

**Analyse von kumuliertem Energieaufwand,
Emissionen und Kosten
beim Ausbau der Verkehrsinfrastruktur
zur Ergänzung eines Optimierungsmodells**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs

Fachbereich 12
Maschinenwesen
Energietechnik – Maschinenteknik – Verfahrenstechnik
der Universität Gesamthochschule Essen

vorgelegt von
Diplom-Physiker Peter Gebauer
geb. in Rosenheim

Juni 1999

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorgehensweise bei den Untersuchungen der Infrastruktur und ausgewählte Methoden	3
2.1	Vorgehensweise	4
2.2	Grundlagen der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwands . .	7
2.2.1	Definition	7
2.2.2	Bilanzierungsmethoden	8
2.3	Grundlagen eines energiewirtschaftlichen Optimierungsmodells . .	10
2.3.1	Allgemeines Verhalten	10
2.3.2	Mathematische Formulierung	11
2.3.3	Möglichkeiten und Grenzen des Optimierungsmodells . . .	12
2.3.4	Ziele des IKARUS-Projektes	14
3	Berechnung von kumuliertem Energieaufwand und CO₂-Emissionen beim Bau der Infrastruktur	15
3.1	Datenerhebung	17
3.1.1	Daten für Beispielprojekte	17
3.1.2	Spezifische Materialdaten	20
3.1.3	Nicht-CO ₂ -Emissionen	21
3.2	Bilanzierung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen anhand von Beispielprojekten	24
3.2.1	Vorgehensweise	24
3.2.2	Fehlerrechnung	25
3.2.3	Systemgrenzen, Annahmen und Vereinfachungen	25
3.3	Ergebnisse der Bilanzierung	28
3.4	Einteilung der Verkehrsnetze in Korridore	36
3.5	Übertragung der Beispielprojekte auf die Korridore	38
4	Einbindung der Infrastruktur in das Optimierungsmodell	41
4.1	Erhebung von Belastungsdaten der Verkehrsnetze	45
4.2	Umrechnung der Belastungsdaten als Datengrundlage zur Infrastrukturberechnung	48

4.2.1	Anteile der Korridore an der Belastung	48
4.2.2	Berechnung der Spitzenbelastung	50
4.2.3	Bedeutung der Spitzenbelastung für die Berechnung des Infrastrukturausbaus	52
4.3	Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung und ihre Wirkung	52
4.4	Kosten, kumulierter Energieaufwand und Emissionen der Maßnah- men	55
4.5	Berechnung des Infrastrukturausbaus	56
4.5.1	Modell zur Berechnung des Infrastrukturausbaus	56
4.5.2	Berechnung der Kapazität der Verkehrsnetze	58
4.5.3	Auswahl der Maßnahmen zum Ausbau	64
4.5.4	Iteratives Vorgehen	65
5	Eingangsdaten für den Verkehrssektor des IKARUS- Optimierungsmodells	67
5.1	Daten der Fernverkehrsnetze	69
5.1.1	Begrenzung der vorhandenen Kapazität im Optimierungs- modell	69
5.1.2	Kosten der vorhandenen Infrastruktur	70
5.1.3	Einbindung des Infrastrukturausbaus in das Optimierungs- modell	71
5.1.4	Umrechnung der Daten für das Optimierungsmodell	72
5.2	Daten der Nahverkehrsnetze	72
5.2.1	Nahverkehr auf der Straße	73
5.2.2	Schienennahverkehr	73
5.3	Allgemeine Eingangsdaten für das Optimierungsmodell	74
5.3.1	Annahmen im Optimierungsmodell	74
5.3.2	Nachfragen	75
5.3.3	Energiepolitische Randbedingungen	76
5.4	Daten der Verkehrstechniken für das Optimierungsmodell	77
5.4.1	Struktur und Annahmen im Verkehrssektor	77
5.4.2	Kostendaten der Fahrzeuge	79
5.4.3	Emissionsdaten der Fahrzeuge	79
5.4.4	Energiedaten der Fahrzeuge	80
5.4.5	Randbedingungen im Verkehrssektor	81
6	Rechnungen mit dem Optimierungsmodell	87
6.1	Szenarien der Optimierungsrechnungen	89
6.2	Ergebnisse der Optimierungsrechnungen	90
6.2.1	Ergebnisse der Trendszenarien	91
6.2.2	Ergebnisse der Basisszenarien	92
6.2.3	Ergebnisse der Reduktionsszenarien	98
6.2.4	Kostenanteile im Verkehrssektor	103

6.2.5	Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse	106
6.3	Sensitivitätsuntersuchung	107
6.4	Einfluss der Einbindung der Infrastruktur	112
7	Ergebnisse der Bilanzierung und der Berechnung des Infrastrukturausbaus	115
7.1	Kumulierter Energieaufwand und Emissionen des Infrastrukturausbaus	115
7.1.1	Mittlerer kumulierter Energieaufwand und mittlere Emissionen bei Verkehrswegebauten	117
7.1.2	Kumulierter Energieaufwand und Emissionen in den Korridoren	121
7.1.3	Ergebnis der Berechnung der Ausbauprojekte	124
7.1.4	Vergleich von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen des Ausbaus von Straßen- und Schienennetz	128
7.1.5	Emissionen und Energieeinsatz bei Ausbau und Nutzung der Infrastruktur	134
7.2	Analyse der Eignung der Methoden	140
7.2.1	Materialbilanzmethode	141
7.2.2	Infrastrukturmodell	141
7.2.3	Optimierungsmodell	143
8	Zusammenfassung	145
A	Merkmale der Verkehrswege	159
A.1	Aufbau des Straßenoberbaus	159
A.1.1	Betonfahrbahn	160
A.1.2	Bitumenfahrbahn	162
A.2	Aufbau des Schieneneroberbaus	162
A.2.1	Aufbau einer festen Fahrbahn	163
A.2.2	Aufbau eines Schotterbettes	164
A.3	Kunstbauwerke	164
A.3.1	Tunnelaufbau	165
A.3.2	Großbrücken	166
B	Spezifische Daten zur Bilanzierung der Beispielprojekte	169
C	Bilanzen der Beispielprojekte	173
D	Materialtabellen der Beispielprojekte	179
E	Emissionen der baulichen Maßnahmen im Infrastrukturmodell	211

Tabellenverzeichnis

3.1	<i>Spezifischer kumulierter Energieaufwand der in den Bilanzen von Beispielprojekten eingesetzten Materialien</i>	22
3.2	<i>In die Bilanzen eingehende Materialmischungen</i>	23
3.3	<i>Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Neubau von Fernstraßen</i>	30
3.4	<i>Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Ausbau von Fernstraßen</i>	32
3.5	<i>Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Bau von Anschlussstellen</i>	33
3.6	<i>Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Bau von Tunnelbauwerken</i>	34
3.7	<i>Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Bau von Großbrücken</i>	34
3.8	<i>Ergebnisse der Bilanz des kumulierten Energieaufwands der Schienenwegeprojekte</i>	35
3.9	<i>Übersicht über statistische Daten der Autobahnen als Eingangsdaten in die Korridoraufteilung</i>	40
4.1	<i>Anteile der Belastung in den Korridoren an der Gesamtbelastung als Eingangsdaten in die Koradoreinteilung</i>	49
4.2	<i>Übersicht über kapazitätserhöhende Maßnahmen</i>	56
4.3	<i>Kosten der baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell</i>	57
4.4	<i>KEA der baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell</i>	57
5.1	<i>Das Optimierungsergebnis bestimmende Nachfragen</i>	75
5.2	<i>Das Optimierungsergebnis bestimmende energiepolitische Beschränkungen</i>	76
5.3	<i>Herstellungskosten von ausgewählten Fahrzeugen als Eingangsdaten in das Optimierungsmodell</i>	79
5.4	<i>Vorgaben der Begrenzungen im Verkehrssektor</i>	86
6.1	<i>Gesamtkosten der Fahrzeuge im Optimierungsergebnis</i>	104

VIII

7.1	<i>Ergebnis der Bilanzen: Mittlerer kumulierter Energieaufwand und mittlere Emissionen beim Ausbau von Verkehrswegenetzen</i>	118
7.2	<i>Ergebnis der Berechnung des Infrastrukturmodells: Maßnahmen und die entsprechende Kapazitätserweiterung</i>	122
7.3	<i>Kumulierter Energieaufwand und Emissionen der vom Infrastrukturmodell berechneten Bahnprojekte</i>	126
7.4	<i>Kumulierter Energieaufwand und Emissionen der vom Infrastrukturmodell berechneten Straßenprojekte</i>	128
7.5	<i>Ergebnisdarstellung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen in Bezug auf die zusätzliche Kapazität</i>	130
7.6	<i>Ergebnisdarstellung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen in Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung</i>	132
7.7	<i>Ergebnisdarstellung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen in Bezug auf die zusätzliche Verkehrsleistung</i>	133
7.8	<i>Ergebnisdarstellung des Verhältnisses von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen des Infrastrukturausbaus zu Energieeinsatz und Emissionen durch die zusätzliche Fahrleistung</i>	136
7.9	<i>Ergebnis der Strukturänderung der Jahre 2005 und 2020 im Verkehrssektor gegenüber 1989: Verminderung der CO₂-Emissionen .</i>	139

Abbildungsverzeichnis

2.1	<i>Schema der Vorgehensweise mit den wichtigsten Datenflüssen. . .</i>	5
2.2	<i>Schema einer Prozesskette</i>	9
3.1	<i>Schema der in Kapitel 3 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.</i>	16
3.2	<i>Kumulierter Energieaufwand für Autobahnneubauten</i>	31
3.3	<i>Kumulierter Energieaufwand für Autobahnausbauten</i>	32
3.4	<i>Karte der Korridoreinteilung der Verkehrswege</i>	37
4.1	<i>Schema der in Kapitel 4 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.</i>	42
4.2	<i>Schema der vorgenommenen Berechnungen und Verknüpfungen .</i>	44
4.3	<i>Lastganglinien einer Beispielautobahn</i>	47
4.4	<i>Zeitreihenvergleich von Fahrleistungen, Netzlängen und Belastungen der Verkehrsnetze</i>	53
4.5	<i>Annahmen über Einhaltequoten der Sicherheitsabstände zur Berechnung der Autobahnkapazität</i>	60
4.6	<i>Annahmen über Sicherheitsabstände</i>	60
4.7	<i>Darstellung der Ergebnisse der Kapazitätsberechnung: Abhängigkeit der Kapazität von Autobahnen von der Geschwindigkeit . . .</i>	63
4.8	<i>Schema des iterativen Vorgehens der Infrastrukturberechnung . .</i>	65
5.1	<i>Schema der in Kapitel 5 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.</i>	68
5.2	<i>Schema der Struktur des Verkehrssektors im Optimierungsmodell</i>	78
5.3	<i>Daten im Optimierungsmodell: Energiebedarf verschiedener Pkw-Antriebe</i>	81
6.1	<i>Schema der in Kapitel 6 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.</i>	88
6.2	<i>Optimierungsergebnis: Primärenergieeinsatz, CO₂-Emissionen und Nachfragen in den Jahren 1989, 2005 und 2020</i>	92
6.3	<i>Optimierungsergebnis: Einsatz von Primärenergieträgern in den Basisszenarien der Jahre 1989, 2005 und 2020</i>	94

6.4	<i>Optimierungsergebnis: Verkehrstechniken in den Basisszenarien (1989, 2005 und 2020)</i>	96
6.5	<i>Optimierungsergebnis: CO₂-Emissionen der Sektoren in den Basisszenarien (1989, 2005 und 2020)</i>	98
6.6	<i>Optimierungsergebnis: CO₂-Emissionen der Sektoren im Reduktionsszenario (1989 und 2005)</i>	100
6.7	<i>Optimierungsergebnis: Änderungen im Verkehrssektor durch die Reduktionsforderungen in den Jahren 2005 und 2020</i>	102
6.8	<i>Optimierungsergebnis: Spezifische Kosten und Grenzkosten der CO₂-Reduktion</i>	103
6.9	<i>Optimierungsergebnis: Transportkosten durch ausgewählte Verkehrsträger</i>	105
6.10	<i>Sensitivität des Verkehrssektors bei Parametervariation</i>	109
7.1	<i>Einordnung der Ergebnisse der Infrastrukturberechnung in den Untersuchungsablauf</i>	116
7.2	<i>Bilanzergebnis: Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionen durch Bau und Ausbau von Verkehrswegen</i>	120
7.3	<i>Bilanzergebnis: Klimagasemissionen durch Bau und Ausbau von Verkehrswegen</i>	121
7.4	<i>Ergebnisdarstellung des kumulierten Energieaufwands der Maßnahmen in Bezug auf die Kapazität</i>	131
7.5	<i>Ergebnisdarstellung des kumulierten Energieaufwands der Maßnahmen in Bezug auf die zusätzliche Verkehrsleistung</i>	134
7.6	<i>Ergebnisdarstellung des kumulierten Energieaufwands der Herstellung und des Energieeinsatzes der Nutzung der Infrastruktur</i>	138
A.1	<i>Regelquerschnitte Autobahn</i>	160
A.2	<i>Schichten von Betonfahrbahnen</i>	161
A.3	<i>Schichten von bituminösen Fahrbahnen</i>	162
A.4	<i>Schichten einer Festbettfahrbahn für Schienenwege</i>	164
A.5	<i>Querschnitt einer zweispurigen Bahnstrecke</i>	165
A.6	<i>Querschnitt eines Straßentunnels</i>	166
A.7	<i>Querschnitt von Brückenüberbauten</i>	167
C.1	<i>Lage der Straßen-Beispielprojekte (Karte)</i>	174
C.2	<i>Lage der Schienen-Beispielprojekte (Karte)</i>	176

Abkürzungen und Erläuterungen

Begriff	Abkürzung	Erläuterung
alte Bundesländer	ABL	auch „westliche Bundesländer“.
Bundesautobahn	BAB	
Bundesverkehrswegeplan	BVWP	im unregelmäßigen Abstand einiger Jahre von der Bundesregierung aufgestellte längerfristige Planung der Bundesfernstraßen, Schienen- und Wasserwege inklusive Kosten-/Nutzenrechnung. Der BVWP von 1992 wurde in dieser Arbeit verwendet und umfasst den Zeitraum bis 2012. [BMV92]
Durchschnittlicher Täglicher Verkehr	DTV	über alle Tage eines Jahres (oder die Wochentage eines Jahres, z.B. freitags) gemittelte Anzahl an Fahrzeugen auf einem Straßenabschnitt.
Fahrleistung		von Fahrzeugen zurückgelegte Entfernung; sie ergibt sich aus der Division der Verkehrsleistung durch die Besetzungszahl. Einheit: Fahrzeugkilometer (Fzgkm).
Fernverkehr		alle Wege über 50 km.
gebundener Verkehr		im Gegensatz zu wahlfreiem Verkehr auf einen bestimmten Verkehrsträger angewiesener Verkehr.
Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien	IKARUS	Im IKARUS-Projekt wurde ein Programmsystem zur Untersuchung von Reduktionsmöglichkeiten von Klimagasemissionen erstellt.
Kumulierter Energieaufwand	KEA	die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an Energie, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann.
Lineares Optimierungsprogramm	LP	optimiert eine lineare Zielfunktion (in dieser Arbeit werden die Kosten minimiert), die durch ein lineares (Un-)Gleichungssystem eingeschränkt ist.

XII

maßgebende stündliche Verkehrsstärke	MSV	Anzahl an Fahrzeugen auf einem Autobahnabschnitt in der dreißigst-höchstbelasteten Stunde des Jahres. [BfS87]
Mobilität		im weiteren Sinn die Bewegung von Personen oder die Möglichkeit dazu; im engeren Sinn die Anzahl der Wege, die Personen an einem Tag zurücklegen.
Modal Split		Aufteilung des Verkehrs auf verschiedene Verkehrsmittel.
Nahverkehr		in dieser Arbeit alle Wege mit einer Länge unter 50 km; es werden nur motorisierte Verkehre betrachtet.
neue Bundesländer	NBL	Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen; auch „östliche Bundesländer“.
Prozesskette		beinhaltet alle Produktionsschritte von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Deponierung bzw. die verschiedenen Recyclingschritte.
Schwerverkehr		Busse und schwere Lkw.
Telematik		Kunstwort aus Telekommunikation und Informatik. Beinhaltet alle Möglichkeiten der Verkehrseinflussung auf Grund der Verarbeitung aktueller Verkehrsinformationen.
Verkehrsleistung		auch Verkehrsnachfrage; Personen oder Güter, die eine Entfernung zurücklegen oder zurücklegen sollen; Einheit: Personenkilometer (Pkm) oder Tonnenkilometer (tkm), also z.B. Anzahl der Personen multipliziert mit der zurückgelegten Entfernung.

