emissionen zuzurechnen. Die Spanne reicht dabei von 136 % (Lkw und Binnenschiff) bis 182% (Bahn und Binnenschiff).

9.5.3 Massengut

Auf dem Relationenpaar Karlsruhe - Staufen / Staufen - Karlsruhe ergibt sich hinsichtlich der Transportweite ein sehr uneinheitliches Bild. Während der Bahntransport mit dem Abrollcontainer eine um 3 % kürzere Transportweite hat als der reine Transport mit dem Lkw, weisen der direkte Bahntransport (Bahn konventionell I) mit 103 % und der Bahntransport mit einem Lkw im Vor- und Nachlauf (Bahn konventionell II) mit 152 % eine größere Transportweite auf. Auch die kombinierten Transporte Lkw und Binnenschiff sowie Bahn und Binnenschiff weisen mit jeweils ca. 170 % größere Transportweiten auf. Im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t) ist den zum direkten Lkw-Transport alternativen Verkehrsmitteln mit einer Ausnahme dennoch ein geringerer notwendiger Energieaufwand anzurechnen. der direkte Bahntransport benötigt 42 %, der konventionelle Bahntransport mit einem Lkw im Vor- und Nachlauf und der Bahntransport mit dem Abrollcontainer benötigen jeweils 68 % und die Kombination Bahn und Binnenschiff 77 % des Energieaufwands des direkt verkehrenden Lkws. Lediglich die Kombination Lkw und Binnenschiff hat einen um 1 % höheren Energieaufwand als der Lkw in Alleinfahrt. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die CO_2 -Emissionen. Bei den CO- und NO_x -Emissionen zeigt sich deutlich der Einfluß der Elektrotraktion bei der Bahn. Hier weisen die drei alternativen Bahntransporte die günstigsten Werte auf, wobei jeweils der reine Bahntransport mit ca. 10 % die günstigste alternative darstellt, gefolgt vom Bahntransport mit Abrollcontainer (jeweils ca. 30 %) und dem Bahntransport mit dem Lkw im Vor- und Nachlauf (jeweils ca. 35 %). Die Kombinationen mit dem Binnenschiff haben jeweils höhere Emissionen als der reine Lkw-Transport (Bahn und Binnenschiff: CO: 111 %, NO_x : 155 %; Lkw und Binnenschiff: CO: 125 %, NO_x : 171 %). Bei den VOC-Emissionen ergibt sich ein anderes Bild. Hier ist nur noch der reine Bahntransport mit 86 % günstiger als der reine Lkw-Transport, die anderen Alternativen weisen höhere Werte auf, wobei die Spanne von 103 % (Bahn konventionell II) bis 133 % (Lkw und Binnenschiff) reicht. Im beladenen Zustand (Massengut 15 t) weisen die Alternativen jeweils bezogen auf den reinen Lkw-Transport wiederum stets höhere Werte aus, wobei keine grundsätzlichen Abweichungen von den für die Leerfahrt beschriebenen Ergebnissen auftreten. Die Niveaushiftung bewirkt jedoch, dass beim notwendigen Energieaufwand nunmehr so-

wohl Lkw und Binnenschiff (132 %) als auch Bahn und Binnenschiff (112 %) höhere Werte aufweisen als der reine Lkw-Transport. Die drei Formen des Bahntransports haben jeweils geringere Werte als der reine Lkw-Transport. Bei den VOC-Emissionen sind nunmehr alle Alternativen ungünstiger als der reine Lkw-Transport. Die Spanne reicht von 123 % (Bahn Abrollcontainer) bis 198 % (Lkw und Binnenschiff).

Auf dem Relationenpaar Mannheim - Lindau / Lindau - Mannheim weisen demgegenüber alle zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel größere Transportweiten auf. Die Transportweiten der beiden Formen des Bahntransports (Bahn konventionell, Bahn Abrollcontainer) sind dabei jeweils 5%, diejenige der Kombination Lkw und Binnenschiff 17% und diejenige der Kombination Bahn und Binnenschiff 21 % länger.

Im unbeladenen Zustand (Massengut 0 t) hat der konventionelle Bahntransport mit 42 % des notwendigen Energieaufwands des reinen Lkw-Transports den günstigsten Wert. Es folgen der Bahntransport mit dem Abrollcontainer (57 %), Bahn und Binnenschiff (61 %) sowie Lkw und Binnenschiff (88 %). Somit ist für alle alternativen Verkehrsmittel der notwendige Energieaufwand geringer als für den reinen Lkw-Transport. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die CO₂-, CO- und NO_x-Emissionen. Lediglich bei den VOC-Emissionen ergibt sich ein abweichendes Bild. Hier sind nur noch dem konventionellen Bahntransport (85 %) geringere Emissionen als dem reinen Lkw-Transport anzurechnen, während die übrigen Alternativen höhere VOC-Emissionen haben als dieser. Die Spanne reicht dabei von 104% (Lkw und Binnenschiff) bis 110 % (Bahn Abrollcontainer).

Im beladenen Zustand (Massengut 15 t) ist auch für die Relation Mannheim - Lindau festzustellen, dass die zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel einen relativ höheren notwendigen Energieaufwand und relativ höhere Emissionen haben als im unbeladenen Zustand. Eine Ausnahme bilden hierbei jedoch die CO- und NO_x-Emissionen des Bahntransports mit dem Abrollcontainer, die im beladenen Zustand geringer sind als im unbeladenen Zustand. Dennoch ist der anzurechnende notwendige Energieaufwand für alle Alternativen geringer als beim reinen Lkw-Transport, wobei die Spanne von 59 % (Bahn konventionell) bis 94 % (Lkw und Binnenschiff) reicht. Ein ähnliches Bild ergibt sich wiederum bei den CO₂-Emissionen. Bei den CO- und NO_x-Emissionen ist nunmehr der Bahntransport mit dem Abrollcontainer (CO: 28 %, NO_x: 22 %) die günstigste Alternative. Bahn konventionell (CO: 44 %, NO_x: 32 %) sowie Bahn und Binnenschiff (CO: 94 %, NO_x: 85 %) weisen jeweils ebenfalls noch geringere Werte auf als der reine Lkw-Transport, während Lkw und Binnenschiff (CO: 105 %, NO_x: 109 %) höhere Werte aufweisen. Bei den VOC-Emissionen sind allen zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmitteln höhere Emissionen zuzurechnen. Die Spanne reicht von 125 % (Lkw und Binnenschiff) bis 162 % (Bahn Abrollcontainer).