Formelzeichen

Zeichen	Erläuterung	Gleichung	Seite
A	Verflechtungsmatrix im Optimierungsmodell	2.2	12
\vec{x}	Vektor der Strukturvariablen im Optimierungsmodell; jede Komponente entspricht der Aktivität einer Technik	2.2	12
\vec{b}	Vektor der Einschränkungen der Aktivitäten der Techniken im Optimierungsmodell	2.2	12
\vec{c}	Vektor mit Kostenkoeffizienten der Techniken im Optimierungsmodell		12
\vec{l}	Vektor mit unteren Schranken der Techniken im Optimierungsmodell (lower limit)	2.2	12
\vec{u}	Vektor mit oberen Schranken der Techniken im Optimierungsmodell (upper limit)	2.2	12
Q_r, Q_l	Anzahl der Fahrzeuge auf dem rechten bzw. linken Fahrstreifen bei der Kapazitätsberechnung für Autobahnen	4.1	59
v_r, v_l	Durchschnittliche Geschwindigkeit auf dem rechten bzw. linken Fahrstreifen bei der Kapazitätsberechnung für Autobahnen	4.1	59
S	Durchschnittliche Länge, die ein Fahrzeug beansprucht, d.h. Fahrzeuglänge und Sicherheitsabstand	4.1	59
t	Bezugsdauer der Fahrzeugzählung	4.1	59
S_p, S_l	Durchschnittlicher Abstand zwischen Pkw bzw. Lkw	4.2	59
λ	Schwerverkehrsanteil	4.2	59
\bar{v}	Durch Überholvorgänge verminderte Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem linken Fahrstreifen	4.4	61
P	Durchschnittliche Leistung der überholenden Fahrzeuge	4.6	61
m	Durchschnittliche Masse der überholenden Fahrzeuge	4.6	61
Δv	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen linkem und	4.6	61

rechtem Fahrstreifen

Zeichen	Erläuterung	Gleichung	Seite
Δs	zusätzlicher Abstand auf der linken Spur, der durch das Überholen eines Fahrzeuges entsteht	4.6	61
k_p	spezifische Kosten des Ausbaus, die dem Personenverkehr zugerechnet werden können		72
K	Herstellungskosten des Ausbaus		72
g	Gewichtung der Herstellungskosten		72
F_{zP}	Zusätzliche Fahrleistung im Personenverkehr		72
G_P, G_G	Gewichtungsfaktoren zur Kostenzurechnung zu Personen- und Güterverkehr		72
F_P, F_G	Fahrleistungen im Personen- und Güterverkehr		72

Kapitel 1

Einleitung

Mobilität ist sowohl für den einzelnen Menschen als auch für die Wirtschaft ein hohes Gut. Dies zeigt sich unter anderem in der Bedeutung, die der Verkehr als umgesetzte Mobilität in Produktions- und Dienstleistungsbereichen hat. Mehr als zwei Millionen Arbeitsplätze hängen in Deutschland direkt oder indirekt vom Verkehrssektor ab, dies entspricht etwa jedem sechsten bis siebten Arbeitsplatz. Davon ist knapp die Hälfte vom Straßenfahrzeugbau abhängig. Die Branche Fahrzeugbau hatte 1990 einen Anteil von etwa 13 % am Bruttoinlandsprodukt. Ebenso sind die Einnahmen aus Mineralöl- und KFZ-Steuer für die öffentlichen Haushalte bedeutend. Im Jahre 1994 lagen sie bei ca. 88 Mrd DM. Von diesen Einnahmen wird ein großer Anteil (58 Mrd DM) wieder im Verkehrssektor investiert, davon knapp 60 % in den Ausbau der Verkehrswege¹.

Der Beschluss der Bundesregierung, die Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2005 um 25 % gegenüber 1990 zu senken, führte zu der Initiierung des IKARUS-Projektes. In dem Projekt wurde ein Instrumentarium erstellt, mit dem Strategien entwickelt werden können, die die Reduktion von Klimagasemissionen in der Energiewirtschaft ermöglichen. Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes ist ein lineares Optimierungsmodell, mit dessen Hilfe die volkswirtschaftlich günstigste Mischung von Primärenergien und Techniken ermittelt werden kann. Dabei kann in der Rechnung die Emission von CO₂ auf einen maximal zulässigen Wert begrenzt werden.

In der deutschen Energiewirtschaft benötigt der Verkehrssektor etwa ein Fünftel der Primärenergie und hat einen entsprechenden Anteil an den Kohlendioxidemissionen. Die Mobilität wird in Zukunft weiter wachsen und damit auch – sowohl im Güter- als auch im Personenverkehr – die Nachfrage nach Verkehrsleistung. Vielfach begrenzt jedoch schon heute die Infrastruktur das Wachstum, so dass das Verkehrsnetz ausgebaut werden muss. Dadurch entstehen der Volkswirt-

¹ohne Grunderwerb und ohne Wasserwege; 8,8 Mrd DM für den Schienenwegebau, 26,2 Mrd DM für den Straßenbau.

schaft erhebliche Belastungen. Ein energiewirtschaftliches Modell, das volkswirtschaftliche Kosten minimiert, sollte darum Kosten und Kapazität der vorhandenen Infrastruktur und ihrer Ausbaumöglichkeiten enthalten. Ihre Anrechnung kann zu einer Verschiebung der Modellergebnisse führen. Für das Optimierungsmodell im IKARUS-Projekt wurden in dieser Arbeit die Kosten- und Kapazitätsdaten berechnet und ihr Einfluss auf die Rechnungen untersucht. Der Ausbau der Infrastruktur ist mit einem kumulierten Energieaufwand (KEA) verbunden. Durch diesen entstehen „versteckte“ Emissionen, die mit den Emissionen der Nutzung verglichen werden. Dadurch kann eingeschätzt werden, ob die zusätzlichen Emissionen in der Herstellung eine Reduktion in der Nutzung überwiegen.

Basis für die in dieser Arbeit betrachteten Ausbauprojekte ist der Bundesverkehrswegeplan (BVWP), der die geplanten Investitionen in die Fernverkehrswege bis zum Jahr 2012 umfasst. In der vorliegenden Arbeit werden KEA und Emissionen für diese Projekte bilanziert und die Infrastruktur in das Optimierungsmodell einbezogen. Dadurch kann im Zusammenhang mit der Kostenminimierung des gesamten Energiesektors auch ein kostenminimaler Verkehrssektor einschließlich des Infrastrukturausbaus berechnet werden. Eine solche Verbindung von Energiewirtschaft, Verkehrssektor und Untersuchung der Infrastruktur liegt außerhalb der Schwerpunkte bisheriger Modelle.

Kapitel 2

Vorgehensweise bei den Untersuchungen der Infrastruktur und ausgewählte Methoden

Das Optimierungsmodell des IKARUS-Projektes berechnet kostenminimale Möglichkeiten zur Befriedigung extern vorgegebener Nachfragen nach Energiedienstleistungen. Dazu bildet das Modell die gesamte Energiewirtschaft mit ihren Verflechtungen ab, wobei der Verkehrssektor auf Grund des Energieeinsatzes (im Jahr 1990 etwa ein Viertel des Endenergieeinsatzes der Bundesrepublik) eine große Bedeutung hat. Bisher wird der Verkehrssektor im Modell ohne Infrastruktur abgebildet. Diese Abbildung setzt die Kenntnis von Kosten und Kapazitäten der Infrastruktur voraus. Allerdings werden im Verkehrssektor des Optimierungsmodells ohne Berechnung der Infrastrukturkosten nur eingeschränkt korrekte Ergebnisse erzielt. Die Lösung einer Optimierungsrechnung hängt wesentlich von den Kostendifferenzen der Verkehrsträger ab und setzt daher die Anrechnung aller Kosten, auch der Infrastrukturkosten, voraus. Daher ist für eine kostenminimale Lösung unter Beachtung aller Aspekte die Anrechnung der Infrastrukturkosten wichtig.

Die Kapazität der Verkehrsnetze lässt es in der Realität nicht zu, dass ein einziger Verkehrsträger den gesamten Bedarf an Verkehrsleistung deckt. Um realistische Ergebnisse zu erhalten, ist daher eine Einbindung der Infrastrukturkapazität in das Optimierungsmodell notwendig.

Das Optimierungsmodell berechnet kostengünstige Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Eine Verminderung der CO₂-Emissionen kann im Verkehrssektor unter anderem durch eine Verkehrsverlagerung erreicht werden. Diese Verlagerung macht, wenn die Kapazität nicht ausreicht, einen Infrastruktur-

ausbau nötig, der seinerseits zusätzliche Emissionen verursacht. Ein Vergleich zwischen den Emissionen durch Ausbau und Nutzung ermöglicht die Beurteilung der gesamten Reduktion durch eine Verkehrsverlagerung. Das Optimierungsmodell ist in der Lage, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Methan, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (KWS), Stickoxide und Schwefeldioxid zu bilanzieren. Daher werden der kumulierte Energieaufwand (KEA) und diese Emissionen beim Ausbau der Infrastruktur in dieser Arbeit bilanziert. Dabei werden (außer für Sprengstoff) nur energiebedingte Emissionen berechnet.

Um die Berechnungen der notwendigen Daten durchführen zu können und die Interpretation der Modellergebnisse zu ermöglichen, werden als grundlegende Methoden die Konzepte des KEA und des Optimierungsmodells benötigt. Diese werden in diesem Kapitel (Abschnitt 2.2 und 2.3) kurz zusammengefasst.

Diese Arbeit erfordert die Zusammenführung einer großen Zahl unterschiedlicher Daten. Die Vorgehensweise bei dieser Zusammenführung ist im folgenden Abschnitt erläutert.

2.1 Vorgehensweise

In dieser Arbeit werden

- die Kosten der vorhandenen Infrastruktur und ihres Ausbaus,
- die Kapazität der vorhandenen Infrastruktur und ihres Ausbaus,
- der kumulierte Energieaufwand des Infrastrukturausbaus und
- die Emissionen des Infrastrukturausbaus

berechnet. Abbildung 2.1 zeigt ein Schema der Vorgehensweise mit einer Übersicht der Eingangsdaten, der Zwischenergebnisse und der Ergebnisdaten. Anhand dieses Schemas werden zu Beginn der folgenden Kapitel die jeweiligen Inhalte graphisch dargestellt. Wesentliche Schritte im Vorgehen sind die Einteilung von Daten, die für die Verkehrsnetze relevant sind, in Korridore, die Bilanz von KEA und Emissionen von Ausbauprojekten, das Infrastrukturmodell und das Optimierungsmodell. Als Modelle sind in der Abbildung Schritte gekennzeichnet, die in Abgrenzung zu den Rechnungen von komplexerer Natur sind und mehrere Rechenschritte beinhalten. So wird im Infrastrukturmodell die Spitzenbelastung und die Kapazität berechnet und aus dem Vergleich der Größen wird auf den notwendigen Ausbau geschlossen, für den Kosten, KEA und Emissionen berechnet werden. Das Optimierungsmodell beinhaltet eine Vielzahl von Variablen und Gleichungen und ist schon auf Grund dieser Menge nicht als einfache Rechnung zu bezeichnen.

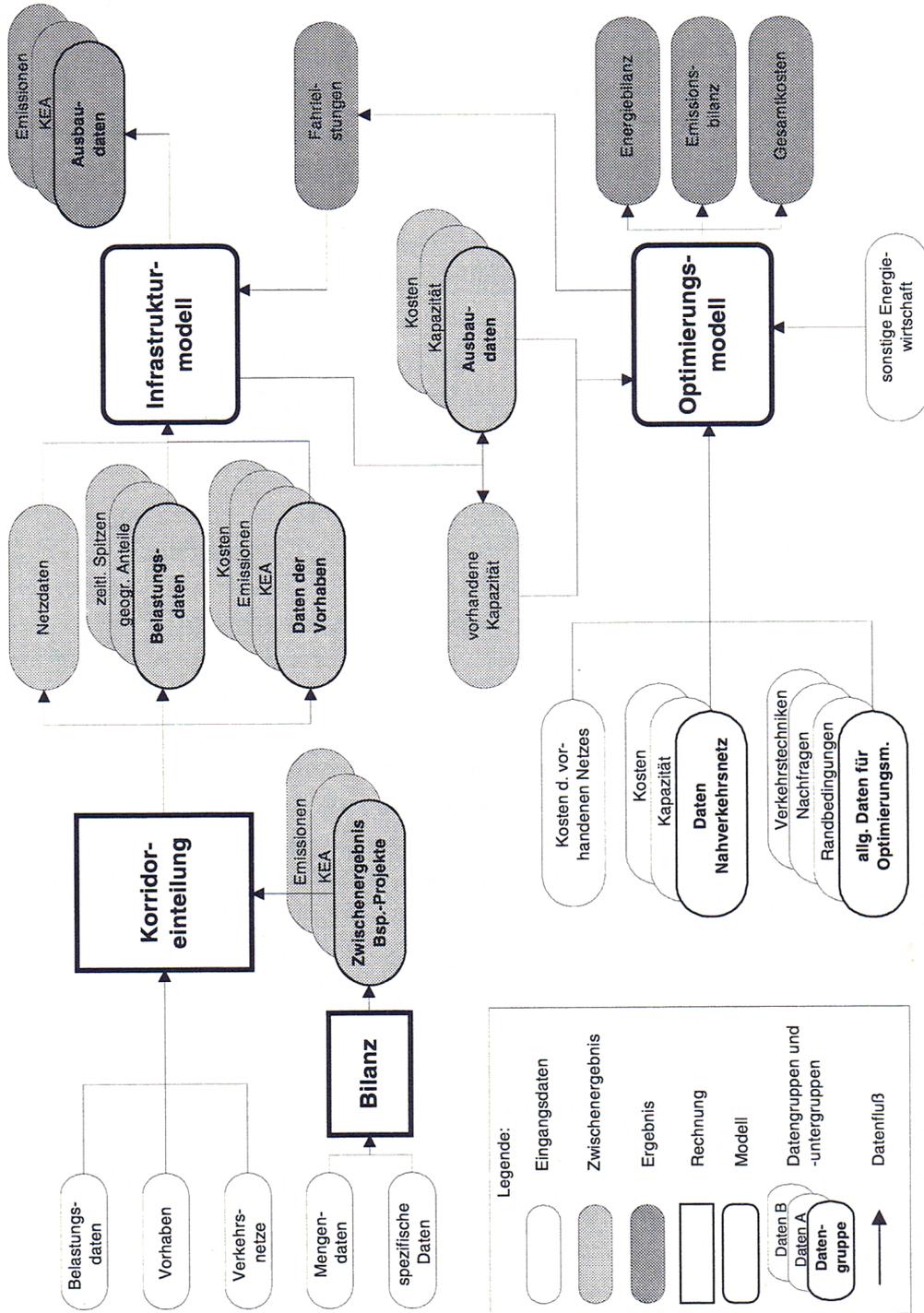


Abbildung 2.1: Schema der Vorgehensweise mit den wichtigsten Datenflüssen.

Die Einbindung der Infrastruktur in das nicht geographisch orientierte Optimierungsmodell erfordert die „Übersetzung“ der geographisch gegliederten Daten der Verkehrsnetze. Als Hilfsmittel dazu werden die Verkehrsnetze (Autobahn- und Hauptschienennetz) in fünf West-Ost-Korridore und vier Nord-Süd-Korridore eingeteilt (Kapitel 3.4 und 3.5). Belastungsdaten aus Verkehrszählungen werden aggregiert (Kapitel 4.1) und entsprechend der Aufteilung der Netze den jeweiligen Korridoren zugeordnet, so dass jedem Korridor eine aggregierte Belastung und ihr zeitlicher Verlauf zugeschrieben wird. Anhand von Kartenmaterial werden Statistiken bezüglich der Bauwerke erstellt (Kapitel 3.5), die für die Ermittlung des KEA und der Emissionen wichtig sind. Die Vorhaben des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) werden mit ihren Kosten, ihrem KEA und den Emissionen ebenfalls den Korridoren zugeordnet.

Um den KEA und die Emissionen der Vorhaben des BVWP berechnen zu können, werden Beispielprojekte bilanziert (Kapitel 3.2). Die Bilanzergebnisse werden den Vorhaben im jeweiligen Korridor zugeordnet. Damit sind zu jedem Vorhaben KEA und Emissionen bekannt.

Die auf die Korridore bezogenen Belastungsdaten werden in Anteile an der Belastung im gesamten Netz umgerechnet (Kapitel 4.2). Der Umfang der Vorhaben in einem Korridor und ihre Daten (Kapitel 4.4) werden im Infrastrukturmodell weiterverarbeitet. Die Spitzenbelastungen, ausgedrückt als Anteil der höchstbelasteten Stunde¹ an der Jahresfahrleistung (Kapitel 4.2.2), gehen ebenfalls als Zwischenergebnisse in das Infrastrukturmodell ein. Dieses Modell wurde in dieser Arbeit entwickelt, um für die Fahrleistungen, die Ergebnisse des Optimierungsmodells sind, den notwendigen kapazitiven Infrastrukturausbau zu berechnen. Dazu wird die Fahrleistung aus dem Optimierungsmodell mit den Belastungsanteilen der Korridore multipliziert. Als Ergebnis erhält man die Aufteilung der Fahrleistung auf die Korridore. Das Infrastrukturmodell berechnet für jeden Korridor anhand des vorhandenen Netzes die Kapazität und vergleicht sie mit der jeweiligen Spitzenbelastung. Ist die Spitzenbelastung höher als die Kapazität, ermittelt das Modell Maßnahmen zur Kapazitätserweiterung und berechnet deren Kosten, KEA und Emissionen (Kapitel 4.5).

Ergebnisse des Infrastrukturmodells, die im Optimierungsmodell weiterverarbeitet werden, sind die Kapazität der vorhandenen Infrastruktur und ihres Ausbaus sowie die Kosten des Ausbaus. Der ermittelte KEA und die Emissionen des Ausbaus gehen nicht in das Optimierungsmodell ein, um eine Doppelzählung zu vermeiden, da Energieeinsatz und Emissionen aus der Bauwirtschaft bereits im ebenfalls abgebildeten Industriesektor berechnet wird. Die Daten werden jedoch für den Vergleich mit Energieeinsatz und Emissionen aus der Nutzung im Verkehrssektor benötigt (Kapitel 7.1.5).