9.6 Parametervariation

9.6.1 Güterverkehr in Ballungsräumen

Die erste Parametervariation betrifft im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" für den Transport des "Leichten Stückguts" von Lörrach nach Staufen die Abgasreinigung der Lkw und des automatischen Einzelwagens der Bahn. In einer ersten Stufe wird angenommen, dass diese Fahrzeuge der Grenzwertstufe EURO II entsprechen. Während sich durch diese Maßnahme am Energieverbrauch und den CO₂-Emissionen nichts ändert, sind auch bei den Schadstoffemissionen (CO, NO_x, VOC) die Änderungen nur marginal, so dass letztlich kein Einfluß dieser Parametervariation erkennbar ist. Dies gilt ebenfalls für den Übergang auf eine Schadstoffminderung entsprechend der EURO III - Norm. Eine weitere Parametervariation, die von einem Erdgas-Lkw ausgeht, zeigt wiederum beim notwendigen Energieeinsatz sowie bei den CO₂-, CO-, und NO_x-Emissionen keinen nennenswerten Einfluß. Allerdings hat der Erdgas-Lkw höhere VOC-Emissionen, wodurch bei dieser Schadstoffkomponente, die Alternativen, die Bahntransporte umfassen, relativ günstiger abschneiden. Konkret führt dies dazu, dass der konventionelle Bahntransport mit 81% und der Bahntransport mit dem automatischen Einzelwagen nunmehr deutlich günstiger sind als der reine Lkw-Transport. Die Umstellung der Strombereitstellung auf den Strommix Baden-Württemberg bewirkt wiederum keine substantiellen Veränderungen.

Die selben Parametervariationen, allerdings definitionsgemäß nicht für den automatischen Einzelwagen, wurden für den Transport von 15 t Massengut vom Hafen Weil am Rhein nach Staufen wiederum im Beispielraum "Oberrhein (Freiburg)" untersucht. Bei Annahme der Grenzwertstufe EURO II ergeben sich keine erwähnenswerten Unterschiede. Dies ändert sich bei Annahme der Grenzwertstufe EURO III. Hier führen die verringerten CO-, NO_x- und VOC-Emissionen des Lkw dazu, dass sich die Emissionen des konventionellen Bahntransports erhöhen. Konkret erhöhen sich die relativen CO-Emissionen der Bahn von 116 % auf 229 %, die NO_x-Emissionen von 80 % auf 120 % und die VOC-Emissionen von 86 % auf 108 %. Deutliche Veränderungen ergeben sich auch bei Betrachtung eines mit Erdgas betriebenen Lkw. Dessen höherer notwendiger Energieaufwand führt zu einem geringeren notwendigen Energieaufwand der Bahn von nun 30 %. Die geringeren CO- und NO_x-Emissionen des Erdgas-Lkw führen zu relativ höheren Emissionen der Bahn. So erhöhen sich die relativen CO-Emissionen des konventionellen Bahntransports von 116 % auf 299 % und diejenigen des Bahntransports mit Abrollcontainer von 131 % auf 194 %. Die relativen NO_x-Emissionen des konventionellen Bahntransports erhöhen sich von 80 % auf 290 %, diejenigen des Bahntransports mit Abrollcontainer von 86 % auf 174 %. Umgekehrt ist dies bei den VOC-Emissionen. Hier sind nun dem reinen Lkw-Transport deutlich höhere VOC-Emissionen zuzurechnen, wodurch sich die relativen Emissionen des kon-

ventionellen Bahntransports auf 13 % und des Bahntransports mit Abrollcontainer. verringern. Die veränderte Strombereitstellung mit dem Energiemix von Baden-Württemberg hat keinen nennenswerten Einfluß.

9.6.2 Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg

Auch im Transit-Güterverkehr durch Baden-Württemberg wurden für den Transport des "Leichten Stückguts" auf den Relationen Mannheim - Weil am Rhein und Ulm - Lindau Parametervariationen durchgeführt. Diese betrafen zunächst wiederum die Einführung der Grenzwertstufe EURO II beim Lkw. Wiederum ist kein nennenswerter Einfluß feststellbar. Ein hiervon abweichender Befund ergibt sich aber nun bei Betrachtung der Grenzwertstufe EURO III. Die geringeren Emissionen des Lkw führen zu einer relativen Erhöhung der Emissionen des konventionellen Bahntransports. So erhöhen sich auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein die CO-Emissionen des konventionellen Bahntransports von 4 % auf 9 %, die NO_x-Emissionen von 5 % auf 8 % und die VOC-Emissionen von 68 % auf 86 %. Auf der Relation Ulm - Lindau erhöhen sich die CO-Emissionen des konventionellen Bahntransports von 100 % auf 204 %, die NO_x-Emissionen von 77 % auf 117 % und die VOC-Emissionen von 96 % auf 122 %. Eine weitere Parametervariation betrifft die Untersuchung eines erhöhten Verkehrsaufkommens auf den Bundesautobahnen. Diese Parametervariation wurde für das "Leichte Stückgut" auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein untersucht. Die unterstellten schlechteren Betriebsbedingungen führen zu einem mehr als doppelt so hohen notwendigen Energieaufwand des Lkw und zu teilweise noch drastischeren Erhöhungen der Emissionen. Dadurch bedingt sinken die relativen Werte des konventionellen Bahntransports, der sich nunmehr nochmals deutlich günstiger darstellt. Im einzelnen verringern sich der notwendige Energieaufwand des konventionellen Bahntransports von 35 % auf 14 %, die CO₂-Emissionen von 26 % auf 10 %, die CO-Emissionen von 4 % auf 1 %, die NO_x-Emissionen von 5 % auf 1 % und die VOC-Emissionen von 68 % auf 12 %. Eine weitere Parametervariation betrifft die Verringerung der Auslastung der Bahn von 50 % auf 30 %, wiederum untersucht auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein. Wie zu erwarten war, führt dies zu einer Erhöhung der relativen Werte des konventionellen Bahntransports. Im einzelnen steigen der notwendige Energieaufwand von 35 % auf 54 %, die CO₂-Emissionen von 26 % auf 40 %, die CO-Emissionen von 4 % auf 7 %, die NO_x-Emissionen von 5 % auf 8 % und die VOC-Emissionen von 68 % auf 106 %. Auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein wurde ferner wiederum eine Veränderung der Strombereitstellung auf den Energiemix von Baden-Württemberg untersucht. Eine nennenswerte Veränderung bei den relativen Werten des konventionellen Bahntransports ist hierbei nur bei den CO₂-Emissionen mit einem Rückgang von 26 % auf 17 % und bei den VOC-Emissionen mit einem Rückgang von 68 % auf 51 % festzustellen. Auf der Relation Ulm - Lindau wurde ergänzend untersucht, wie sich die Umstel-

lung von Diesel- auf Elektrotraktion auswirken würde. Während beim notwendigen Energieaufwand keine Veränderung festzustellen ist, zeigen die Entwicklungen bei den einzelnen Emissionen eindeutig den Einfluß der geänderten Energienutzung und damit auch -bereitstellung. Die auf den jeweiligen reinen Lkw-Transport bezogenen CO₂-Emissionen verringern sich von 47 % auf 37 %, die CO-Emissionen von 100 % auf 8 % und die NO_x-Emissionen von 77 % auf 9 %, während sich die VOC-Emissionen von 96 % auf 106 % erhöhen. Die Berücksichtigung im Abgasverhalten verbesserter Diesellokomotiven, die in einer weiteren Parametervariation auf der Relation Ulm - Lindau untersucht wurde, zeigt nur bei den CO-Emissionen, die von 100 % auf 54 % sinken, eine deutliche Veränderung.

Weitere Parametervariationen wurden im Transitgüterverkehr für die mit 15 t beladene Wagenladung auf den Relationen Mannheim - Weil am Rhein und Ulm - Lindau durchgeführt. Für diese Transportaufgaben betraf die erste Parametervariation wiederum die Einführung der Abgas-Grenzwertstufe EURO II für den Lkw. Veränderungen in den relativen auf den jeweiligen Lkw-Transport bezogenen Emissionen aufgrund dieser Parametervariation sind nur bei den CO- und NO_x-Emissionen festzustellen. Hier auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein sind diese Veränderungen nicht nennenswert, während sie auf der Relation Ulm - Lindau für beide Schadstoffe und jeweils alle zum Lkw alternativen Verkehrsmittel ca. 20 % betragen. Dennoch ändert sich auch hier nichts an der grundsätzlichen Bewertung, da auf dieser Relation die alternativen Verkehrsmittel auch im Standardfall höhere zuzurechnende Emissionen hatten als der jeweilige Lkw-Transport. Die Einführung der Grenzwertstufe EURO III beim Lkw zeigt Wirkung bei den CO-, NO_x- und VOC-Emissionen, wobei diese Reihenfolge gleichzeitig die abnehmende Wirkungsintensität beschreibt. Auf beiden untersuchten Relationen verdoppeln sich die relativen CO-Emissionen der jeweils zum Lkw alternativen Verkehrsmittel. Allerdings ändert sich an der grundsätzlichen Reihung der Verkehrsmittel nichts. Dies gilt auch für die NO_x-Emissionen, auch wenn diese aufgrund der Einführung von EURO III für den Lkw bei den zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmitteln um ca. 50 % ansteigen. Etwas geringer ist der Anstieg der relativen VOC-Emissionen der alternativen Verkehrsmittel. Allerdings ist der reine Lkw-Transport nun auch auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein das günstigste Verkehrsmittel, da er nun auch günstiger als der Transport mit dem Binnenschiff ist. Eine weitere Parametervariation untersucht die durch ein erhöhtes Verkehrsaufkommen auf den Autobahnen bedingten Veränderungen. Diese Parametervariation wurde allerdings nur auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein untersucht. Diese Parametervariationen erbringt deutliche Veränderungen bei den relativen Werten aller Wirkungskomponenten der zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel (Energie: - 60 %, CO₂: - 60 %, CO: - 85 %, NO_x: -75 %, VOC: - 85 %). Dies bewirkt, dass der Lkw nun bei allen Komponenten das ungünstigste Verkehrsmittel ist. Auch bei der Parametervariation, die von geringeren Auslastungsgraden bei der Bahn ausgeht, wurde nur die Relation Mannheim - Weil am Rhein untersucht. Diese Verringerung des Auslastungsgrads

bei der Bahn bewirkt eine moderate Erhöhung des notwendigen Energieaufwands für die drei Typen des Bahntransports. Dadurch ändert sich allerdings die Reihenfolge der zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel im Bezug zum notwendigen Energieaufwand des reinen Lkw-Transports. Der Containertransport mit der Bahn bleibt mit 60 % knapp das günstigste Verkehrsmittel. Der konventionelle Bahntransport und das Binnenschiff liegen mit 62 % gleichauf, während der Trailerzug nunmehr 71 % der notwendigen Energieaufwendungen des Lkw-Transports benötigt. Auch bei den CO₂- und VOC-Emissionen sind moderate Erhöhungen der jeweiligen relativen Werte für die drei Typen des Bahntransports festzustellen. Allerdings ändert sich die Reihenfolge der Verkehrsmittel insbesondere im Bezug zum reinen Lkw-Transport und zum Binnenschiff nicht. Keine Effekte zeigen sich durch diese Parametervariation bei den CO- und NO_x-Emissionen. Ebenfalls auf der Relation Mannheim- Weil am Rhein wird in einer weiteren Parametervariation untersucht, wie sich die Umstellung der Bereitstellung des für die Bahntransporte notwendigen Stroms auf den für Baden-Württemberg typischen Strommix auswirken würde. Hier ist eine Wirkung nur bei den CO₂- und den VOC-Emissionen erkennbar. Die CO₂-Emissionen der drei Bahntransporte werden um ca. ein Drittel verringert. Allerdings ändert diese Verminderung nichts an der Reihenfolge der zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel in Bezug auf diesen Lkw-Transport. Die VOC-Emissionen der drei Formen des Bahntransports sinken um jeweils 25 %. Dadurch ändert sich aber die Reihung der Verkehrsmittel. Alle drei Formen des Bahntransports sind nunmehr günstiger als der reine Lkw-Transport. Der Containertransport mit der Bahn (84 %) und der konventionelle Bahntransport (87 %) sind nun sogar günstiger als das Binnenschiff (89 %), während der Trailerzug mit 90 % zwischen Binnenschiff und reinem Lkw-Transport liegt. Auf der Relation Ulm - Lindau wurde untersucht, wie sich die Umstellung von Diesel- auf Elektrotraktion bei der Bahn auswirken würde. Diese Parametervariation bewirkt beim notwendigen Energieaufwand insbesondere beim Trailerzug eine Verringerung der anzurechnenden notwendigen Energieaufwendungen. Dadurch ist nunmehr auch der Trailerzug (96 %) günstiger als der reine Lkw-Transport, der Containertransport mit der Bahn und der konventionelle Bahntransport sind allerdings mit jeweils 82 % nochmals günstiger. Die CO₂-Emissionen sinken bei den drei Formen des Bahntransports um 20 - 30 %, wobei der stärkste Rückgang wiederum beim Trailerzug festzustellen ist. Allerdings bleibt die Reihung der Verkehrsmittel unverändert. Dramatische Änderungen ergeben sich bei den CO- und NO_x-Emissionen. Während hier den drei Formen des Bahntransports bei Dieselbetrieb mehr oder weniger deutlich höhere Emissionen zuzurechnen sind, liegen diese nun mit jeweils ca. 15 % für alle drei Formen des Bahntransports bei beiden Schadstoffen wesentlich niedriger. Auch bei den VOC-Emissionen ist eine Verringerung festzustellen, allerdings verbleiben diese auf einem sehr hohen Niveau. Die Spanne reicht von 171 % (Bahn Container) bis 191 % (Trailerzug). Ebenfalls auf der Relation Ulm - Lindau wurde untersucht, wie sich ein verbessertes Emissionsverhalten der Dieselloks auswirkt. Hier zeigt sich nur bei den CO-Emissionen, die sich nahezu halbieren, ein deutlicher Effekt. Dadurch sind nunmehr der Container-

transport mit der Bahn und der konventionelle Bahntransport mit jeweils 83 % günstiger als der reine Lkw-Transport, während der Trailerzug mit 113 % nach wie vor ungünstiger als der reine Lkw-Transport ist.