¹Im Fall der Bahn als höchstbelasteter Tag.

Das Optimierungsmodell enthält eine umfangreiche Datenbank, die Techniken und Verknüpfungen für alle energiewirtschaftlichen Sektoren enthält. Diese Datenbank wird mit den Daten aus dem Infrastrukturmodell ergänzt, die in einem entsprechenden Eingabeformat (Kapitel 5.1.4) vorliegen müssen. Zusätzlich werden Daten für die Nahverkehrsinfrastruktur (Kapitel 5.2) ermittelt und in das Optimierungsmodell eingegeben, sowie die Daten des Verkehrssektors überprüft und aktualisiert (Kapitel 5.4).

Mit diesen Daten berechnet das Optimierungsmodell die kostenminimale Zusammenstellung von Energietechniken (Kapitel 6). Als Ergebnis erhält man Fahr- und Verkehrsleistungen der Verkehrsträger und die ihnen zugeschriebenen Kosten, Energieeinsätze und Emissionen (Kapitel 6.2).

2.2 Grundlagen der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwands

2.2.1 Definition

„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.“ [VDI97]

Dies ist die Definition des KEA aus der VDI-Richtlinie 4600. Er dient unter anderem zur Berechnung des Energieerntefaktors von Energiewandlungsanlagen², zur Beurteilung der Effektivität von Energieanwendungen, als Teil von Umweltbilanzen und zur Suche nach Einsparpotentialen. Zusätzlich kann die Analyse des KEA einen Hinweis darauf geben, ob es aus energetischer Sicht sinnvoll ist, ein Produkt wiederzuverwerten.

Die Berechnung des KEA ist besonders geeignet, um Produkte, die einen ähnlichen Nutzen haben, mit Hilfe von Umweltbilanzen zu vergleichen. In Umweltbilanzen gibt er nicht nur den energetischen Ressourcenbedarf an, sondern ermöglicht auch die Berechnung energetischer Emissionen [Eyerer93]. Mit Hilfe des kumulierten Energieaufwands werden auch in dieser Arbeit die Emissionen von CO₂ und den Gasen CO, NO_x, SO₂, CH₄ und KWS (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe) beim Bau der Verkehrswege bestimmt.

²Das ist das Verhältnis des Energiebetrages, der nach der Umwandlung über die Lebensdauer der Anlage zur Verfügung steht zum Energiebetrag, der für Herstellung und Betrieb (ohne Brennstoffe) der Anlage notwendig ist.

2.2.2 Bilanzierungsmethoden

Die Bilanzierung des KEA kann mit drei Methoden erfolgen, die sich hinsichtlich Genauigkeit und Aufwand deutlich unterscheiden.

Prozesskettenanalyse

Mit einer Prozesskettenanalyse werden alle Schritte von der Gewinnung der Rohstoffe über die Herstellung und Nutzung des Produktes bis zu seiner Entsorgung bilanziert. Dabei sollen auch die Schritte zur Herstellung der Betriebsstoffe und Anlagen berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen führt zu einer sehr genauen Analyse, ist aber mit großem Aufwand verbunden, da sich die Ketten verzweigen und in vielen Fällen nicht mehr in die Vorstufen der Produktion zurückverfolgt werden können. Je geringer die Fertigungstiefe eines Produktes beim Hersteller ist, desto schwieriger ist die Bilanzierung, da mehr und mehr externe Beteiligte berücksichtigt werden müssen. Abbildung 2.2 zeigt das Schema einer Prozesskette.

Input-Output-Methode

Eine weitere Vorgehensweise beruht auf der makroökonomischen Input-Output-Analyse. Die Verflechtungen der volkswirtschaftlichen Sektoren werden in monetären Größen in einer Matrix abgebildet. Jeder Sektor liefert an jeden anderen Sektor eine bestimmte Menge an Vorleistungen zur Produktion. Ebenfalls sind die konsumtive Nachfrage und der Staatssektor abgebildet. Man erhält statt einer monetären eine energetische Matrix, wenn in jedem Sektor einem produzierten Wert eine bestimmte Energiemenge zugeschrieben wird. Auf diese Weise lässt sich der Energieaufwand für ein typisches Gut eines Sektors ermitteln [Adam97]. Die energetische Input-Output-Analyse hat auf der einen Seite den Vorteil, dass sie in der Regel keinen hohen Aufwand bei der Datenerhebung erfordert, auf der anderen Seite den Nachteil, nur für die jeweils typischen Produkte eines Sektors gültig zu sein.

Materialbilanz-Methode

Durch die zunehmende Anzahl der in Prozessketten analysierten Produkte sind ausreichend Daten für Materialbilanzen verfügbar. Daher ist, wenn der KEA der Materialherstellung groß gegenüber dem Energieaufwand in der Produktion ist, eine ausführliche Prozesskettenanalyse nicht mehr erforderlich. Man kann statt dessen bei guter Kenntnis der verwendeten Materialmengen eine Materialbilanz erstellen. Mit den Materialien ist ein typischer KEA verbunden, der mit den bilanzierten Materialmengen multipliziert wird. In der Summe erhält man dann den KEA des ganzen Produktes. Diese Methode verursacht geringen Aufwand

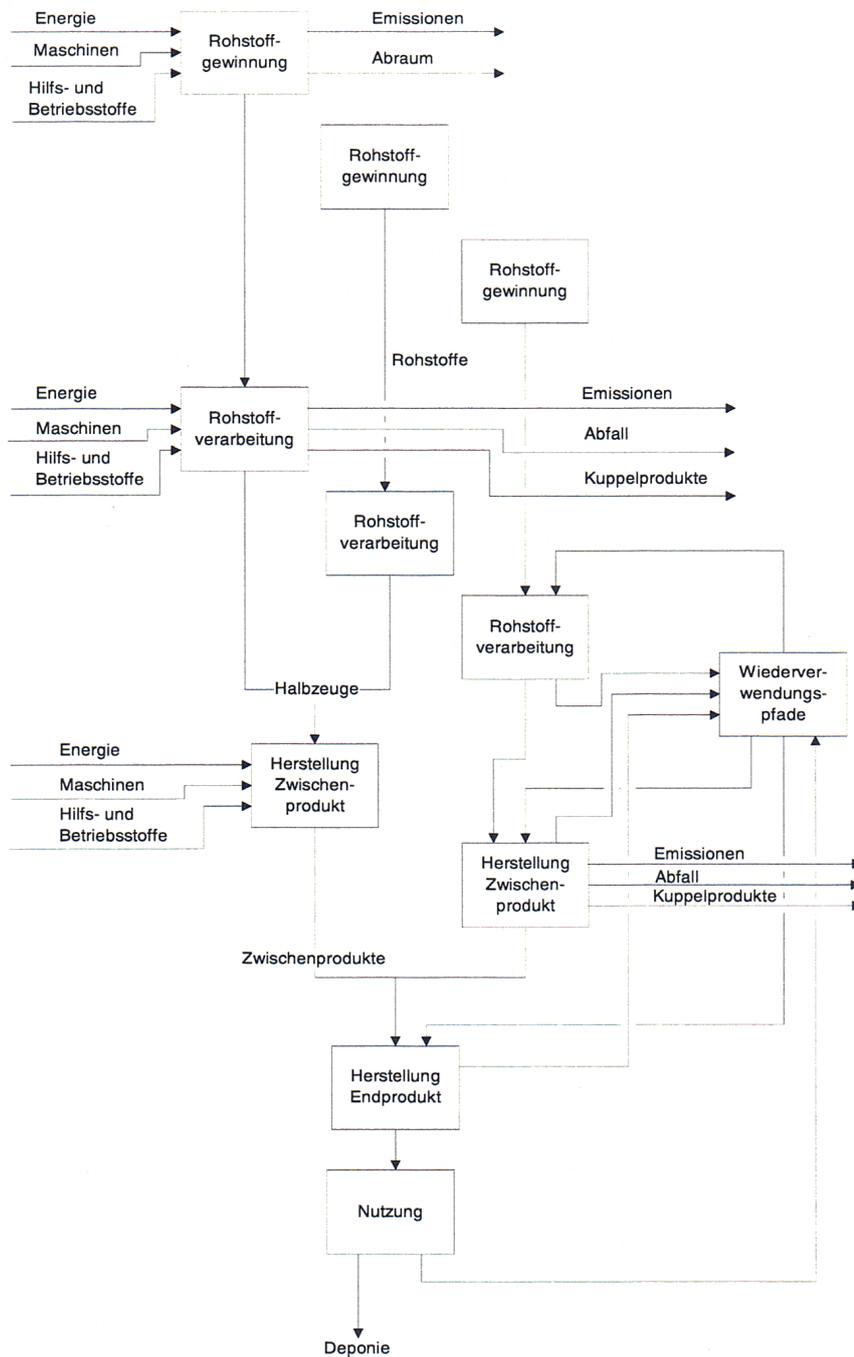


Abbildung 2.2: Schema einer Prozesskette. Alle Prozesse haben In- und Outputs, obwohl sie nur bei einigen eingezeichnet sind. Auf die Darstellung weiterer Verzweigungen zum Beispiel zur Herstellung der Maschinen, wurde verzichtet.

bei der Bilanzerstellung, ist aber nicht immer genau, da viele Daten aus der Literatur stammen und nicht in jedem Fall nachvollziehbar sind. Es sollte darauf geachtet werden, dass die verwendeten Daten den gleichen Bilanzraum haben und im gleichen Zeitraum erhoben wurden. Pauschale Zuschläge für die Herstellung von fertigen Produkten aus Halbzeugen basieren häufig auf einer unsicheren Datengrundlage (s.a. [Wagner97]).

Die in Kapitel 3 enthaltenen Bilanzen wurden mit dieser Methode durchgeführt, da die benötigten Daten für Baustoffe aus der Literatur ermittelt werden konnten und der Energieaufwand zum Einbau der Materialien klein gegenüber dem Herstellungsaufwand ist (Kapitel 3.3). Die Fehleranalyse in Kapitel 3.2.2 zeigt, dass bei der Bilanz wenige Stoffe in großen Mengen relevant sind, bei denen der Energieaufwand gut bekannt ist. Diese Stoffe dominieren den KEA und damit auch die Genauigkeit seiner Bilanzierung.

2.3 Grundlagen eines energiewirtschaftlichen Optimierungsmodells

Im folgenden Abschnitt wird zunächst die allgemeine Konzeption eines energiewirtschaftlichen Optimierungsmodells mit den wesentlichen Eigenschaften erläutert. Die mathematische Formulierung wird skizziert, abschließend werden die speziellen Ziele des IKARUS-Instrumentariums genannt.

2.3.1 Allgemeines Verhalten eines Optimierungsmodells

Ein energiewirtschaftliches Optimierungsmodell berechnet den Energiesektor mit energetisch relevanten Technikdaten und ihren Verflechtungen. Dabei wird ein Parameter des Systems optimiert. Im Optimierungsmodell, das in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, ist die Optimierungsvorschrift die Minimierung der Summe der auftretenden Kosten. Daneben sind grundsätzlich auch andere Kriterien wie die Minimierung des Energieeinsatzes oder der Emissionen denkbar. Der Auftrag im Rahmen des IKARUS-Projektes war jedoch, ein Modell zur Minimierung der Kosten zu entwickeln, da wirtschaftliches Handeln durch die Kosten bestimmt wird.

Der Energiesektor wird im Modell als System einzelner verknüpfter Techniken abgebildet. Als Gebietsbegrenzung wird für das IKARUS-Optimierungsmodell das Gebiet der Bundesrepublik gewählt, in das Primär- oder Endenergieträger importiert werden, die dort umgewandelt werden und letztendlich die Nachfragen nach Energiedienstleistungen decken. Als Stützjahre sind in der hier verwendeten Version des Modells die Jahre 1989, 2005 und 2020 vorgesehen. Jede Rechnung

für ein Stützjahr ist unabhängig von Rechnungen für die anderen Jahre.

Die Nachfragen, die das System maßgeblich bestimmen, werden extern vorgegeben. Sie sind in der Modellrechnung unbedingt zu erfüllen. Sie werden zum Beispiel für die Raumwärme als Fläche zu beheizender Gebäude dem Modell vorgegeben (Kapitel 5.3.2).

Die Struktur, die dem Modell zu Grunde liegt, entspricht dem Energiefluss in Deutschland. Verschiedene Primärenergieträger werden entweder inländisch gewonnen oder importiert und im Umwandlungssektor in die Endenergieträger (zum Beispiel Strom oder Benzin) umgewandelt. Die Endenergieträger werden in den Endverbrauchersektoren eingesetzt, um die Nachfragen zu decken. In jedem Sektor (Umwandlungs- und Endverbrauchersektoren) hat das Modell die Möglichkeit, verschiedene Techniken einzusetzen, die sich hinsichtlich Kosten, Energieeinsatz und Emissionen unterscheiden. Diese Größen werden für das gesamte System bilanziert. Die Summe der Kosten wird dabei minimiert ([Walbeck88], S. 10ff). Im Optimierungsmodell des IKARUS-Projektes können Benutzer unter anderem die maximal zulässigen Emissionen vorgeben (zum Beispiel eine vorgegebene Menge an CO₂-Emissionen im gesamten System oder in einzelnen Sektoren).

Folgende Kosten gehen in die Berechnung ein:

- Herstellungskosten
- Entsorgungskosten
- Fixkosten des Betriebs
- variable Kosten des Betriebs
- Kosten für die Primärenergieträger

Zusätzlich werden Kapitalkosten berechnet, indem die Herstellungskosten über die Lebensdauer der Techniken mit der Diskontrate von 5 % p.a. annuitätisch umgelegt werden. Die Kosten werden in dieser Arbeit inflationsbereinigt im Geldwert von 1989 berechnet. [Markewitz98]

2.3.2 Mathematische Formulierung eines Optimierungsmodells

Ein lineares Programm zur Optimierung besteht aus einem linearen (Un-)gleichungssystem und einer linearen Zielfunktion (im Modell in dieser Arbeit ist das die Summe der Kosten), die es zu optimieren gilt:

$$A\vec{x} \geq \vec{b} \quad (2.1)$$

$$\min (\vec{c} \cdot \vec{x})$$

A ist eine $n \times m$ – Verflechtungsmatrix, \vec{b} ist ein Vektor mit n Restriktionen, \vec{c} ist der Vektor mit m Kostenkoeffizienten und \vec{x} ist der Vektor mit den m Strukturvariablen. Die Komponenten von \vec{x} sind die Aktivitäten der Techniken, das heißt, ein Maß für den Energieumsatz. Sie ergeben sich durch die Optimierung. Prinzipiell sind in der Matrixgleichung alle Arten von (Un-)Gleichungen möglich, aus Gründen der Konsistenz werden hier alle Gleichungen in die oben gezeigte Form gebracht. Häufig werden bei Optimierungsmodellen externe Schranken durch die zusätzliche Gleichung

$$\vec{l} \leq \vec{x} \leq \vec{u} \quad (2.2)$$

vorgegeben. \vec{l} ist der Vektor aus m unteren Schranken, \vec{u} aus m oberen Schranken. Innerhalb dieser Grenzen wird die minimale Lösung der $\sum_{i=1}^m c_i x_i$ für das Gleichungssystem gesucht. [Dürr92]

Das Optimierungsmodell lässt sich als ein unterbestimmtes Gleichungssystem (Zahl der Gleichungen kleiner als die Zahl der Strukturvariablen) zusammenfassen. Die Lösung des Gleichungssystems ist nicht eindeutig, sondern ein Lösungsraum, in dem die Optimierung als zusätzliche Gleichung eine eindeutige Lösung hervorbringt [Walbeck88].

2.3.3 Möglichkeiten und Grenzen des Optimierungsmodells

Ein Modell, das nach der Methode der Linearen Programmierung gestaltet ist, wählt von zwei Möglichkeiten, die den gleichen Bedarf befriedigen, in jedem Fall die kostengünstigere zu 100 %. Nur wenn entweder die billigere Möglichkeit im Einsatz von oben beschränkt wird, also auf eine maximale Menge eingeschränkt wird, oder wenn die teurere Möglichkeit mit einer Mindestmenge gewählt werden muss, wird auch diese zur Gesamtlösung beitragen. Diese Beschränkungen werden in Gleichung 2.2 (s. o.) ausgedrückt.

Solche Beschränkungen können aus mehreren Gründen eingesetzt werden:

- Begrenzte Verfügbarkeit einer Technik (zum Beispiel inländisches Erdöl oder auch die Kapazität von Verkehrswegen)

- Politische Gründe (zum Beispiel der Mindesteinsatz der teureren heimischen Steinkohle)
- Verbraucherverhalten, das nicht nur ökonomischen Gründen folgt (zum Beispiel ist ein Anteil der Verkehrsteilnehmer auf einen Verkehrsträger eingeschränkt, gebundene Verkehre)

Der Einsatz solcher Schranken ist also notwendig, um die Reduktion im Ergebnis auf wenige Techniken aufzuheben. Dennoch ist immer zu bedenken, dass das Modell so gezwungen wird, eine aus ökonomischer Sicht nur teilweise optimale Lösung zu errechnen.

Das Modell berechnet die Deckung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen so, dass die Gesamtkosten minimal sind. Folgende Möglichkeiten werden durch das Modell eröffnet:

- Es ermöglicht die Minimierung der Kosten als ein Ziel wirtschaftlicher Energieversorgung. Dieses Ziel gilt auch im Optimierungsmodell, so dass es an realen wirtschaftlichen Überlegungen orientiert ist.
- Die Techniken, die vom Optimierungsmodell als Teil der Lösung berechnet werden, sind inklusive vorgelagerter Ketten die kostengünstigsten Möglichkeiten. Daher kann eine teurere Technik beispielsweise dann insgesamt kostengünstiger sein, wenn etwa der benötigte Energieträger günstiger ist. Das Modell gibt die Möglichkeit, die Gesamtkosten zu betrachten.
- Das Optimierungsmodell betrachtet die energiewirtschaftlich relevanten Sektoren nicht isoliert voneinander, sondern inklusive ihrer Verflechtungen. Auf diese Weise können Energieflüsse und Abhängigkeiten dargestellt werden.
- Die Interpretation der Lösung ist durch die Linearität der zugrundeliegenden Optimierungsaufgabe unkompliziert. Eine Technik wird in dem Maß eingesetzt, wie es die Nachfrage erfordert oder es die Schranken zulassen. In letzterem Fall wird dann eine teurere Technik für die noch nicht gedeckte Nachfrage eingesetzt.

Durch die lineare Struktur des Optimierungsmodells sind allerdings folgende Nachteile bedingt:

- Die Kosten der Techniken sind nicht variabel. Das heißt, es ist nicht möglich, dass die Kosten einer Technik sinken, wenn die Produktionsmenge steigt (Skalenerträge) oder ihr Preis steigt, wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt. Um letzteren Effekt abzubilden, werden mehrere gleichartige Techniken mit jeweils steigenden Kosten vorgesehen. Dann muss, wenn die kostengünstigste Technik ausgeschöpft ist, die nächstteurere gewählt werden.

- Die Nachfragen nach Energiedienstleistungen sind dem Modell fest vorgegeben. Daher ist es nicht möglich, dass die Nachfrage sinkt, wenn die Kosten (und damit die Preise) zur Bedarfsdeckung steigen. Maßnahmen, die – wie zum Beispiel die Einführung einer CO₂-Steuer – zur Nachfragereduktion dienen können, können nicht abgebildet werden. Die Frage, welche Instrumente zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führen, ist hier also nicht beantwortbar; welche Technik die günstigste hierfür ist, allerdings schon.

2.3.4 Ziele des IKARUS-Projektes

Im Jahr 1990 setzte sich die Bundesregierung zum Ziel, in Deutschland eine Reduktion der anthropogenen Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2005 um mindestens 25 % gegenüber 1990 zu erreichen. Da die CO₂-Emissionen in hohem Maße mit dem Einsatz fossiler Energieträger verbunden sind und der Energiesektor volkswirtschaftlich sehr bedeutsam ist, wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ein Instrumentarium (IKARUS, Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien) entwickelt, mit dem ökonomisch optimale Reduktionsstrategien berechnet und analysiert werden können.

Das Programmsystem IKARUS bildet die wesentlichen Prozesse von der Energiebereitstellung über die verschiedenen Umwandlungsstufen bis zum Verbrauch ab. Eine umfangreiche Datenbank enthält die erforderlichen Daten über das deutsche Energiesystem. Kern des Programmsystems ist das oben erläuterte lineare Optimierungsmodell, mit dessen Hilfe die kostengünstigste Mischung von Primärenergien und Techniken ermittelt werden kann. Es ist möglich, Randbedingungen unterschiedlicher Art zu definieren. So kann zum Beispiel den Ausstoß an Kohlendioxid auf einen Zielwert zu begrenzt werden. Das Modell gibt in einer solchen Rechnung durch die Optimierung Hinweise auf die volkswirtschaftlich günstigsten Reduktionsmöglichkeiten. Zusammen mit der Datenbank und anderen Teilen des Programmsystems können Maßnahmen zur Aktivierung dieser Möglichkeiten getestet und so Strategien zur CO₂-Reduktion entwickelt werden. [Markewitz98]

Kapitel 3

Berechnung von kumuliertem Energieaufwand und CO₂-Emissionen beim Bau der Infrastruktur

In diesem Kapitel wird die Bilanzierung von Beispielprojekten vorgenommen und die Anwendung der Ergebnisse auf die Bauvorhaben des Bundesverkehrswegeplans erläutert. Mit den Bilanzdaten können kumulierter Energieaufwand und Emissionen des Ausbaus der Verkehrsnetze in das Infrastrukturmodell (Kapitel 4) eingegliedert werden. Dazu ist eine geographische Einteilung der Verkehrsnetze vorgesehen, um die Einbindung in das Optimierungsmodell zu ermöglichen und die Datenmenge zu reduzieren. In Abbildung 3.1 sind die in diesem Kapitel relevanten Daten und ihre Verknüpfung gezeigt. Abschnitt 3.1 dieses Kapitels beinhaltet Hinweise zur Datenerhebung und Tabellen der spezifischen Materialwerte aus der Literatur, die in der Bilanz verwendet werden. Das Vorgehen bei der Bilanz wird in Abschnitt 3.2 erläutert, die Ergebnisse werden in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Die Korridoreinteilung wird in Abschnitt 3.4 vorgenommen, die daraus resultierenden Netzdaten sind in Abschnitt 3.5 enthalten.

Die folgenden Untersuchungen werden nur für Projekte des Fernverkehrsnetzes durchgeführt, da im Rahmen des Optimierungsmodells nur ein kapazitiver Ausbau des Straßen- und Bahnnetzes betrachtet wird. Im Nahverkehr hat der Ausbau der Netze dagegen vor allem Erschließungsfunktionen. Zudem findet auf dem Fernverkehrsnetz ein großer Teil der Fahrleistung und damit – durch die im Vergleich zum Nahverkehr höheren Besetzungszahlen – mehr als die Hälfte der Verkehrsleistung statt.

Während es für den Straßenbau mehrere Arbeiten zum Energieaufwand vor allem aus den 80er Jahren gibt ([Beyert85], [Breiter83], [Bonnot86], [Benz94]), sind

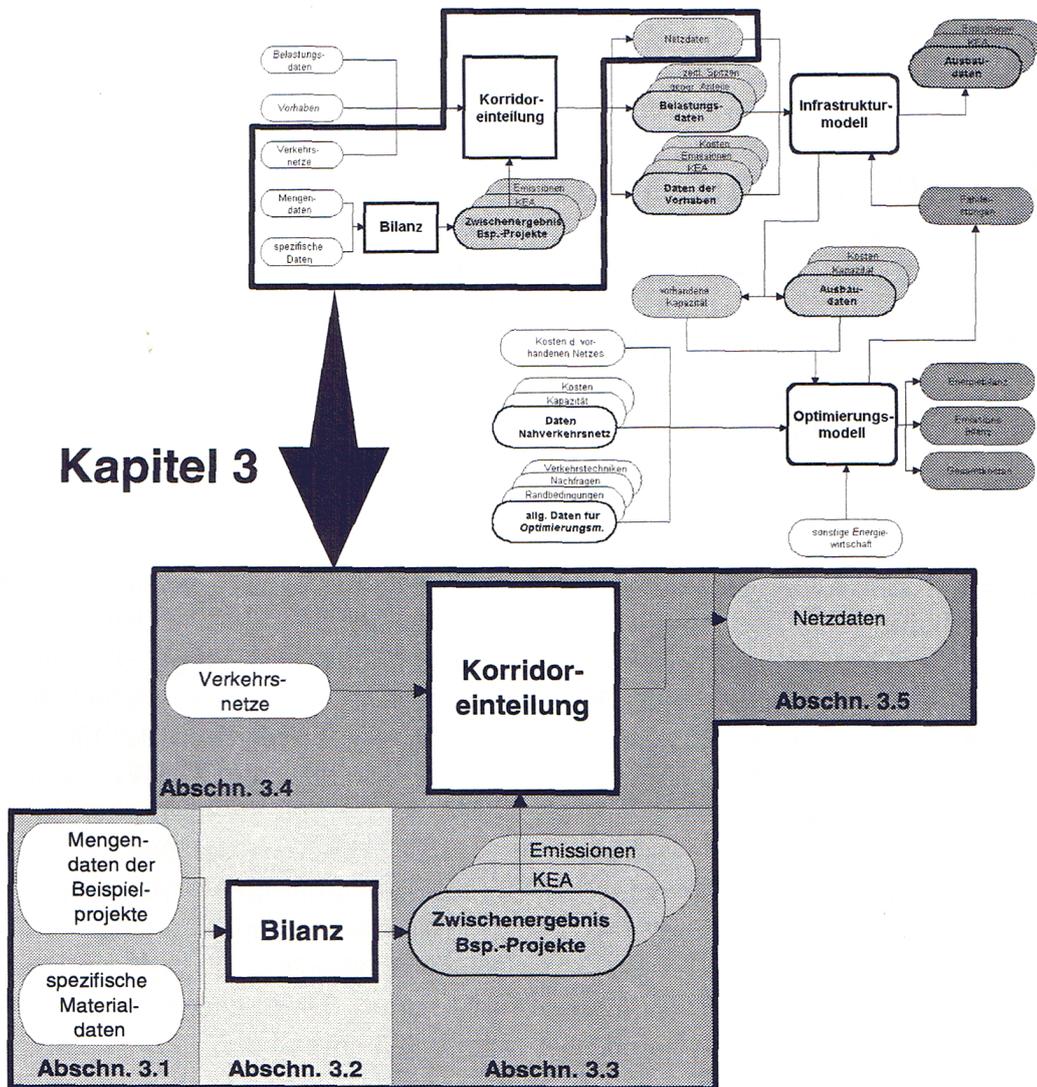


Abbildung 3.1: Schema der in Kapitel 3 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.

im Gleisbau keine genaueren Untersuchungen dazu bekannt. Die Bilanzierung erfolgt für Autobahn- und Bahnnetz auf die gleiche Weise und mit den gleichen spezifischen Daten. Damit ist die Vergleichbarkeit der Aufwendungen zwischen Straße und Schiene gewährleistet.

In der KEA-Richtlinie wird eine Bilanzierung von Herstellung, Nutzungsphase und Entsorgung empfohlen (Seite 7). Hier wird allerdings lediglich die Herstellung der Netze bilanziert, da der Energieaufwand in der Nutzungsphase durch das IKARUS-Optimierungsmodell berechnet werden kann. Eine Entsorgung oder ein Rückbau im Autobahnbau ist nicht bekannt und wird daher nicht bilanziert. Schienenwege sind bereits stillgelegt und zurückgebaut worden, allerdings handelte es sich nicht um Strecken des hier betrachteten Fernverkehrsnetzes.

3.1 Datenerhebung

3.1.1 Daten für Beispielprojekte

Die Vorhaben des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) gehen mit ihren Kosten, ihrem kumulierten Energieaufwand und den damit verbundenen Emissionen in die Berechnung des Infrastrukturmodells ein. Die Kosten werden direkt dem BVWP entnommen, die Bilanzen zum KEA und zu den Emissionen müssen jedoch erstellt werden. Die Vorhaben weisen jedoch typische Merkmale auf (Anhang A), so dass es genügt, Beispiele zu bilanzieren, die dann mit Hilfe von Statistiken auf die Netze übertragen werden. Für die Übertragung der Bilanzen sind Beispiele für den Neubau und Ausbau von Straßen und Schienenstrecken, für Anschlussstellen und Autobahnkreuze, Brücken und Tunnel notwendig.

Für die Bilanzen der Beispielprojekte werden Mengendaten der eingesetzten Materialien benötigt, aber auch Daten der Transporte und Arbeitsleistungen in den Projekten. Die Tabellen im Anhang C geben einen Überblick über die Beispielprojekte mit den Bilanzergebnissen. Im Anhang A ist der generelle Aufbau der Projekte beschrieben und im Anhang D befinden sich Tabellen mit den Materialmengen. Insgesamt werden acht Autobahnneubauten bilanziert:

- Davon wurden zwei mit Betondecken ausgeführt (A 71, 5311; A 71, 5312; s. S. 182).
- Bei einem Neubauvorhaben handelt es sich um die Erweiterung einer Bundesstraße zu einer Autobahn (A 70; s. S. 185).
- Zwei der bilanzierten Neubauten führen durch stadtnahes Gebiet (Spange Eschenried, A 99; s. S. 184).
- Ein Neubau führt durch das Alpenvorland (A 7; s. S. 181),

- ein Neubau durch ein Mittelgebirge (A 71, 5321; s. S. 182)
- und ein Neubau durch die Ebene (A 395; s. S. 180).

Damit werden verschiedene Bauweisen (Anhang A) und unterschiedliche geographische Randbedingungen abgedeckt, so dass eine Zuordnung von Beispielprojekten zu den Vorhaben des BVWP möglich ist.

Zusätzlich werden sehr detaillierte Daten zum Neubau von zwei Ortsumgehungen bilanziert (B 255 und B 41, Anhang D, S. 187). Durch diese ist es möglich, zu untersuchen, wie sehr die Bilanzergebnisse bei weniger detaillierten Unterlagen den realen KEA und die Emissionen unterschätzen.

Zum Autobahnausbau stehen Daten von sieben Projekten zur Verfügung:

- Von diesen sind zwei mit Betondecke ausgeführt (A 5 ab Baden-Baden; A 5 von Bühl bis Achern; s. S. 194).
- Bei zwei Projekten ist es nicht möglich, die Sanierung der bestehenden Fahrbahn, die in diesen Fällen mit dem Ausbau verbunden ist, von den restlichen Daten abzugrenzen, so dass sie mitbilanziert wird (A 4 bei Erfurt; A 8 bei München; s. S. 193 und S. 195).
- Bei zwei Ausbauten sind die um- und neuzubauenden Bauwerke in den Daten enthalten (A 5 ab Heidelberg und A 9 bei Bayreuth; s. S. 194 und S. 196) und
- bei einem Projekt sind weder neue Bauwerke noch ihr Umbau notwendig gewesen (A 4, Kölner Südring; s. S. 192).

Die Datengrundlagen dieser Projekte sind sehr unterschiedlich und damit auch die Bilanzergebnisse.

Der Ausbau des Schienennetzes wird mit sechs Beispielprojekten bilanziert. Im Einzelnen sind das der Neubau der ICE-Strecke zwischen Köln und Frankfurt am Main (s. S. 199), der Zubau von zwei Gleisen zwischen Karlsruhe und Basel (s. S. 198) und der Zubau eines Gleises zwischen Plauen und Hof (s. S. 197). Zusätzlich wurde die Elektrifizierung der Strecke zwischen Wilhelmshaven und Oldenburg (s. S. 197), der Einbau von Überholgleisen zwischen Dortmund und Hagen (s. S. 198) und die Ertüchtigung der Oberleitung für den Hochgeschwindigkeitsverkehr zwischen Köln und Aachen (s. S. 197) bilanziert. Damit sind wesentliche Maßnahmen zum Ausbau des Schienennetzes abgedeckt.

In Abschnitt 3.5 werden die Verkehrsnetze, in Fahrbahnen und in Bauwerke getrennt, den Korridoren zugeteilt. Daher werden zusätzlich folgende Bauwerke bilanziert:

- Sechs Tunnelbauwerke, davon wurde einer mit der Fräsmaschine vorgetrieben und fünf im Sprengvortrieb. Die Tunnel variieren vor allem in der Art der Belüftung (Schächte, Querstollen) und in der Ausstattung (Ventilatoren, Rettungssysteme, Überwachung). Die Tunnelbauweise von Straßen- und Schientunneln ist gleich .
- Fünf Anschlussstellen, die sich vor allem durch die Länge der Zuführungsäste und die Bauweise (Über- oder Unterführung) unterscheiden.
- Ein Autobahnkreuz.
- Vier Großbrücken. Hier sind lediglich Daten für Brücken mit Spannbetonüberbau verfügbar. Diese Bauweise ist sowohl im Autobahn- als auch im Schienenwegebau die häufigste. Seltener kommen bei besonderen Umständen (zum Beispiel große Stützweiten) auch Stahl- oder Stahlverbundüberbauten zum Einsatz. Die bilanzierten Brücken variieren vor allem in der Stützweite und in der Größe der Widerlager.

Für die Erhebung der benötigten Materialmengen wurden Fragebögen erstellt, die an Landesstraßenbauämter und regionale Bahnverwaltungen verschickt wurden. Auf Grund der geringen Resonanz ist es zum Teil notwendig, fehlende Daten aus Bauplänen zu ergänzen. Für zwei Projekte (Ortsumgehungen) wurden die detaillierten Angebotsunterlagen zur Verfügung gestellt, so dass anhand dieser Projekte auf den Grad der Erfassung aller Materialien und Arbeiten bei den anderen Straßenbaubilanzen geschlossen werden kann.

Im Gegensatz zu den Straßenbaubilanzen waren für die Schienenwege keine Pläne oder Daten zu erhalten, sondern lediglich typisierte Angaben über die Bauausführung anhand des Schienenwegeausbauberichts der Bundesregierung ([Bundestag97a]). Zur Berechnung der Massen anhand von Querschnitten werden Angaben aus Lehrmaterial für Eisenbahningenieure entnommen [Vallée95]. Eine Ausnahme bildet der Aufbau der festen Fahrbahn, da hierzu mehrere Untersuchungen durchgeführt wurden (zum Beispiel [IVW98], [Oberweiler79] und [Duwe79]). Die Unsicherheit der Daten ist wegen der ungenauen Grundlage größer als bei den Straßenprojekten. Dennoch ist im Hinblick auf die Übertragung auf den Netzausbau der typische Charakter der Projektbilanzen nützlich, da Besonderheiten einzelner Projekte das Bilanzergebnis nicht beeinflussen. Die Bauwerke der Bahnstrecken werden in allen Korridoren mit der deutschlandweiten Durchschnittszahl einbezogen, da außer für die Neubaustrecke Köln-Frankfurt keine Angaben zur Anzahl und Größe der Bauwerke zu erhalten waren.