9.6.3 Güterverkehr im ländlich strukturierten Raum

Hier wurden zunächst einige Parametervariationen für den Transport des leichten Stückguts auf der Relation Ravensburg - Pfullendorf durchgeführt. Die erste Parametervariation betrifft wiederum die Einführung der Abgas-Grenzwertstufe EURO II für die Lkw. Dies zeigt aber praktisch keine Wirkung. Die nächste Parametervariation betrifft die Einführung der Abgas-Grenzwertstufe EURO III für die Lkw. Hier erhöhen sich nun die auf den reinen Lkw-Transport bezogenen Emissionen des konventionellen Bahntransports von CO und NO_x um jeweils 22 % sowie von VOC um 30 %. Da allerdings die CO- und VOC-Emissionen des Bahntransports auch in der Basisbetrachtung schon höher waren als diejenigen des reinen Lkw-Transports ist eine Neubewertung der Verkehrsmittel nur bei den NO_x-Emissionen notwendig, da hier nun der konventionelle Bahntransport mit 101 % ebenfalls ungünstiger als der reine Lkw-Transport ist. Als eine weitere Parametervariation wurde nun die Einführung von Erdgas-Lkw untersucht. Ergebnis dieser Parametervariation ist, dass der konventionelle Bahntransport nun bei allen untersuchten Wirkungskomponenten aus dem Bereich Energieaufwand und Emissionen ungünstiger ist als der reine Lkw-Transport, da die anzurechnenden NO_x-Emissionen mit 119 % nunmehr ebenfalls höher sind als diejenigen der reinen Lkw-Transports. Komplementär zum Lkw wurden ergänzend noch zwei Parametervariationen im Bahntransport untersucht. Dies betrifft zunächst wiederum die Verringerung des Auslastungsgrads bei der Bahn. Auch durch diese Parametervariation sind keine nennenswerten Effekte festzustellen. Eine weitere Parametervariation berücksichtigt ein günstigeres Emissionsverhalten der Dieselloks. Auch bei dieser Parametervariation zeigt sich kein nennenswerter Effekt.

Weitere Parametervariationen im Rahmen der Planungsaufgabe Güterverkehr im ländlichen Raum betreffen den Transport von 15 t Massengut, ebenfalls auf der Relation Ravensburg - Pfullendorf. Zunächst wird wiederum untersucht, wie sich der Einsatz von Lkw auswirken würde, die der Abgasnorm EURO II entsprechen würden. Hier erhöhen sich die relativen, auf den reinen Lkw-Transport bezogenen CO-Emissionen des konventionellen Bahntransports um 11 % auf 162 %. Da aber der konventionelle Bahntransport bereits bei der Basisuntersuchung höhere Emissionen aufwies als der reine Lkw-Transport bleibt dieser Befund ohne nennenswerte Wirkung. Anders bei den NO_x-Emissionen. Hier führt die Erhöhung um 13 % auf nunmehr 113 % dazu, dass der konventionelle Bahntransport nun auch bei dieser Wirkungskomponente ungünstiger abschneidet als der reine Lkw-Transport. Eine weitere Parametervariation behandelt

die Einführung der Abgasnorm EURO III für die Lkw. Dies führt zwar zu drastischen Erhöhungen der relativen, auf den reinen Lkw-Transport bezogenen Emissionen für die Schadstoffe CO, NO_x und VOC, ändert aber nichts an der grundsätzlichen Bewertung, da bei diesen Schadstoffen der konventionelle Bahntransport bereits höhere bzw. gleich hohe (NO_x) Emissionen hatte als der reine Lkw-Transport. Auch für diese Transportaufgabe wurde als eine weitere Parametervariation die Einführung von Erdgas-Lkw untersucht. In diesem Fall weist nun der konventionelle Bahntransport einen deutlich niedrigeren notwendigen Energieaufwand auf als der reine Lkw-Transport. Allerdings hatte der Bahntransport bereits in der Basisbetrachtung einen geringeren Energieaufwand als der Lkw. Bei den CO₂-Emissionen ist kein nennenswerter Einfluß festzustellen. Die relativen CO-Emissionen der Bahn erhöhen sich drastisch auf nunmehr 260 %. Allerdings der Bahntransport bereits in der Basisbetrachtung höhere CO-Emissionen als der Lkw. Auch die relativen NO_x-Emissionen des Bahntransports erhöhen sich drastisch auf um 116 % 216 %, so dass der konventionelle Bahntransport nun höhere NO_x-Emissionen aufweist als der reine Lkw-Transport. Umgekehrt die VOC-Emissionen. Hier weist der konventionelle Bahntransport nun mit 32 % deutlich geringere Emissionen auf als der reine Lkw-Transport. In einer abschließenden Parametervariation wurden Dieselloks mit einem verbesserten Emissionsverhalten untersucht. Deutliche Effekte sind auch hier wiederum nur bei den CO-Emissionen festzustellen, die sich gegenüber der Basisuntersuchung um 55 % auf 81 % verringern. Damit wäre der konventionelle Bahntransport bei dieser Wirkungskomponente günstiger als der reine Lkw-Transport.

9.7 Alternative Berechnungsmethoden

Untersuchungen zu alternativen Berechnungsmethoden wurden nur für die Transportaufgabe Wagenladung 25 t auf der Relation Mannheim - Weil am Rhein durchgeführt.

In einer ersten Modifikation wurde untersucht, wie sich die relativen Energieverbräuche und Emissionen ändern würden, wenn der Transport mit dem einzelnen Verkehrsmittel nur für das zu transportierende Transportgut, in diesem Falle also 25 t Wagenladung, durchgeführt würde. Bündelungseffekte können somit nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass der reine Lkw-Transport beim notwendigen Energieaufwand sowie bei den CO₂- und VOC-Emissionen das günstigste Verkehrsmittel darstellt, wobei er dies für die VOC-Emissionen auch im Basisfall bereits war. Erstaunlich ist, dass auch bei dieser Berechnungsmethode bei den CO- und NO_x-Emissionen die drei Varianten des Bahntransports (Bahn Container, Bahn Trailerzug, Bahn konventionell) mit bei beiden Schadstoffen jeweils ca. 20 % der Werte des reinen Lkw-Transports wesentlich günstiger abschneiden als dieser. Das Binnenschiff spielt bei dieser Betrachtung

tungsweise erwartungsgemäß keine Rolle. Die Werte des Binnenschiffs liegen zwischen 5.178 % (Energieaufwand) und 11.151 % (NO_x).