Allen Eingangsdaten (Materialmengen, Arbeitsleistungen und Transportentfernungen) der Projekte werden Fehlerbreiten zugeordnet. Die Fehlerbreite von direkten Angaben der Straßenbauämter wird auf $\pm 10\%$ festgelegt. Bei eigenen

Berechnungen, etwa zum Volumen der benötigten Baustoffe, werden bei den Ausgangsdaten (etwa Schichtdicke, Fahrbahnbreite, Projektlänge) Fehlerbreiten von $\pm 10\%$ bis $\pm 30\%$ angenommen, die nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (Abschnitt 3.2.2) Fehlerbreiten für die berechneten Größen ergeben. Bei Schätzungen (zum Beispiel häufig die Transportentfernungen) wird die Fehlerbreite auf $\pm 50\%$ festgelegt. Damit gehen alle Eingangsdaten der Projekte in die Bilanz mit Fehlerbreiten ein (s. Anhang D).

3.1.2 Spezifische Materialdaten

Der Bilanz von KEA und Emissionen beim Bau der Infrastruktur liegen neben den Materialmengen, Arbeitsleistungen und Transportentfernungen der Projekte spezifische Energie- und Emissionsdaten zu Grunde. Stehen mehrere Literaturquellen zum KEA von Materialien oder Energieeinsatz von Arbeiten zur Verfügung, wird diejenige gewählt, die zusätzlich Angaben über die Art der eingesetzten Endenergie oder zu Emissionen enthält. Dadurch sind Angaben über die spezifischen Emissionen der Herstellung entweder direkt verfügbar oder können berechnet werden. Bei Angaben zur eingesetzten Endenergie werden die Primärenergieeinsätze und die Emissionen anhand der Daten aus der IKARUS-Datenbank berechnet. Die Emissionen fallen bei der Umwandlung der Primärenergie und beim Einsatz der Endenergie an. In der Regel (außer bei Sprengstoff) werden nur die Emissionen berechnet, die energieeinsatzbedingt entstehen. Das heißt, die Kohlenwasserstoffemissionen des Einbaus von Bitumen werden beispielsweise nicht erfasst. Dieses Vorgehen schließt ebenfalls klimarelevante Emissionen aus anderen Quellen aus. So werden hier Emissionen vernachlässigt, die zum Beispiel durch die Umwandlung der Flächennutzung, welche mit dem Bau von Infrastruktur verbunden ist, verursacht werden (Rodung, Wegfall von Kohlenstoffspeichern). Eine solche Bilanzierung geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

Für Kunststoffe gehen alle zitierten KEA-Werte in der Literatur auf zwei grundlegende Veröffentlichungen ([Boustead95], [Kindler80]) zurück, von denen erstere neben dem Primärenergieaufwand auch die Endenergieeinsätze enthält. Für Straßenbaustoffe kann auf die Dissertation von Beyert [Beyert85] an der RWTH Aachen zurückgegriffen werden. Dort wurde eine erste KEA-Bilanz zum Straßenbau vorgelegt. Andere Baustoffe wie Klinker, Mörtel, Steingut und Zement werden den Arbeiten von Kaufmann [Kaufmann96], Andrä [Andrä95] und Scholzen [Scholzen91] entnommen. Für Aluminium, welches vor allem bei den Bahnprojekten zum Einsatz kommt, wird ein Sekundäranteil von 40% angenommen [Wagner97]. In Tabelle 3.1 werden die ausgewählten spezifischen Energiedaten gezeigt. Anhang B enthält die entsprechende Tabelle mit den spezifischen Emissionsdaten, die entweder direkt aus den Literaturquellen für den KEA entnommen werden oder aus diesen berechnet werden.

Dem spezifischen KEA werden Fehlerbreiten zugeschrieben. Dieser Fehler basiert auf folgenden Annahmen:

- Bei mehreren Literaturangaben zu einem Stoff wird mit der Fehlerbreite die Variation in den Literaturangaben abgedeckt (zum Beispiel Aluminium).
- Sind zu einem Kunststoff keine Angaben verfügbar, wird der KEA eines chemisch ähnlichen Kunststoffes gewählt und mit einer Fehlerbreite versehen, die auch andere Kunststoffe einschließt (zum Beispiel Acrylat oder Lack).
- Bei eigenen Schätzungen und Analogieschlüssen auf Grund unbekannter Materialzusammensetzung wird ein Fehler von $\pm 30\%$ angenommen (zum Beispiel Silikon).

Zur Bestimmung der Fehlerbreite der spezifischen Emissionswerte wird bei Literaturangaben wie bei der Fehlerbreite des KEA vorgegangen. Werden die Emissionen mit Hilfe der IKARUS-Datenbank berechnet, werden die Angaben aus der Datenbank pauschal mit einer Fehlerbreite von $\pm 10\%$ versehen. Die Fehlerbreite der Emissionen ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz durch die Fehlerbreite des KEA und der benötigten Daten aus der IKARUS-Datenbank.

In allen Projekten werden Materialmischungen verwendet. Angaben zu den Anteilen der beteiligten Materialien werden aus der Literatur ([Schäffler80]) entnommen. Der Variabilität in diesen Angaben wird durch eine großzügige Fehlerabschätzung der Anteile der Einzelmaterialien Rechnung getragen. Tabelle 3.2 gibt Auskunft über die Mischungsdaten. Der Energieaufwand für die Mischung der Materialien stammt aus [Beyert85]. Beim KEA für Kies, Sand und Brechsande wurde auf eine Unterscheidung in Sieblinien verzichtet. Bei der Bemessung des Fehlers der spezifischen Angaben für diese Materialien wird dies berücksichtigt.

Die Dichte der Materialien ist in den meisten Fällen den Quellen für den KEA entnommen. Zum Teil stammen die Angaben auch aus der Standardliteratur (zum Beispiel bei Aluminium und Stahl) oder aus [Schäffler80].

Im Anhang B ist die Tabelle mit den spezifischen KEA- und Emissionswerten für die Arbeitsleistungen enthalten. Alle Angaben zu den Energieeinsätzen für die Arbeitsleistungen sind [Beyert85] entnommen.

3.1.3 Nicht-CO₂-Emissionen

In dieser Arbeit steht von den energiebedingten Emissionen Kohlendioxid im Mittelpunkt, da sich die Reduktionsrechnungen in Kapitel 6 auf CO₂-Emissionen beziehen. Andere energiebedingte Emissionen werden in den Bilanzen zusätzlich berechnet, da sie ebenfalls im Optimierungsmodell berechnet werden. Obwohl

Tabelle 3.1: Spezifischer kumulierter Energieaufwand der in den Bilanzen von Beispielprojekten eingesetzten Materialien (KEA je Volumen oder Gewicht).

Material	Dichte [g/cm ³]	spez. Primär- Energieeinsatz zur Herstellung	Einheit	Quelle/ Anmerkung
Acrylat		91 ± 5	MJ/kg	Schätzung nach [Kindler80]
Aluminium	2,7 ± 0,1	137,5 ± 46,1	MJ/kg	Mittelwert aus [Gürzenich97] [Wagner97]
Aluminium (prim.)	2,7 ± 0,1	239 ± 2	MJ/kg	[Wagner97]
Bitumen	1,03 ± 0,04	41,88 ± 1,0	MJ/kg	[Beyert85] Her- stellung, Heizwert
Epoxidharz		100 ± 20	MJ/kg	[Gürzenich97]
Fasermaterial	0,3 ± 0,05	4,8 ± 2,0	MJ/m ³	Schätzung
Füller	2,8 ± 0,3	0,063 ± 0,01	MJ/kg	[Beyert85]
gebrochener Naturstein	2,6 ± 0,3	0,060 ± 0,005	MJ/kg	[Beyert85]
Glasfaser		50 ± 5	MJ/kg	[Kindler80]
HD PE (Rohr)	0,96 ± 0,02	85,79 ± 0,5	MJ/kg	[Kindler80]
Keramik	1,2 ± 0,4	3,55 ± 1,5	MJ/kg	Schätzung nach [Kaufmann96]
Kies	2,6 ± 0,2	0,025 ± 0,003	MJ/kg	[Beyert85]
Kies/Brechsand	2,6 ± 0,2	0,045 ± 0,02	MJ/kg	[Beyert85]
Klinker	1,2 ± 0,4	3,55 ± 0,5	MJ/kg	[Kaufmann96]
Kupferdraht	9 ± 0,2	59,6 ± 7	MJ/kg	[Wagner97]
Lack	1,18 ± 0,3	91 ± 5	MJ/kg	Schätzung wg. PMMA nach [Kindler80]
LD PE (Form)	0,92 ± 0,01	82,22 ± 5	MJ/kg	[Kindler80]
Mörtel	2 ± 0,5	1,112 ± 0,1	MJ/m ³	[Andrä95]
Polyester	1,22 ± 0,2	78 ± 30	MJ/kg	[Kindler80]
Polypropylen	0,9 ± 0,02	73 ± 1	MJ/kg	[Kindler80]
Polystyrol	0,15 ± 0,02	105,3 ± 30	MJ/kg	[Wagner97]
PVC (Form)	1,38 ± 0,02	66,8 ± 3	MJ/kg	[Kindler80]
Silber	9 ± 2	128,2 ± 1	MJ/kg	[Boustead95]
Siloxan/Silikon		100 ± 30	MJ/kg	Schätzung
Sprengstoff		31,6 ± 2	MJ/kg	[Scholzen91]
Stahl	8 ± 0,1	20,5 ± 5	MJ/kg	[Gürzenich97]
Stahl (verzinkt)	8 ± 0,1	22,9 ± 1	MJ/kg	[Gürzenich97]
Stahlbeton	2,65 ± 0,02	2,7 ± 0,8	MJ/kg	[Kaufmann96]
Steingut	2,2 ± 0,5	2,29 ± 0,5	MJ/kg	[Andrä95]
Teer	1,03 ± 0,04	43,75 ± 0,1	MJ/kg	[Beyert85]
Zement	3,1 ± 0,1	4,95 ± 0,5	MJ/kg	[Kaufmann96]

Tabelle 3.2: In die Bilanzen eingehende Materialmischungen. Der Energieeinsatz zur Mischung hat die in der Spalte „Einheit“ bezeichnete Dimension. Die Anteile sind Gewichtsanteile; an 100 % fehlende Anteile sind entweder Wasser (bei Beton) oder durch die Fehlerbreiten abgedeckt.

Material	Dichte	Energieeinsatz zur Herstellung der Mischung	Einheit	Bestandteil	Anteil
	[g/cm ³]				[%]
Asphaltbeton	3,41 ± 0,58	604 ± 10	MJ/kg	Bitumen Füller Kies	6,7 ± 0,5 10 ± 3 80 ± 10
Binderschicht (fein)	2,45 ± 0,63	435 ± 10	MJ/kg	Bitumen Füller Kies	5 ± 1 7 ± 2 87 ± 10
Binderschicht (grob)	2,45 ± 0,63	435 ± 10	MJ/kg	Bitumen Füller Kies	4,65 ± 0,85 6 ± 3 85 ± 10
Gussasphalt	3,41 ± 0,58	604 ± 10	MJ/kg	Bitumen Füller Kies	7,8 ± 1,3 25 ± 5 70 ± 10
Tragschicht	2,45 ± 0,58	397 ± 7	MJ/kg	Bitumen Füller Kies	3,8 ± 0,5 6 ± 4 85 ± 10
Beton B25	2,6 ± 0,15	10 ± 1,8	MJ/m ³	Zement Kies	8,3 ± 1 72 ± 3,5
Beton B35	2,6 ± 0,15	10 ± 1,8	MJ/m ³	Zement Kies	10,4 ± 1 69,8 ± 3
Beton B45	2,6 ± 0,15	10 ± 1,8	MJ/m ³	Zement Kies	12,8 ± 1 67,8 ± 2,9

ihnen nicht das Hauptaugenmerk gilt, werden auch sie in der Auswertung in Kapitel 7 berücksichtigt. In den weiteren Abschnitten werden die Emissionen nachrichtlich mitgegeben. Die berücksichtigten Nicht-CO₂-Emissionen sind:

- Kohlenmonoxid (CO)
- Schwefeldioxid (SO₂)
- Stickoxide (NO_x)
- Methan (CH₄)
- Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (KWS)

Die spezifischen Emissionswerte sind in Anhang B enthalten. Die Ergebnisse der Bilanzen der Emissionen sind in Anhang E für die Korridore zusammengefasst.

3.2 Bilanzierung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen anhand von Beispielprojekten

3.2.1 Vorgehensweise

Die Bilanz wird mit den genannten Daten durchgeführt, indem zunächst aus den Mischmaterialmengen die verschiedenen Inhaltsstoffe in Volumen- oder Mengeneinheiten berechnet werden. Der spezifische KEA und die Emissionen der Herstellung der Mischung werden mit den Mischmaterialmengen multipliziert. Die Materialmengen, also die Inhaltsstoffe der Mischmaterialien und alle anderen Materialien, werden mit den spezifischen KEA- und Emissionswerten multipliziert, ebenso die Arbeits- und Transportleistungen (Tabellen in Anhang D). Anschließend werden die Einzeldaten summiert, so dass man als Bilanzergebnis den KEA und die Emissionen des Projektes erhält.

Für diese Bilanzen wird eine Datenbank eingerichtet, mit deren Hilfe die Rechnungen automatisiert werden. Die Datenbank enthält die spezifischen Energie- und Emissionsdaten je Gewichts-, Volumen- oder sonstiger Einheit. Der Benutzer kann Materialmengen in Volumen oder wahlweise in Gewicht, Transportentfernungen und notwendige Bauarbeiten mit den jeweiligen Fehlerabschätzungen eingeben. Die Energie- und Emissionsbilanz wird dann vom Programm berechnet.

3.2.2 Fehlerrechnung

Analog zu den Empfehlungen aus [Klößner96] wird eine Fehlerrechnung nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsprinzip

$$\Delta f(x_1 \dots x_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

durchgeführt. Die Funktion f aus $(x_1 \dots x_m)$ fehlerbehafteten Variablen muss stetig sein. Das Prinzip beruht auf der Annahme, dass die Fehlerbreiten der Einzeldaten einer Gaußschen Normalverteilung folgen. Die Fehlerrechnung wird in die Datenbank einprogrammiert. Sie dient dazu, die Unsicherheit, die selbst bei genau durchgeführter Bilanzierung (zum Beispiel den Ortsumgehungen) auf Grund der Fehler der spezifischen Ausgangsdaten entsteht, zu berechnen. Die Fehler der Ausgangsdaten gehen bei Literaturdaten auf die Spannweiten der verschiedenen Quellen zurück. Bei den Materialmengen wird abgeschätzt, wie zuverlässig die Quellen sind. Daten aus Abrechnungen der Baufirmen werden mit einem Fehler von $\pm 10\%$ versehen. Die Unsicherheit der eigenen Abschätzungen wurden je nach zugrundeliegenden Annahmen mit bis zu $\pm 75\%$ angenommen.

Typischerweise sind bei Bauprojekten nur wenige Materialien in sehr großen Mengen beteiligt. Dazu kommt zwar unter Umständen eine Vielzahl anderer Materialien, aber in wesentlich geringeren Mengen. Bei den hier erstellten Bilanzen sind die Energieaufwendungen für die in großen Mengen eingesetzten Materialien genau bekannt (Bitumen, Stahlbeton bzw. Zement), die der sonstigen Materialien allerdings weniger genau. Der Einfluss der gut bekannten Materialien dominiert die Fehlerrechnung, so dass trotz einem erheblichen Fehler bei einigen Einzeldaten ($\pm 75\%$ oder mehr) die Daten der Gesamtbilanz einen geringeren Fehler ausweisen (etwa $\pm 20\%$). Mit dieser Fehlerbreite und durch die Struktur (dominiert von wenigen großen Materialmengen) sind Bilanzen für Bauprojekte und besonders der Verkehrswege als sicher anzusehen.

3.2.3 Systemgrenzen, Annahmen und Vereinfachungen

Für die Bilanzierung der Projekte sind zahlreiche Annahmen, Analogieschlüsse und Vereinfachungen notwendig. Einerseits waren Daten nicht oder nur lückenhaft zu beschaffen, andererseits ist der Verlust an Genauigkeit der Bilanz häufig vertretbar, wenn Sachverhalte vereinfacht werden.

Folgende Systemgrenzen der Projektbilanzen werden gesetzt:

- Wie schon erwähnt, wird nur der KEA der Herstellung bilanziert, der KEA der Nutzung kann durch das Optimierungsmodell ermittelt werden, eine Entsorgung wird nicht berücksichtigt (Seite 17).

- Der KEA der Maschinen (Arbeitsgeräte auf der Baustelle, Transportgeräte und Anlagen zur Herstellung der Baustoffe) wird nicht berücksichtigt. Die Arbeit von Beyert [Beyert85] ermöglicht eine Abschätzung des auf diese Weise vernachlässigten Anteils des KEA. Mit etwa einem Prozent des Bilanzergebnisses sind die Vernachlässigungen erheblich kleiner als die Fehlerbreite des Ergebnisses und verfälschen es damit nicht.
- In der KEA-Richtlinie wird vorgeschlagen, auch die nichtenergetisch verwendeten Energieträger mitzubilanzieren. Das heißt, zum Beispiel muss bei der Herstellung von Kunststoffen aus Rohöl der Heizwert in die Bilanz einbezogen werden. Beim Bau von Verkehrswegen wird häufig Bitumen verwendet, das jedoch auch als Energieträger gelten kann. Bitumen hat einen Heizwert von 40,4 MJ/kg, so dass durch Verbrennen der Energieinhalt gewonnen werden könnte. Gegen die Einbeziehung des Heizwertes von Bitumen in die Energiebilanz spricht, dass in der Praxis besonders auf Grund von Umweltauflagen auf die Verbrennung verzichtet wird. Auch eine Energiegutschrift durch Recycling oder Wiederverwendung kann man nicht gelten lassen, da Bitumen nach dem Einbau im Straßenbelag nicht mehr energetisch genutzt werden kann. Um diesem Zwiespalt gerecht zu werden, sind in Tabelle 3.3 beide Energiewerte angegeben.
- Die Übertragung der Beispielprojekte auf die Bauvorhaben des Bundesverkehrswegeplans (Abschnitt 3.5) erfordert eine Trennung der Bilanz der Bauwerke und der Fahrbahn. Das bedeutet, dass die Fahrbahnen durchgehend bilanziert und nicht bei den Bauwerken mitberücksichtigt werden. Brücken und Tunnel werden also ohne Straßen- und Schieneneroberbau bilanziert, die Bilanzen des Oberbaus enthalten in der Regel keine Bauwerke.

Bei unzureichenden Datengrundlagen (Abschnitt 3.1) ist es notwendig, Annahmen zu treffen. Diese beziehen sich auf die Berechnung der spezifischen Daten, auf einzelne Ergänzungen der Projektdaten und auf Annahmen zum Projektumfang. Folgende Annahmen wurden zu den spezifischen Daten getroffen:

- Für die Berechnung der klimarelevanten Emissionen aus dem Einsatz von Strom, zum Beispiel zur Mischung der Baumaterialien, wird der deutsche „Strommix“ mit seinen spezifischen Emissionswerten angenommen.
- Die Emissionen der eingesetzten Baumaschinen werden nach ihrem Energieverbrauch entsprechend den Angaben aus dem „Handbuch Emissionsfaktoren“ ([infr95]) für schwere Lkw in dichtem Verkehr berechnet. Diese Vereinfachung ist zulässig, da der Energieanteil der Arbeiten in der Baustelle in fast allen Fällen weniger als 2 % beträgt¹. Daher hat eine entsprechende

¹mit Ausnahme der Tunnel, bei diesen und beim Autobahnkreuz Erfurt liegt der Arbeitsanteil bei etwa 5 %

Ungenauigkeit geringen Einfluss auf die Gesamtbilanz.

Annahmen zur Ergänzung der Projektdaten:

- Bei Transporten im Straßenbau wird, wenn keine Angaben vorlagen, die Entfernung zur nächsten Ortschaft angenommen. Transporte von Baustoffen finden überwiegend im Nahverkehr (weniger als 50 km) statt.
- Für die Bilanzen der Anschlussstellen werden Standardbeschilderungen (eine Schilderbrücke, zwei Hinweisschilder im Abstand von 500 m) angenommen, da für die Beschilderung keine anderen Angaben vorliegen.
- Über- und Unterführungen werden, wenn keine Angaben vorliegen, mit einer Standardbauweise (siehe Anhang A) bilanziert.

Annahmen zum Umfang einzelner Projekte:

- Der Neubau von Autobahnen wird mit vier Spuren bilanziert.
- Der Ausbau von Autobahnen wird mit einer zusätzlichen Spur an jeder Fahrbahn bilanziert.
- Der Bau von Telematikanlagen wird nicht bilanziert, nach einer Überschlagsrechnung beträgt der KEA ihrer Herstellung 0,23 GJ/km, das ist um den Faktor 100.000 niedriger als der KEA eines Neubaus und wird daher nicht als relevant angesehen.
- Der Gleiszubau wird als Schotteroberbau mit neuem Kettenwerk und Masten bilanziert, da der Schotterbau die Standardbauweise der Schienenstrecken ist.
- Beim Ausbau einer Strecke mit Überholgleisen wird aus dem Beispielprojekt (Dortmund - Hagen, [Bundestag97a]) geschlossen, dass diese etwa alle 4 bis 10 km eingebaut werden. Allerdings kann es hier zu einer Überschätzung der Anzahl der Überholgleise kommen, da das Projekt in einem dicht besiedelten Gebiet liegt und Überholgleise vornehmlich an ohnehin vorhandenen Bahnhaltdepunkten eingebaut werden. Diese sind bei dichter Besiedlung häufiger. Die Länge eines Überholgleises beträgt etwa 750 m.
- Die Ertüchtigung der Oberleitung für den Hochgeschwindigkeitsverkehr umfasst in der Bilanz neue Schwenkausleger aus Aluminium und ein neues Kettenwerk nach der Regeloberleitung 250. Dabei wird angenommen, dass die Tragseile aus Aluminiumbronze gefertigt werden.

- Die Elektrifizierung von Hochgeschwindigkeitsstrecken wird mit Schleuderbetonmasten und von allen anderen Strecken mit Stahlgittermasten bilanziert. Zusätzlich sind Schwenkausleger und Kettenwerk zu bilanzieren.

Die Bilanzen der Schienenwege werden ohne Kenntnis der tatsächlich durchgeführten Arbeiten anhand von typisierten Angaben aus dem Schienenwegeausbauplan [Bundestag97a] durchgeführt. Durch diesen allgemeinen Charakter der Bilanzen sind die nach dem Fortpflanzungsgesetz (Abschnitt 3.2.2) berechneten Fehler eher eine Unterschätzung. Dies muss bei der Weiterverarbeitung der Bilanzergebnisse berücksichtigt werden.

Anhand der Angaben für die Bundesstraßen (s. Anhang D) ist es möglich abzuschätzen, wie umfassend die anderen Bilanzen im Straßenbau sind. Daraus ergibt sich, dass im reinen Straßenbau, also ohne Bauwerke, auch bei den ungenaueren Bilanzen etwa 80 % der Aufwendungen bilanziert werden können. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass der Transportaufwand für einige Projekte höher liegt, als in dieser Arbeit angenommen (maximal jedoch $< 10\%$).

Wegen fehlender Angaben können nur zum Teil die Energieaufwendungen für Erdbewegungen und Lärmschutz berücksichtigt werden. Nicht vorliegende Angaben dieser Art können nicht durch Annahmen ausgeglichen werden, da sie rein spekulativ wären. Bei einigen Projekten ist es nicht möglich, Angaben zu Kleinbauwerken und Nebenstraßen von Angaben zum Fahrweg zu trennen. In diesen Fällen wird die Bilanz für das gesamte Projekt durchgeführt und dies bei der Verallgemeinerung des Projektes auf die Netze berücksichtigt. Angaben über den Umfang der Beispielbilanzen sind aus den Tabellen im Anhang D ersichtlich.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Bilanzen eher zu niedrigen als zu hohen Energieeinsatz ausweisen. Bei ihrer späteren Übertragung auf die Projekte des Bundesverkehrswegeplans werden die unterschiedlichen Bilanzgrenzen berücksichtigt.

3.3 Ergebnisse der Bilanzierung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Bilanzierung vorgestellt, die für das weitere Vorgehen als Eingangsdaten in der Korridoreinteilung benötigt werden. Dazu werden die Beispielbilanzen der Straßenneu- und -ausbauprojekte direkt ähnlichen Vorhaben in den Korridoren zugeordnet. Die ähnlichen Merkmale sind Bauweise und geographische Eigenschaften der Region. Von den Bilanzen der Anschlussstellen, Tunnel und Großbrücken werden die Mittelwerte den Vorhaben in den jeweiligen Korridoren gemäß ihrer Anzahl und der durchschnittlichen Länge zugeordnet (s. Kapitel 3.5).

Fernstraßenneubau

Die Bilanzergebnisse der Straßenneubauten sind in Tabelle 3.3 gezeigt. Sie enthält neben den KEA-Werten auch die Werte der CO₂-Emissionen. Andere Emissionen werden zwar berechnet, auf eine Darstellung wird allerdings hier zur besseren Übersicht verzichtet. Die Bezugsgröße ist 1 m² Fahrbahnoberfläche, um trotz der unterschiedlichen Fahrbahnbreiten eine gute Vergleichbarkeit zu erreichen. Die befestigte Standardbreite einer vierstreifigen Autobahn liegt bei 23 m, diejenige einer sechsstreifigen bei 29 m. Bei der Einbindung der Bilanzdaten in das Infrastrukturmodell werden diese Breiten berücksichtigt. Die Fehler werden gemäß Kapitel 3.2.2 berechnet.

Der KEA wird sowohl mit als auch ohne den Heizwert von Bitumen berechnet (siehe S. 26). Der spezifische KEA ist bei den Bundesstraßen größer als bei den Autobahnen (Tabelle 3.3). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der B 255 und B 41 auch die Bauwerke und Nebenstrecken mitbilanziert werden. Ihr Anteil am KEA ist auf die Baulänge bezogen höher als bei den anderen Bilanzen, da die Bezugsstrecke kürzer ist.

Die Werte des KEA der Bitumenfahrbahnen liegen in einem engen Bereich um etwa 2 GJ/m², wie in Abbildung 3.2 gezeigt ist. Das entspricht auch dem Literaturwert ([Hoffmann93]). Ohne Berücksichtigung des Heizwertes von Bitumen liegen die erhaltenen Werte im Bereich um 0,75 GJ/m², welches den Literaturwerten aus [Beyert85] und [Benz94] entspricht. In diesem Bereich liegt auch der KEA der Neubauten mit Betondecke. Lässt man also den Energieinhalt von Bitumen außer Acht, so ist der KEA von Bitumen- und Betonbauweise im Rahmen der hier gegebenen Genauigkeit gleich hoch.

Einzelheiten der bilanzierten Projekte können den Tabellen in Anhang C entnommen werden.

Fernstraßenausbau

Die Bilanzergebnisse des Ausbaus variieren erheblich stärker als die Ergebnisse der Neubaubilanz. Das ist vor allem eine Folge des unterschiedlichen Umfangs der Vorhaben. Vergleichbar sind die Bilanzen der Projekte A 8 und A 4 bei Erfurt (Tabelle 3.4 und Abbildung 3.3), da beide die Sanierung der bestehenden Fahrbahn beinhalten. Bildet man den Mittelwert ohne diese Projekte, erhält man für den Ausbau von bituminösen Fahrbahnen etwa 17.800 ± 4.500 GJ/km und für den Ausbau von Betondeckschichten rund 7.800 ± 780 GJ/km.

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Neubau von Bundesfernstraßen. Der Mittelwert wird ohne die in der Tabelle enthaltenen Bundesstraßen gebildet. Der Fehler des Mittelwertes entspricht der Standardabweichung.

Bauwerk	Bauart	Energieaufwand [GJ/m ²]	Energieaufwand ohne Bitumen [GJ/m ²]	CO ₂ [kg/m ²]
A 395	Bitumen	2,001 ± 0,239	0,832 ± 0,097	58,38 ± 7,06
A 7	Bitumen	2,521 ± 0,349	1,030 ± 0,190	88,72 ± 19,35
A 71, 5311	Beton	0,877 ± 0,164	0,877 ± 0,164	87,17 ± 12,72
A 71, 5312	Beton	0,958 ± 0,164	0,958 ± 0,164	89,04 ± 12,72
A 71, 5321	Bitumen	2,444 ± 0,317	1,055 ± 0,178	81,56 ± 13,30
A 99	Bitumen	2,024 ± 0,278	0,584 ± 0,083	45,00 ± 6,97
Spange Eschenried	Bitumen	2,166 ± 0,294	0,627 ± 0,075	48,31 ± 6,39
A 70	Bitumen	1,573 ± 0,168	0,566 ± 0,065	49,20 ± 6,71
B 255	Bitumen	3,531 ± 0,365		106,87 ± 10,06
B 41	Bitumen	4,687 ± 0,477		163,26 ± 18,43
Mittelwert (ohne Bundesstraßen)		2,278 ± 1,146	0,909 ± 0,172	81,75 ± 35,72

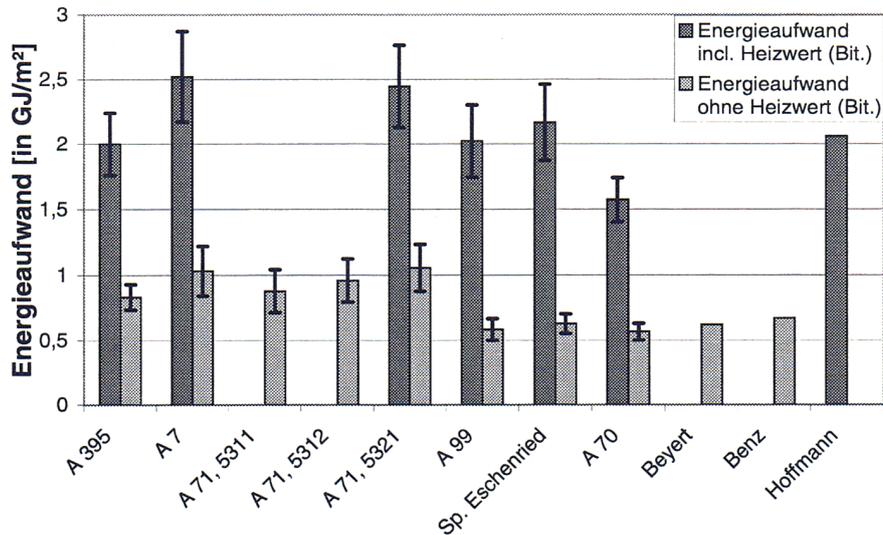


Abbildung 3.2: Kumulierter Energieaufwand der bilanzierten Autobahnneubauten. Die Ordinateneinheit ist GJ pro m^2 Straßenoberfläche. Die dunklen Säulen sind die KEA-Werte mit Heizwert von Bitumen, die hellen sind ohne den Heizwert berechnet. Die drei rechten Säulen stellen Literaturwerte dar. ([Beyert85], [Benz94] und [Hoffmann93]).

Neubau von Anschlussstellen

Die untersuchten Anschlussstellen liegen an der A 4 und der A 71. Zu den Anschlussstellen gehören jeweils zwei Beschleunigungs- und Verzögerungstreifen mit einer Länge von je 250 m. Zusätzlich werden die Zuführungsäste und die Über- oder Unterführung bilanziert. Tabelle 3.5 enthält die Bilanzergebnisse für die Anschlussstellen. Je nach ihrer Ausführung variiert der Energieeinsatz erheblich zwischen 20.000 GJ bis 56.000 GJ. Die berechneten Fehlerbreiten bei diesen Projekten sind größer (etwa $\pm 30\%$) als bei anderen in dieser Arbeit bilanzierten Bauten, da Schätzungen über den Bauumfang anhand von Bauplänen vorgenommen werden mussten.

Für das Autobahnkreuz Erfurt liegen Übersichtspläne vor, so dass eine Bilanz durchgeführt werden kann. Sie ergibt einen kumulierten Energieaufwand von 176.000 ± 37.000 GJ für das Autobahnkreuz.

Neubau von Tunneln

Für diese Arbeit werden sechs Tunnelbauwerke bilanziert, davon wurde nur der Tunnel Döggingen mit der Fräsmaschine vorgetrieben, alle anderen mit Sprengvortrieb. Für die unterschiedlichen Ergebnisse in den Angaben der Tabelle 3.6 sind

Tabelle 3.4: Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Ausbau von Bundesfernstraßen. Auf die Bildung eines Mittelwertes wurde auf Grund des unterschiedlichen Maßnahmenumfangs verzichtet.

Bauwerk	Bauart	Anmerkung	Energieaufwand [GJ/km]	CO ₂ [t/km]
A 4, Kölner Südring	Bitumen		12.910 ± 1.989	322,0 ± 76,6
A 4, Erfurt	Bitumen	mit Sanierung	45.620 ± 4851	945,9 ± 94,5
A 5, ab Baden-Baden	Beton	ohne Erdarbeiten	6.587 ± 789	591,6 ± 59,6
A 5, von Bühl bis Achern	Beton	mit Erdarbeiten und Kleinbauwerken	9.034 ± 1.354	675,7 ± 122,5
A 5, ab Heidelberg	Bitumen	mit Bauwerken und Lärmschutz	21.844 ± 5.941	1.604,0 ± 398,9
A 8, München	Bitumen	mit Bauwerken und Sanierung	45.087 ± 5.607	937,7 ± 112,0
A 9, bei Bayreuth	Bitumen	mit Bauwerken	18.544 ± 2.537	971,7 ± 124,1

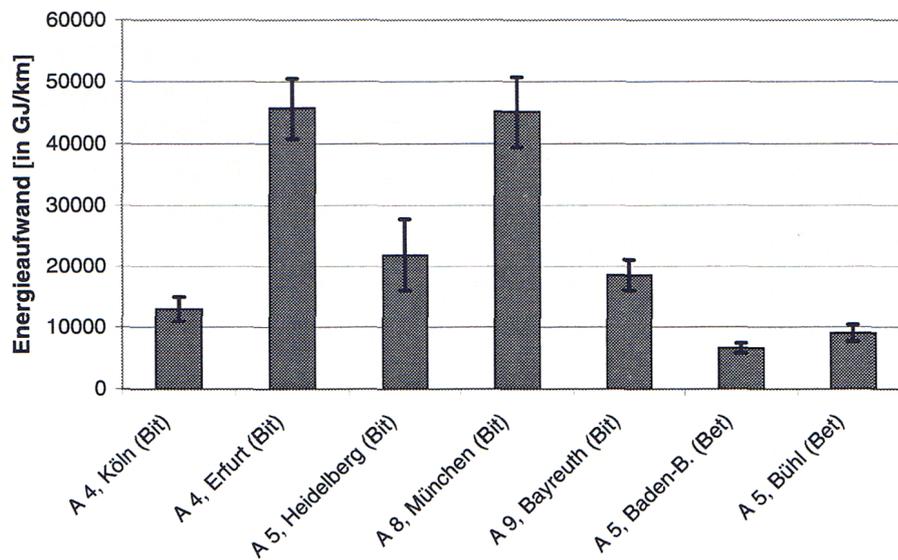


Abbildung 3.3: Kumulierter Energieaufwand der bilanzierten Ausbauprojekte. Aufgetragen ist der KEA je Ausbaukilometer. Die hohen Werte der A 4 bei Erfurt und der A 8 sind durch die mitbilanzierten Sanierungsarbeiten bedingt.