In einer weiteren Variation der Berechnungsmethoden wurde untersucht, wie sich das relative Ergebnis im Vergleich der Verkehrsmittel verändert, wenn die sogenannte Grenzenergie betrachtet wird. Bei dieser Berechnungsmethode erfolgt kein Ausgleich der jeweiligen Gesamtaufwendungen über alle im jeweiligen Verkehrsmittel transportierten Güter, sondern es werden dem untersuchten Transportgut nur die Aufwendungen angerechnet, die durch dessen zusätzliche Beförderung notwendig sind. Dies führt bei den anzurechnenden notwendigen Energieaufwendungen und den CO₂-Emissionen für die drei Varianten des Bahntransports (Bahn Container, Bahn Trailerzug, Bahn konventionell) zu einer relativen Verringerung und beim Binnenschiff zu einer geringfügigen Erhöhung. Dadurch ändert sich auch die auf den reinen Lkw-Transport bezogene Reihung der Verkehrsmittel. Das günstigste Verkehrsmittel ist nun der konventionelle Bahntransport, gefolgt vom Containertransport mit der Bahn, dem Trailerzug und dem Binnenschiff. Bei den CO- und NO_x-Emissionen ist kein Effekt festzustellen. Bei den VOC-Emissionen ist wiederum eine moderate Verringerung der Emissionen bei den drei Typen des Bahntransports und eine geringfügige Erhöhung der Emissionen beim Binnenschiff erkennbar. Da aber alle zum reinen Lkw-Transport alternativen Verkehrsmittel bereits auch im Basisfall höhere VOC-Emissionen als der reine Lkw-Transport hatten, führt dies zu keiner Neubewertung.

Mit der dritten alternativen Berechnungsmethode wurde der Versuch gemacht, den Einfluß des notwendigen Aufbaus neuer Kapazitäten bei den zum Lkw alternativen Verkehrsmitteln zu untersuchen. Ein derartiger Ausbau der Kapazitäten ist notwendig, wenn größere Anteile der Güterverkehrsmenge vom Lkw auf Bahn und Binnenschiff verlagert werden soll. Bei derartigen Investitionsentscheidungen interessieren ferner die in der Vergangenheit bereits angefallenen Aufwendungen für die Infrastruktur nicht mehr. Bei einem umfassenden Vergleich der Umweltverträglichkeit der einzelnen Verkehrsmittel müssen in einer derartigen Entscheidungssituation für die Straße nur noch die künftig anfallenden Erhaltungsaufwendungen berücksichtigt werden, während für die auszubauenden Verkehrsmittel alle Aufwendungen, das heißt insbesondere auch die für die Herstellung der Verkehrswege einbezogen werden. Zur Abbildung dieser Situation wurden bei den Berechnungen die für die Herstellung der Straße notwendigen Aufwendungen nicht berücksichtigt, während für die drei Formen des Bahntransports (Bahn Container, Bahn Trailerzug, Bahn konventionell) diese Aufwendungen in den Berechnungen verblieben. Diese Berechnung führt zwar, wie methodisch zu erwarten, zu einer leichten Erhöhung der jeweiligen Werte für die zum Lkw alternativen Verkehrsmittel bei allen untersuchten Komponenten, eine nennenswerte Abweichung von der im Basisfall vorgefundenen Situation kann aber nicht festgestellt werden.

9.8 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bestätigen den Untersuchungsansatz. Pauschale Aussagen, welches Verkehrsmittel in einer bestimmten Situation als besonders umweltfreundlich oder sogar als "das umweltfreundlichste" bezeichnet werden kann, sind nicht möglich. Vielmehr hängt es tatsächlich von den aktuellen Randbedingungen ab, welchem Verkehrsmittel dieses Prädikat zugesprochen werden kann.

Auch für einzelne planerische Ansätze kann nicht generell gesagt werden, welches Verkehrsmittel konkret im Hinblick auf die Umweltwirkungen davon profitiert. Ein sehr augenfälliges Beispiel hierfür ist die Organisation des Stückgut-Transports über Güterverkehrszentren. Vom planerischen Ansatz einleuchtend, birgt diese Maßnahme ein hohes Bündelungspotenzial und damit ein hohes Potenzial zur Verringerung des notwendigen Energieaufwands und der Schadstoffemissionen. Die auf gegebene lokale Situationen aufbauende Untersuchung zeigt allerdings, dass durch die Bündelung der Transporte in den Güterverkehrszentren gegenüber der heute aktuellen Situation durchaus Mehrwege und daraus abgeleitet konterkarierende Effekte entstehen können. Generell kann gesagt werden, dass die Transportweiten insbesondere dann sehr stark variieren, wenn bei einzelnen Verkehrsmitteln gebrochene Verkehre auftreten. Aber auch auf den langen Transitrouten durch Baden-Württemberg ohne Umschläge gibt es in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen beträchtlichere Unterschiede. Dies betrifft in erster Linie Mehrwege bei der Bahn und beim Binnenschiff.

Die Energieaufwendungen des Umschlags und die damit verbundenen Emissionen spielen insbesondere beim Stückgut eine nennenswerte Rolle. Bei den anderen untersuchten Gütern spielt der Umschlag eine untergeordnete Rolle.

Die Auslastung der einzelnen Verkehrsmittel ist von großer Bedeutung für die den einzelnen Transportgütern zuzurechnenden Energieaufwendungen und Emissionen.

Der Einfluß der Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur sowie der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsmittel ist bei den einzelnen Transportaufgaben und umweltrelevanten Wirkungskomponenten unterschiedlich. Dies bestätigt aber den Untersuchungsansatz, diese Komponenten zu berücksichtigen.

Die untersuchten "neuartigen" Bahn-Alternativen Trailerzug, automatischer Einzelwagen und Massenguttransport mit Abrollcontainern zeigen in aller Regel keine Vorteile gegenüber den bekannten Verfahren des Bahntransports (Einzelwagen, Container), allerdings weisen sie meist günstigere Werte als der reine Lkw-Transport auf. Daher können sie in konkreten Entscheidungen des Einzelfalls durchaus eingebunden werden, da sie bei gegenüber dem konventionellen

Bahntransport flexibleren Einsatzmöglichkeiten in aller Regel eine geringere Umweltbelastung als der reine Lkw-Transport bewirken.