Tabelle 3.5: Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Bau von Anschlussstellen. Der Fehler des Mittelwertes entspricht der Standardabweichung.

Anschlussstelle	Energieaufwand	CO ₂
	[GJ]	[t]
A 71, Zelle Mehliis	34.609 ± 9.818	1.868 ± 643
A 71, Arnstadt Nord	55.546 ± 14.283	2.235 ± 427
A 71, Arnstadt Süd	20.022 ± 5.014	1.270 ± 327
A 4, Eichelborn	24.864 ± 2.260	820 ± 134
A 4, Erfurt Ost	26.036 ± 2.204	830 ± 108
Mittelwert	32.215 ± 14.062	1.405 ± 631

vor allem unterschiedliche Ausbruch- und Stahlbetonmengen verantwortlich. Für einen Meter Tunnel werden knapp 100 m³ Fels ausgebrochen, rund 90 kg Sprengstoff benötigt, zwischen 10 und 20 m³ Stahlbeton und – allerdings mit großen Variationen – rund 1 t Stahl eingebaut [Donaueschingen91]. Die Standardabweichung ist mit ± 24 % des Mittelwertes allerdings geringer als bei Anschlussstellen und Großbrücken. Die Standardausführungen der Bauwerke ist in Anhang A erläutert.

Neubau von Brücken

Die bilanzierten Brücken sind nach dem in Anhang A.3.2, Abbildung A.7 beschriebenen Schema mit Widerlagern und Pfeilern aus Stahlbeton und Überbau aus Spannbeton gebaut. Die Daten werden auf den Quadratmeter Brückenfläche bezogen. Der Bedarf an Stahlbeton variiert zwischen 1,14 t/m² und 4,76 t/m². Erheblich niedriger (bei ca. 0,1 t/m²) liegt der Einbau von Stahlbeton bei der Dickelsbachbrücke der B 41. Die Unterschiede entstehen durch die verschiedenen Stützweiten, vor allem aber durch die Ausgestaltungen und Größen der Widerlager, in denen der Großteil des Stahlbetons verbaut wird. Der Bedarf an Spannbeton variiert weniger stark zwischen 1 t/m² und 1,9 t/m². Über den kumulierten Energieaufwand gibt Tabelle 3.7 Auskunft.

Autobahnbauwerke, bei denen die Autobahn über die nachgeordnete Straße geführt wird, benötigen einen kumulierten Energieaufwand von 13,92 GJ/m². Der Aufwand für Überführungsbauwerke, bei denen die nachgeordnete Straße über die Autobahn geführt wird, ist mit 15,69 GJ/m² etwas höher. Diese KEA-Werte werden in der Übertragung der Beispielprojekte auf die Vorhaben in den Korridoren benötigt.

Tabelle 3.6: *Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Bau von Tunnelbauwerken. Der Fehler des Mittelwertes entspricht der Standardabweichung.*

Bauwerk	Energieaufwand	CO ₂
	[GJ/m]	[t/m]
Tunnel Behringen	171,6 ± 48,2	9,717 ± 3,111
Kirchbergtunnel	149,1 ± 29,1	9,358 ± 1,921
Schlossbergtunnel	96,1 ± 20,9	5,699 ± 1,362
Langenfirsttunnel	167,6 ± 40,7	11,044 ± 5,568
Tunnel Döggingen	112,0 ± 28,6	6,875 ± 2,156
Sommerbergtunnel	113,1 ± 57,8	7,659 ± 3,863
Mittelwert	134,9 ± 32	8,392 ± 1,991

Tabelle 3.7: *Ergebnisse der Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Bau von Großbrücken. Der Fehler des Mittelwertes entspricht der Standardabweichung.*

Bauwerk	Energieaufwand	CO ₂
	[GJ/m ²]	[kg/m ²]
Geratalbrücke	9,771 ± 2,09	503,74 ± 82,05
Steinalbrücke	16,867 ± 3,635	1032,62 ± 237,86
Wipralbrücke	12,282 ± 2,873	667,78 ± 150,36
Dickelsbachbrücke	8,234 ± 1,112	393,89 ± 36,83
Mittelwert	11,788 ± 3,774	649,51 ± 279,10

Tabelle 3.8: Ergebnisse der Bilanz des kumulierten Energieaufwands der Schienenwegeprojekte.

Projekt	Energieaufwand
	[GJ/km]
Elektrifizierung Wilhelmshaven - Oldenburg	1.300 ± 380
Zubau eines Gleises Plauen - Hof	6.340 ± 950
Oberleitung Aachen-Köln	835 ± 420
Zubau von 2 Gleisen Karlsruhe - Basel	15.300 ± 2.200
Überholgleise Dortmund - Hagen	3.250 ± 1.050
Neubau Köln - Frankfurt	36.300 ± 3.900

Die Schienenwegeprojekte

Tabelle 3.8 enthält den kumulierten Energieaufwand der sechs Beispielprojekte des Schienenwegebbaus. Diese Projekte sind sehr typisiert. Sie werden, wie in Kapitel 3.5 erläutert, entsprechend den Angaben aus dem Schienenwegebbauplan [Bundestag97a] auf die Vorhaben in den Korridoren bezogen. Je nach Umfang der Vorhaben werden die Ergebnisse der Beispielbilanzen auch kombiniert. Einzelheiten zu den Schienenwegeprojekten können der Tabelle in Anhang C entnommen werden.

Wie zu erwarten, ergibt sich eine starke Differenzierung des kumulierten Energieaufwands entsprechend dem Umfang der Projekte. Das Verhältnis von ein- zu zweigleisigem Zubau liegt bei knapp 1:2,4. Der Neubau zwischen Köln und Frankfurt hat durch die Festbettbauweise mit Betonuntergrund einen mehr als doppelt so hohen KEA wie der Zubau von zwei Gleisen auf Schotterbett. Aus energetischer Sicht ist daher ein Bau von Gleisen auf Schotterbett günstiger. Langfristig erhofft sich die Deutsche Bahn AG allerdings von der Festbettbauweise einen erheblich niedrigeren Erhaltungsaufwand [DBAG97].

3.4 Einteilung der Verkehrsnetze in Korridore

Die Einteilung der Verkehrsnetze in Korridore erfolgt aus drei Überlegungen:

Erstens sollen Alternativstrecken gemeinsam erfasst werden. Damit wird erreicht, dass einem Korridor *eine* Kapazität zugeschrieben werden kann, ohne dass Ausweichreaktionen modelliert werden müssen. Im Fernverkehr ist häufig die Möglichkeit gegeben, auf Alternativstrecken ausweichen zu können. Damit ist das Verkehrsverhalten eines Fahrzeugführers, im Falle einer belasteten Route auf eine andere Strecke im gleichen Korridor auszuweichen, implizit im Modell enthalten. Ähnliches gilt, wenn auch eingeschränkt, für den Schienenverkehr, bei dem zum Beispiel bei Bauarbeiten oder Unfällen Züge auf Alternativstrecken verlegt werden.

Zweitens ist es bei der Abbildung von Sachverhalten, die in räumlichen Dimensionen vorliegen, in ein Optimierungsmodell notwendig, diese in einen Datensatz für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik zu überführen. Dazu bietet die Einteilung der Netze in Korridore eine zweistufige Vorgehensweise. Die Daten einer großen Anzahl einzelner Netzabschnitte (Länge, Bauwerke, Anzahl der Fahrstreifen oder Gleise, etc.) werden in der Korridoreinteilung zu Daten für die Korridore aggregiert, die vom Infrastrukturmodell weiter zu Daten für Deutschland aggregiert werden. Dieses Vorgehen ermöglicht, dass bei den Iterationen von Infrastruktur- und Optimierungsmodell (Kapitel 4.5.4) nicht die deutschlandweite Kapazität die Optimierungslösung begrenzt, sondern die Kapazitäten der Korridore.

Drittens kann auf diese Weise die Datenmenge reduziert werden. Die Daten des Autobahnnetzes werden in etwa 250 Teilstücken erfasst (Kapitel 4.1, S. 45) und den neun Korridoren zugeordnet. Beim Bahnnetz wird das Hauptschienennetz den Korridoren zugeordnet. Die Zuordnung der Bahnbauwerke muss in jedem Korridor mit der gleichen deutschlandweiten Durchschnittszahl der Bauwerke in Bezug auf die Länge vorgenommen werden (s. S. 39).

Die Einteilung der Netze erfolgte anhand der klar abgrenzbaren Hauptstrecken des Autobahnnetzes. Diese Hauptstrecken sind die Autobahnen mit einstelligen Ziffern, wobei ungerade Ziffern Autobahnen von Nord nach Süd und gerade Ziffern Autobahnen von West nach Ost bezeichnen. Entlang dieser Autobahnen werden die Korridore definiert. Die zwischen den Hauptachsen liegenden Strecken, die in die gleiche Hauptrichtung (Nord-Süd, West-Ost) führen, werden den Korridoren zugerechnet, zu deren Hauptstrecke sie den geringeren Abstand haben. Auf gleiche Weise lassen sich im Schienennetz Hauptstrecken finden, so dass eine ähnliche Einteilung vorgenommen wird. Abbildung 3.4 zeigt die gewählten Korridore sowohl für das Autobahn- als auch das Schienennetz.

In Nord-Süd-Richtung führt der Korridor 1/3/5 von Bremen und dem Emsland bis nach Freiburg und Basel, der Korridor 7 von Flensburg über Hamburg und

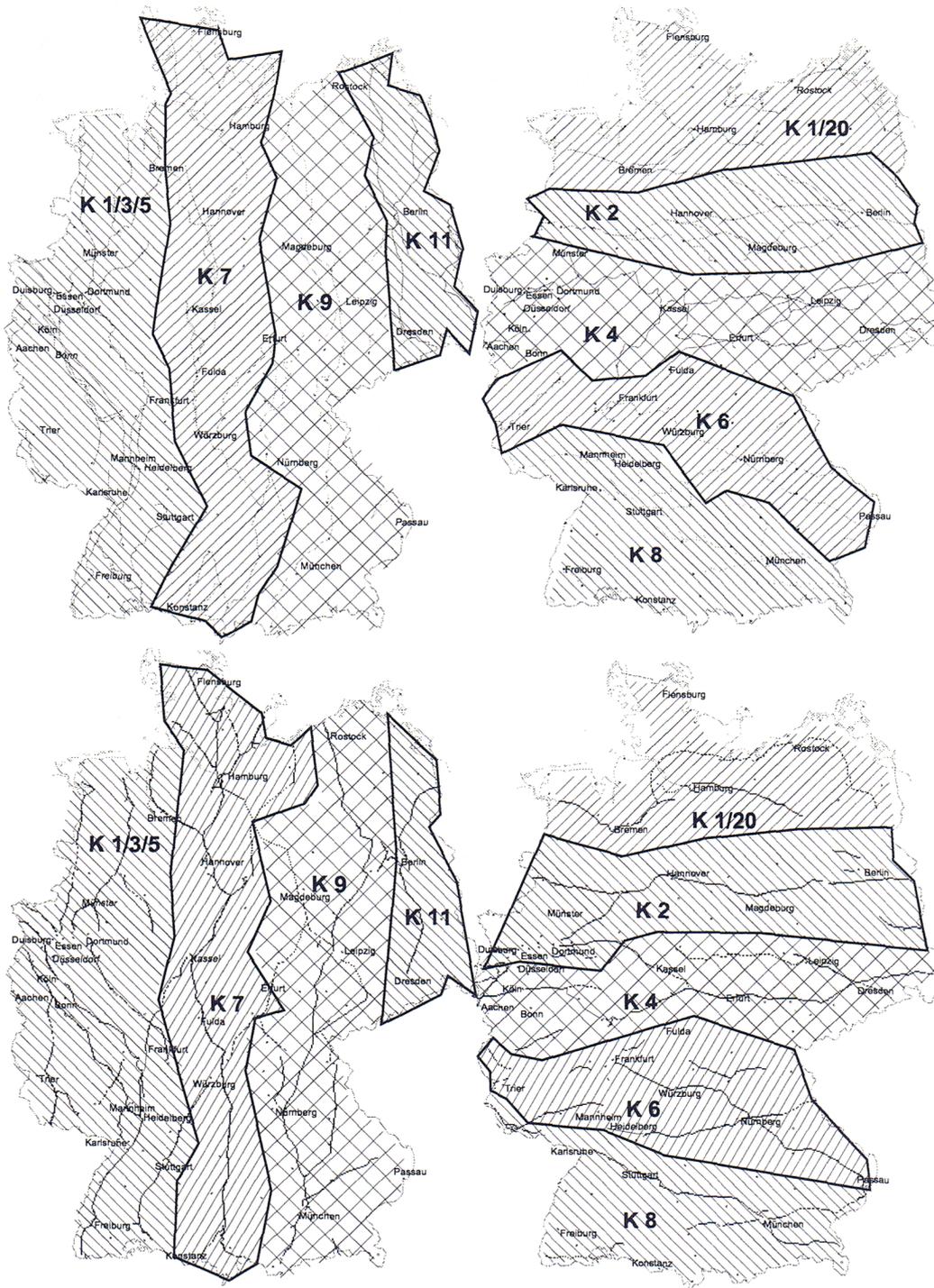


Abbildung 3.4: Karte der Korridoreinteilung der Verkehrswege. Oben: Hauptschiennetz, unten: Autobahnen. Die Autobahnen der Ballungszentren sind ausgenommen, da auf ihnen hauptsächlich Nahverkehr abläuft. Die Schraffuren entsprechen den Bereichen, in denen parallel verlaufende Strecken den Hauptlinien zugeordnet werden.

Kassel bis zum Bodensee, der Korridor 9 von Rostock über Berlin und Erfurt bis nach München und der Korridor 11 entlang der Grenze nach Polen unter Einbeziehung Berlins. Für die West-Ost-Richtung wurden fünf Korridore definiert. Der nördlichste Korridor verläuft von Bremen über Hamburg nach Mecklenburg-Vorpommern, der Korridor 2 liegt entlang der A 2 und der Hauptbahnstrecke Münsterland/nördliches Ruhrgebiet - Hannover - Berlin, Korridor 4 führt vom Rheinland über Kassel, Erfurt, Halle und Leipzig nach Dresden. Der Korridor 6 verbindet Rheinland-Pfalz über Frankfurt a.M., Würzburg und Nürnberg mit dem Bayerischen Wald und dem Alpenvorland. Der Korridor 8 beinhaltet den südlichen Teil von Baden-Württemberg und Bayern.

3.5 Übertragung der Beispielprojekte auf die Korridore

Die Zuordnung von Daten zu den Korridoren erfolgt, um die Berechnung

- der Kapazität der vorhandenen Netze,
- von KEA und Emissionen der Vorhaben und
- der Kapazität der Ausbautvorhaben

zu ermöglichen.

Jedem Korridor ist durch das genannte Vorgehen eine bestimmte Streckenlänge zugeordnet, im Fall der Autobahn getrennt in vier- und sechstreifige Strecken. Die Berechnung der vorhandenen Kapazität eines Korridors erfolgt im Infrastrukturmodell anhand der vorhandenen Streckenlänge. Im bestehenden Schienennetz (im Jahr 1989) sind keine Hochgeschwindigkeitsstrecken enthalten, bei denen eine getrennte Berechnung der Kapazität notwendig wäre².

Die folgenden Angaben sind für die Berechnung von KEA und Emissionen der Vorhaben des BVWP in jedem Korridor erforderlich:

- Länge und Art der Vorhaben (bei der Autobahn: Aus- oder Neubau, beim Schienennetz: Neubau, Ausbau, Überholgleise oder Maßnahmen zur Erhöhung der Geschwindigkeit);
- Zuordnung von Beispielprojekten;
- Durchschnittliche Anzahl von Tunnel und Brücken und, im Falle der Autobahnen, Anzahl der Anschlussstellen und Autobahnkreuze.

²Hochgeschwindigkeitsstrecken haben eine höhere Kapazität.