Die Berücksichtigung der EURO II - Abgas-Grenzwertstufe im Rahmen der Parametervariation erbrachte im Unterschied zu EURO III keine nennenswerten Veränderungen. Bei Berücksichtigung der Abgas-Grenzwertstufe EURO III ergeben sich Verbesserungen bei den CO-, NO_x- und VOC-Emissionen der Lkw. Welche Wirkung dies auf die umweltrelevante Reihung der Verkehrsmittel hat, ist allerdings wiederum vom Einzelfall abhängig. Die fallweise Untersuchung eines Erdgas-Lkw zeigt für diesen höhere VOC-Emissionen als für den Diesel-Lkw. Auch hier hängt die weitere Wirkung auf die Reihung der Verkehrsmittel von den örtlichen Randbedingungen ab. Deutlich negativ für den Lkw wirkte sich die Untersuchung eines schlechteren Verkehrsablaufs auf den Bundesautobahnen aus. Deutlich wirkt sich auch stets die Umstellung der Dieseltraktion auf Elektrotraktion aus. Dabei zeigen sich eindeutig die Spezifika der Bereitstellung dieser beiden Energieträger. So bleibt der notwendige Energieaufwand zwar gleich, die CO₂-, CO- und NO_x-Emissionen reduzieren sich aber deutlich, während die VOC-Emissionen ansteigen. Die Umstellung des Bahnstrom-Mix auf den in Baden-Württemberg üblichen Strommix zeigte insgesamt keine nennenswerten Effekte. Die Berücksichtigung im Emissionsverhalten verbesserter Diesellokomotiven zeigt nur bei den CO-Emissionen eine deutliche Wirkung. Die ebenfalls im Rahmen der Parametervariationen untersuchte Verringerung der Auslastung der Bahn führt wie zu erwarten zu einer Erhöhung deren notwendigen Energieverbrauchs und Schadstoffemissionen. Inwieweit dies die Reihung der Verkehrsmittel betrifft, hängt wiederum von den örtlichen Gegebenheiten ab.

Wird der Energieaufwand untersucht, der notwendig wäre, wenn nur das jeweils untersuchte Transportgut transportiert würde ("Alleinfahrt"), also auf Bündelungseffekte verzichtet würde, zeigt sich der Lkw als das günstigste Verkehrsmittel, während das Binnenschiff erwartungsgemäß mit großem Abstand am schlechtesten abschneidet. Bei Betrachtung der Grenzenergie verringern sich der notwendige Energieaufwand und die entsprechenden Schadstoffemissionen der Bahn geringfügig, während sie sich für das Binnenschiff geringfügig erhöhen. Die dritte untersuchte Berechnungsmethode, bei der die herstellungsbedingten Aufwendungen für die Straße nicht berücksichtigt werden, zeigt insgesamt keine nennenswerten Effekte.

Literatur

/ABA, 1996/

Autobahnbetriebsamt Singen, 1996:
Persönliche Auskunft von Herrn Becker

/ABB, 1995/

Materialaufstellung einer modernen Elektrolokomotive, Information der ABB Henschel AG, Kassel

/Adler, 1990/

Adler G. u. a., 1990:
Lexikon der Eisenbahn, Motorbuch Verlag, Stuttgart

/AEG, 1993/

Mengengerüst der Elektrolokomotive BR 112, Information der AEG Schienenfahrzeuge GmbH, Henningsdorf

/AG-EB, 1993/

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 1993:
Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland

/BAW, 1993/

Bundesamt für Wirtschaft (BAW), 1993:
Amtliche Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland, Monat Dezember und Jahr 1992, Eschborn

/Beyert, 1985/

Beyert J., 1985:
Ermittlung des Energieaufwands bei Bauprozessen - erläutert am Beispiel der Erstellung eines Straßenoberbaus,
Dissertation, RWTH Aachen

/Bialonski, 1990/

Bialonski, W., u. a., 1990:
Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr, Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche.
Forschungsbericht FE Nr. 90 247/88 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Verkehrswissenschaftliches
Institut, RWTH Aachen

/BMV, 1992/

Bundesministerium für Verkehr (BMV) (Hrsg.):
Bundesverkehrswegeplan 1992 (BVWP '92). Bonn, Juli 1995

/BMV, 1995a/

Bundesministerium für Verkehr (BMV) (Hrsg.):1995:
Straßen in Deutschland, Bonn

Literatur

/BMV, 1995b/

Bundesministerium für Verkehr (BMV), 1995:
Binnenschifffahrt und Bundeswasserstraßen Jahresbericht 1993/1994, Bonn

/BMV, 1995c/

Bundesministerium für Verkehr (BMV) (Hrsg.), 1995:
Verkehr in Zahlen 1995, Bonn.

/BMV, 1996/

Bundesministerium für Verkehr (BMV) (Hrsg.), 1996:
Verkehr in Zahlen 1996, Bonn.

/Bohn, 1987/

Bohn, C. und Bender, H., 1987:
Gleisvorbau auf Neubaustrecken, in: Eisenbahntechnische Rundschau 36 /1987/, H. 1/2 - Januar/Februar

/Conti, 1996/

Continental AG, 1996:
Reifengrundlagen Lkw, Druckschrift, Hannover

/DB, 1978/

Bundesbahndirektion Frankfurt (Main), Karten- und Luftbildstelle Mainz, 1978:
Streckenverzeichnis der Deutschen Bundesbahn (DB-StrVerz), Stand: 01.01.1991

/DB, 1990/

Deutsche Bundesbahn, 1990:
Bahn in Zahlen, Frankfurt, Deutsche Bundesbahn Zentrale, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

/DB, 1992/

Deutsche Bundesbahn, 1992:
Grundlage für die Preisermittlung im Ladungsverkehr

/DB, 1993/

Deutsche Bundesbahn und Deutsche Reichsbahn, 1993
Die Deutschen Bahnen 1992 - Daten und Fakten, Frankfurt/Berlin

/DBAG, 1995/

Deutsche Bahn AG (DBAG), 1995
Bahnstrombilanzen des Geschäftsbereiches Netz sowie persönliche Mitteilungen von Herrn Dr. J. Schaarschmidt,
Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Netz, Bahn-Stromversorgung, Berlin

/DBAG, 1996a/

Deutsche Bahn AG (DBAG) Regionalbereich Karlsruhe, 1996:
Persönliche Mitteilung von Herrn Gogolok

/DBAG, 1996b/

Deutsche Bahn AG (DBAG) Regionalbereich Karlsruhe und Stuttgart, 1996:
Streckenbelastungsliste Bst 70

/DBAG, 1996c/

Deutsche Bahn AG (DBAG) Regionalbereich Karlsruhe und Stuttgart, 1996:
Brückenverzeichnis

/DGGT, 1995/

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. /DGGT/, 1995:
Tunnelbau auf Neubaustrecken, in: Taschenbuch für den Tunnelbau 1995, Essen

/Drake, 1996/

Drake, F.-D., 1996:
Kumulierte Treibhausgasemissionen zukünftiger Energiesysteme, Berlin

/DST, 1996/

/Dübner, 1994/

Dübner, R., 1994:
Fahrbahndecken aus Asphalt, Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e. V. (ARBIT), Arbit Schriftenreihe Heft 59, Hamburg

/Elsener, 1993/

Elsener, J., Strub, P.: Materialbilanz für den Güterverkehr, Teil Infrastruktur und Fahrzeuge, Semesterarbeit an der ETH Zürich, Abt. XB Umweltnaturwissenschaften, Zürich 1993

/Enderlein, 1992a/

Enderlein, H., Kunert, U., 1992:
Ermittlung des Ersatzinvestitionsbedarfs für die Bundesverkehrswege, Beiträge zur Strukturforchung Heft 134, Verlag Duncker & Humblot, Berlin

/Enderlein, 1992b/

Enderlein, H., Link, H., 1992:
Berechnung der Wegekosten- und Wegeausgabendeckungsgrade für den Straßenverkehr in den alten Ländern der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1991, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Berlin

/Enquete, 1995/

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ (Hrsg.), 1995:
Umweltverträgliches Stoffstrommanagement, Band 5 Anwendungsbereich Mobilität und Sekundärrohstoffe, Economica Verlag, Bonn

/EZB, 1993/

Literatur

/Fahl, 1994/

Fahl, U., u.a.: Ermittlung des Energieeinsatzes und der CO₂ – Emissionen beim Einsatz unterschiedlicher Verkehrsmittel im Personenverkehr. Auftraggeber: Mercedes-Benz AG. Stuttgart, Februar 1994. (nicht veröffentlicht)

/Feldmann, 1988/

Feldmann, D., 1988:

Repetitorium der Ingenieur-Mathematik, Teil 2, Verlag C. Feldmann, Springe

/Fendrich, 1992/

Fendrich, L., 1992:

Die Oberbauinstandhaltung, in: Eisenbahningenieur 43 /1992/ 5

/FGSV, 1986/

/Frischknecht, 1994/

Frischknecht, R., u. a., 1994:

Ökoinventare für Energiesysteme, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, und des Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF), Zürich

/Fritsche, 1994/

Fritsche, U., u. a. (1994): Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 2.1, Erweiterter und aktualisierter Endbericht, Öko-Institut Darmstadt/Freiburg/Berlin/Kassel

/Grüter, 1995/

Grüter, R., u. a., 1995:

Oberbau und Brücken, ein kompliziertes Wechselspiel, in: Eisenbahn Ingenieur Kalender 1995, Tetzlaff Verlag, Hamburg

/GVP, 1995/

Hautzinger, H., Rothengatter, W., u. a., 1995:

Wissenschaftliche Begleituntersuchung Generalverkehrsplan Baden-Württemberg - Band I Prognosen und Wirkungsanalysen, Studie im Auftrag des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart

/Halberstadt, 1991/

Halberstadt, L., 1991:

Brückenbau mit Hilfe der Rahmenplanung, in: Eisenbahn Ingenieur Kalender 1991, Tetzlaff Verlag, Hamburg

/Harprecht, 1993/

Harprecht, W., u. a., 1993:

Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bundesbahn und der Deutschen Reichsbahn im Jahre 1992. In: Elektrische Bahnen 91 (1993), S. 3-19

/Hedden, 1994/

Hedden, K., Jess, A., 1994:

Instrumente für die Entwicklung von Strategien zur Reduktion energiebedingter Klimagasemissionen in Deutschland (IKARUS), Ikarus-Teilprojekt 4 „Umwandlungssektor“, Bereich Raffinerien und Ölveredelung, Bericht Nr. 4-04, Jülich

/Heimerl, 1992/

Heimerl, G., 1992:

Vorlesungsunterlagen der Vorlesung „Betrieb und Entwurf von Schienenbahnen“, Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart

/Henn, 1988/

Henn, W., 1988:

Oberbau und Erdbau in gemeinsamer Verantwortung für die Fahrwegerhaltung. In: Eisenbahntechnische Rundschau 37 (1988), H. 1/2 - Januar/Februar, S. 55-59

/Hitzler, 1995/

Hitzler, G., Mörgenthaler, V.

Strategien zur Verminderung verkehrsbedingter Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen in Ballungsgebieten. Forschungsbericht FZKA-PEF 128, Karlsruhe, April 1995.

/Hoffmann, 1995/

Hoffmann, C., u. a., 1995:

Kumulierter Energieaufwand und energieoptimierte Nutzungsdauer von Personenkraftwagen, Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Verkehr, München

/Ihle, 1996/

Ihle Reifen-GmbH, 1996:

Persönliche Auskunft von Herrn Stumpf, Günzburg

/INFRAS, 1995a/

Maibach, M., u. a., 1996:

Ökoinventar Transporte, SPP Umwelt, Modul 5, INFRAS, Zürich

/ISB, 1990/

Vorlesungsunterlagen der Vorlesung „Antriebstechnik von Schienenfahrzeugen“, Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen, Universität Hannover

/ISB, 1995/

Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen, 1995:

Studienarbeit „Sensitivitätsanalyse zum Einfluß unterschiedlicher Parameter auf die Ergebnisse der Fahrsimulation“, H. Maß, Hannover

Literatur

/ISB, 1996/

Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen, 1996:

Forschungsvorhaben „Ermittlung des Energieeinsparpotentials auf Basis von Simulationsrechnungen“ im Auftrag der DB AG, unveröffentlicht

/IVT, 1995/

/Jergas, 1992/

Jergas, E., 1992:

Energiebereitstellung und Lastgangverteilung. In: Eisenbahningenieur 42 (1992) 2, S 62-66

/John u.a., 1997/

John, C., Friedrich, R., Obermaier, A.; Seier, J.: Ermittlung der Emission von Ozonvorläuferstoffen in Baden-Württemberg. In: 13. Statuskolloquium des PEF vom 11. Bis 12. März 1997 im Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1997.

/Junkermann, 1990/

Junkermann, N., 1990:

Entwicklung eines rechnergestützten Instandhaltungskonzeptes für hochbelastete Eisenbahnstrecken, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau- und Betrieb, Universität Hannover

/Kaltschmitt, 1996/

Kaltschmitt, M., Reinhard, G., 1996:

Nachwachsende Energieträger - Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Vieweg, Braunschweig und Wiesbaden

/Kleinschmidt, 1993/

Kleinschmidt, H., 1993:

Umdruck zur Vorlesung „Elektrische Zugförderung“, Universität Stuttgart

/Knoll, 1994/

Knoll (Hrsg.), 1994:

Der Elsner Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen 1994, Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg

/Krüger, 1995/

Krüger, J., 1995:

Kumulierter Energieaufwand für die Kupfererzeugung und -verarbeitung - ein objektiver Maßstab der Bewertung? In: VDI-Berichte 1218 Kumulierter Energieaufwand, Düsseldorf

/Lastauto, 1993/

lastauto omnibus, 1993:

3500 Nutzfahrzeuge, Katalog 1993

/LHB, 1993/

Materialien des Schiebewandwagens Hbis 7 und eines Mineralölkesselwagens, Information der Linke-Hoffmann-Busch GmbH, Salzgitter

/LfS, 1995/

Landesamt für Straßenwesen (LfS), 1995:
Auszüge aus der Straßendatenbank, Stuttgart

/Liebscher, 1996/

Liebscher, P., u. a., 1996:
Möglichkeiten zur Minderung der VOC-Emissionen durch einen verstärkten Einsatz von alternativen Kraftstoffen und/oder Antrieben im Straßenpersonenverkehr von Baden-Württemberg, PEF-Projekt „Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen der Luftreinhaltung“, Förderkennzeichen PEF 494 002, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Stuttgart

/Linkerhägner, 85/

Linkerhägner, W., Lechnitz, W., 1985:
Tunnelbau bei den Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn, in: Eisenbahntechnische Rundschau 34 (1985), H. 6 - Juni

/Lünser, 1996/

Lünser, H., 1996:
Zur Berücksichtigung von Umweltbeeinflussungen beim Bewerten von Ingenieurbauwerken, Dissertation in Vorbereitung, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart

/Mauch, 1994/

Mauch, W.: Der kumulierte Energieaufwand von Lastkraftwagen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 96 (1994) 2, S. 116/124

/Mehltretter, 1986/

Mehltretter, J. M., 1996:
Elektrische Triebfahrzeuge - Entwicklungen der Deutschen Bundesbahn seit 1970 und ausländische Lösungen, Motorbuch Verlag, Stuttgart

/Michelin, 1996/

Michelin Reifenwerke-KGaA, 1996:
Persönliche Auskünfte, Karlsruhe

/MSW, 1996/

Meidericher Schiffswerft, 1996:
Persönliche Auskunft von Herrn Walzer, Duisburg

/Münchschwander, 1993/

Münchschwander, P., 1993:
Was kann der Fahrweg leisten?, in: Jahrbuch des Eisenbahnwesens 1993, Hestra Verlag, Darmstadt

/MWV, 1993/

Mineralölwirtschaftsverband (MWV), 1993:

Mineralöl-Zahlen 1992, Mineralölwirtschaftsverband e.V. Hamburg

/Obermeier, 1995/

Obermeier, A. u. a., 1995:

Photosmog: Möglichkeiten und Strategien zur Verminderung des bodennahen Ozons, ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg

/Rebmann, 1981/

Rebmann, K., 1981:

Logistik für die Oberbauerhaltung, in: Elsners Taschenbuch der Eisenbahntechnik 1981, Damstadt

/Schaefer, 1993/

Schaefer, H.:

Zur Definition des kumulierten Energieaufwands und seiner primärenergetischen Bewertung. In: VDI-Berichte 1093 Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen - Ihre Bedeutung für Ökobilanzen, VDI-Verlag, Düsseldorf

/Schiffer, 1993/

Schiffer, H. W., 1993:

Energiemarkt '92: In Energiewirtschaftliche Tagesfragen 43. Jg. (1993) Heft 3, S. 156-173

/Schroeder-Baumgart, 1993/

Schroeder-Baumgart, R., 1993:

Verhaltensprognose und Nutzen-Kosten-Analyse für die Oberbauinstandhaltung von Schienenbahnen, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau- und Betrieb, Universität Hannover

/Schroeder-Baumgart, 1995/

Schroeder-Baumgart, R., 1995:

/Schulz, 1995/

Schulz, J. u. a., 1995:

Bedeutung und Umweltwirkungen von Schienen- und Luftverkehr in Deutschland, Prognos AG, Basel

/Spitzer, 1996/

Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt, 1996:

Persönliche Auskunft von Herrn Spitzer, Düsseldorf

/Steierwald, 1993/

Steierwald, G., u.a.: Systemvergleich für unterschiedliche verkehrliche Prozeßabläufe und Transportketten hinsichtlich des Energieeinsatzes und klimarelevanter Emissionen im Güterverkehr- Endbericht. In: Studienprogramm, Band 4 "Verkehr", Teilband II, herausgegeben von der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages. Bonn: Economica Verlag GmbH, 1994.

/Steierwald, 1994/

Steierwald, G., u.a., 1994

Verkehr, Teilband II, Studie C „Systemvergleich für unterschiedliche Prozeßabläufe und Transportketten hinsichtlich des Energieeinsatzes und klimarelevanter Emissionen im Güterverkehr“. Studie im Auftrag der Enquete Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Bonn

/Steinle, 1993/

Persönliche Auskunft von Herrn Renz, Spedition Steinle, Schwieberdingen

/Stekeler, 1996/

Stekeler, J., 1996:

Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und der kumulierten Emissionen der Infrastruktur- und der Fahrzeugbereitstellung im Güterverkehr. Arbeitspapier ESA-96-2, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

/Stiller, 1993/

Stiller, H., 1993:

Material Consumption in Transport Infrastructure, Fresenius Envir Bull 2, S. 467-472, Basel, sowie persönliche Auskünfte

/Stiller, 1995/

Stiller, H., 1995:

Materialintensitätsanalysen von Transportdienstleistungen (2) - Binnenschifffahrt, Wuppertal Papers Nr. 41, Wuppertal Institut

Strategisches Instrumentarium zur Bewertung von Oberbaukosten /SBO/ - ein Einflußgrößenverfahren, in: Eisenbahntechnische Rundschau 44 (1995), H. 3 - März

/TÜV Rheinland, 1993/

/UBA, 1993/

Umweltbundesamt, 1993:

Persönliche Mitteilung, Berlin

/UBA, 1994/

/UBA, 1995/

/VBW, 1985/

/VBW, 1992/

/VBW, 1990/

/VBW, 1994/

Literatur

/VDEW, 1993/

Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW), 1993:
Die öffentliche Stromversorgung 1992, Frankfurt/Main

/VDEW-BW, 1994/

Verband der Elektrizitätswerke Baden-Württemberg e. V., 1994:
Statistik der Elektrizitätsversorgungsunternehmen, Industriebetriebe und anderer Werke in Baden-Württemberg für
das Jahr 1992, Stuttgart

/VDI, 1995/

Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 1995: VDI-Richtlinie 4600 (Entwurf) Kumulierter Energieaufwand, Begriffe,
Definitionen, Berechnungsmethoden. In: VDI-Handbuch Energietechnik, Düsseldorf.

/VIK, 1993/

Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft (VIK), 1993:
Statistik der Energiewirtschaft 1992/93, Essen

/VMBW, 1995/

Verkehrsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):
Generalverkehrsplan Baden-Württemberg 1995, Stuttgart, Juli 1995.

/VRS, 1997/

Verband Region Stuttgart (Hrsg.):
Begleituntersuchungen zum Regionalverkehrsplan, Band 4.

/Weber, 1995/

Weber, Ch., 1995:
Untersuchungen zum kumulierten Energieaufwand von Produktgruppen mit Hilfe der energetischen Input-Output-
Analyse. In: VDI-Berichte 1218 Kumulierter Energieaufwand, Düsseldorf

/Weska, 1993/

/WiMi, 1994/

Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 1994:
Energiebericht Baden-Württemberg '93, Stuttgart

/WSD, 1996/

Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest (WSD Südwest), persönliche Auskunft von Herrn Neumann, Mainz