Der KEA und die Emissionen der Vorhaben werden berechnet, indem der auf die Baulänge bezogene KEA und die Emissionen der Beispielprojekte mit der Länge der Vorhaben multipliziert wird. Zusätzlich werden KEA und Emissionen der Bauwerke berechnet, indem die Länge der Vorhaben mit der Anzahl der Bauwerke je Kilometer multipliziert wird, so dass auf die Anzahl der Bauwerke in den Vorhaben geschlossen werden kann. Diese Anzahl wird mit dem mittleren KEA und den Emissionen der Herstellung der Bauwerke multipliziert und das Ergebnis zu dem schon berechneten KEA und den Emissionen der Vorhaben addiert. Als Resultat ergibt sich der KEA und die Emissionen der Vorhaben in den Korridoren. Für die Projekte der Schienenwege wird anhand der Einzelheiten ihrer Bauausführung, die aus dem Schienenwegeausbauplan [Bundestag97a] ersichtlich ist, eine Zuordnung der Beispielprojekte und damit des Energieaufwands und der Emissionen vorgenommen. Da keine Angaben zur Anzahl von Bauwerken der Schienenwege in den Korridoren zu erhalten waren, müssen hier die bundesweiten Durchschnittswerte angenommen werden (0,8 Brücken je Gleiskilometer, 0,02 Tunnel je Gleiskilometer [DBAG96]).

Mit den Angaben in Tabelle 3.9 ist die Berechnung von KEA und Emissionen beim Autobahnausbau möglich. Ähnliche Angaben bezüglich des Ausbauumfangs liegen auch für das Schienennetz vor (Tabelle 4.3, S. 57 enthält Angaben über die Länge der Projekte des Schienennetzes). Mit den Angaben über den Umfang und die Art des Netzausbaus kann die Kapazität im Infrastrukturmodell berechnet werden (Kapitel 4.5.2). Mit der Korridoreinteilung werden wesentliche Daten für das Infrastrukturmodell bereitgestellt.

Tabelle 3.9: Übersicht über statistische Daten der Autobahnen als Eingangsdaten in die Korridoraufteilung. Diese Liste bildet eine Grundlage der Berechnung der Energieaufwands bei den Vorhaben. Die letzte Spalte enthält die Beispielprojekte, die den Korridoren zugeordnet sind.

Korridor	Länge 4-streifig [km]	Länge 6-streifig [km]	Großbrücken [1/100 km]	Tunnel [1/100 km]	Autobahnkreuze [1/100 km]	Anschlussstellen [1/100 km]	Kleinbauwerke [1/100 km]	Neubau bis 2020 [km]	Ausbau bis 2020 [km]	Beispielprojekte
1/3/5	2.113	379	3	0,08	3	15	63	170	741	A4, A8 A99, A395 A71(5321)
7	1.311	265	7	0,43	2	17	54	455	289	A4, A7 A9, A70 A71(5321) A395
9	950	214	11	0	2	18	63	552	443	A8, A9, A70 A71(5321)
11/13	312	0	2,24	0	1	15	56	0	52	A8
1/20	219	20	11,69	0	3	24	81	482	80	A4, A99
2	835	93	8	0	3	16	59	61	495	A4, A7, A70
4	896	10	13	0	2	15	56	378	530	A4, A7, A8 A9 A70 A71(5321)
6	1.025	46	17,64	0	2	14	49	95	304	A4, A7 A9, A70
8	416	136	15	6	3	28	62	270	303	A4, A8 A70, A99 A71(5321)

Kapitel 4

Einbindung der Infrastruktur in das Optimierungsmodell

Nachdem im vorhergehenden Kapitel die Bilanz der Projekte und die Korridor-einteilung vorgestellt wurden, werden im Folgenden das Infrastrukturmodell und die Einbindung der Zwischenergebnisse erläutert (Abbildung 4.1). Auf die Belastung der Verkehrsnetze und mögliche Maßnahmen zur Kapazitätserweiterung wird dabei besonders eingegangen (Abschnitte 4.1, 4.2 und 4.3).

Die primäre Aufgabe des Infrastrukturmodells ist, mit den vom Optimierungsmodell gegebenen Fahrleistungen den kapazitiv notwendigen Ausbau der Infrastruktur zu ermitteln. Zusätzlich soll das Infrastrukturmodell:

- KEA und Emissionen (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeldioxid, Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe) des Ausbaus berechnen.
- die ohne Ausbau vorhandene Kapazität für das Optimierungsmodell berechnen.
- die Kosten und die Kapazität des Ausbaus für das Optimierungsmodell berechnen.

Die Haupteingangsgrößen in das Infrastrukturmodell sind die Fahrleistungen der einzelnen Verkehrsträger, die als Gesamtbelastung der Netze auf die Korridore aufgeteilt werden. Die so berechneten Belastungen werden mit den Kapazitäten verglichen. Reichen die Kapazitäten nicht aus, ermittelt das Infrastrukturmodell den Ausbau der Netze.

Verknüpfungen, die in dieser Arbeit vorgenommen wurden, zeigt Abbildung 4.2. Anhand von Materialmengen, Arbeitsleistungen und Entfernungen werden mit

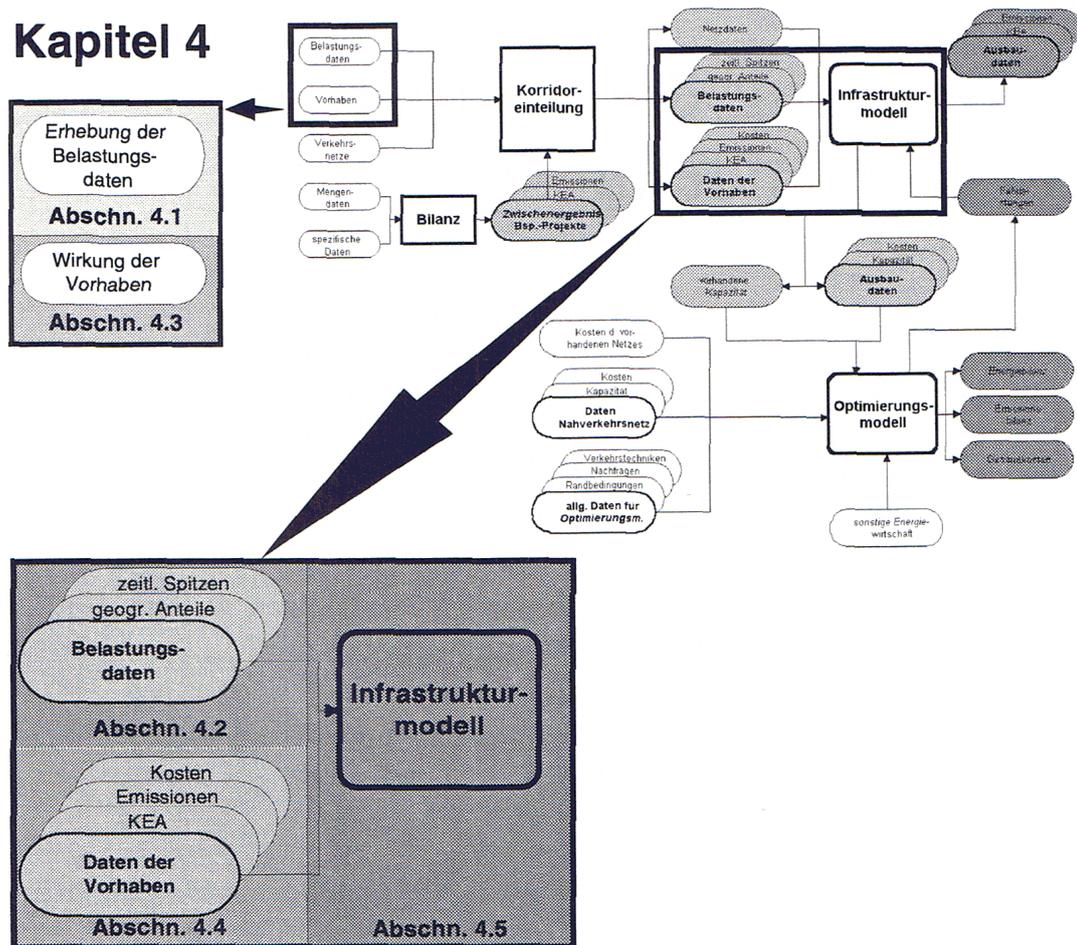


Abbildung 4.1: Schema der in Kapitel 4 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.

Hilfe spezifischer Daten KEA und Emissionswerte der Beispielprojekte bilanziert. Die Daten der Beispielprojekte, Belastungsdaten und Kostendaten werden dann in einer Tabelle zu den Daten für die Korridore aggregiert. Diese bilden die Grundlage für das Infrastrukturmodell. Als Ergebnis des Infrastrukturmodells erhält man die Gesamtlänge der ermittelten Projekte, Gesamtkosten, Gesamtenergieaufwand und Gesamtemissionen für den notwendigen Ausbau. Diese Daten können für die einzelnen Korridore aus einer Tabelle entnommen werden. Die Kosten werden zusammen mit den Fahrleistungen in einer weiteren Tabelle umgerechnet, um sie als Eingangsdaten für das Optimierungsmodell bereitzustellen. Dieses berechnet mit den neuen Daten neue Fahrleistungen, die in das Infrastrukturmodell eingespeist werden. Diese Iteration wird bis zu einer stabilen Lösung wiederholt.

Die Berechnung des Ausbaus der Verkehrsnetze mit dem Infrastrukturmodell unterliegt folgenden Einschränkungen:

- Das Infrastrukturmodell dient zur Berechnung des Ausbaus der Fernverkehrsnetze. In diesen Netzen erfolgt der Ausbau aus kapazitiven Gründen, also dann, wenn die Spitzenbelastung die Kapazität übersteigt. Da im Nahverkehr der Ausbau der Netze vor allem aus Erschließungsgründen erfolgt, wird der Ausbau der Nahverkehrsnetze nicht im Infrastrukturmodell abgebildet. Mit der Betrachtung der Fernverkehrsnetze ist schon ein erheblicher Teil der Verkehrsleistung in Deutschland abgedeckt. So erfolgt auf dem Autobahnnetz mehr als die Hälfte der gesamten Straßenverkehrsleistung in Deutschland.
- Neben der Kapazitätserweiterung werden keine weiteren Gründe für den Ausbau der Netze im Infrastrukturmodell abgebildet. Diese Gründe können die Beseitigung von Stautellen, die Ergänzung von Netzlücken, die Erschließung von Regionen oder Schaffung von Arbeitsplätzen sein. Zu Stautellen im existierenden Netz, die außerhalb von Baustellen liegen, liegen keine Informationen vor. Zur Abbildung der Ergänzung von Netzlücken ist die geographische Gliederung in Korridore nicht ausreichend detailliert. Die Erschließung von Regionen und Schaffung von Arbeitsplätzen sind politische Gründe, die in diesem Modell nicht abgebildet werden.

Im Folgenden wird zunächst die Erhebung der Belastungsdaten (Abschnitt 4.1) und ihre Umrechnung (Abschnitt 4.2) für das Infrastrukturmodell dargelegt. In Abschnitt 4.3 wird eine Übersicht über die möglichen Vorhaben und Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung gegeben. Die Daten der Vorhaben, die in das Infrastrukturmodell eingehen, werden in Abschnitt 4.4 erläutert. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden die Rechnungen, die dem Infrastrukturmodell zu Grunde liegen, und die Übertragung der Ergebnisse in das Optimierungsmodell dargelegt.

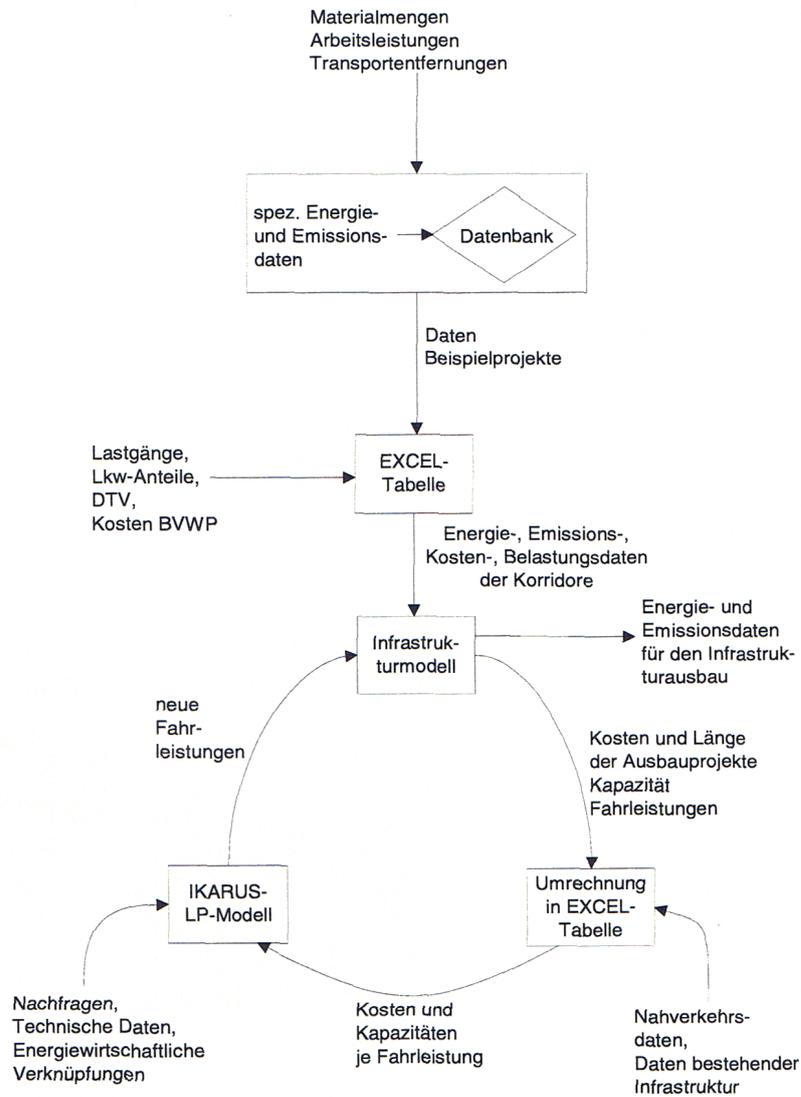


Abbildung 4.2: Schema der in dieser Arbeit vorgenommenen Berechnungen und Verknüpfungen.

4.1 Erhebung von Belastungsdaten der Verkehrsnetze

Die Belastungsdaten, die in das Modell eingehen, werden aus drei Quellen berechnet. Es liegen zwei automatische Verkehrszählungen auf den Bundesautobahnen aus den Jahren 1987 [BfS87] und 1995 [BfS95] vor. Als dritte Datenquelle konnte auf die Prognosedaten des Bundesverkehrswegeplans für das Jahr 2010 [IVV95] zurückgegriffen werden. Diese Datenquellen sind nur für den Straßenverkehr gültig. Für den Schienenverkehr konnten keine entsprechenden Daten ermittelt werden.

Für das Infrastrukturmodell werden Daten benötigt, die für die Jahre 1989, 1995, 2005 und 2020 eine geographische und eine zeitliche Einteilung der deutschlandweiten Fahrleistungen ermöglichen¹. Für die geographische Einteilung muss der Anteil eines Korridores an der gesamten Fahrleistung bekannt sein. Die zeitliche Einteilung, das heißt die Berechnung der Spitzenlast, muss für jeden Korridor vorgeben, wie hoch die Belastung zur Spitzenstunde als Anteil an der Jahresfahrleistung ist.

Zur geographischen Einteilung

Von den Daten der Verkehrszählungen und der Prognose wird zunächst der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) betrachtet. Er liegt für jeden Zählabschnitt der Autobahnen vor. Zählabschnitte sind in der Regel durch Anschlussstellen oder Autobahnkreuze definiert. Für das Jahr 1995 werden die verschiedenen Zählabschnitte zu etwa 250 Autobahnteilstücken zusammengefasst. Zwei Zählabschnitte werden dann zusammengefasst, wenn sich der DTV um weniger als $\pm 10\%$ unterscheidet und kein Autobahnkreuz im Teilstück liegt. Dem Teilstück wird der mittlere DTV zugeschrieben. Die Länge der Teilstücke wird mit dem DTV und 365 Tagen/Jahr multipliziert, so erhält man einen Belastungswert, der die Dimension einer Jahresfahrleistung hat. Diese Belastungswerte der Teilstücke eines Korridors werden addiert, so dass man die Belastung in einem Korridor erhält.

In den ca. 250 Teilstücken des Autobahnnetzes, die so für das Jahr 1995 definiert sind, werden ebenfalls die DTV-Werte der Jahre 1987 und 2010 zusammengefasst. Mit diesen Daten wird auf gleiche Weise wie für das Jahr 1995 verfahren.

Für alle Zählabschnitte liegen Schwerverkehrsanteile (Busse und Lkw) vor. Diese werden entsprechend dem DTV für die Jahre 1987, 1995 und 2010 für die Teilstücke umgerechnet. Ist eine Autobahn eine „Ferienautobahn“, also in der Urlaubszeit stark belastet (s. nächster Abschnitt), wird angenommen, dass der

¹Das Jahr 1995 wird hier berücksichtigt, da es in den Modellversionen des IKARUS-Optimierungsmodells ab 1999 als Stützjahr eingeführt werden soll.

Anteil der Busse am Schwerverkehr etwa 6,4 % beträgt. Im Bundesdurchschnitt liegt dieser Anteil bei 3,2 %, der für alle übrigen Strecken angenommen wird.

Auf dieser Datengrundlage erhält man die Belastung getrennt nach Pkw-, Lkw- und Busverkehr in den einzelnen Teilstücken für die Jahre 1987, 1995 und 2010.

Zur Berechnung der Spitzenbelastung

Zusätzlich zum DTV und dem Schwerverkehrsanteil liegen in der Verkehrszählung des Jahres 1987 folgende Daten für jeden Zählabschnitt vor:

- Ferienfaktor
- Wochentagsfaktoren
- Maßgebende stündliche Verkehrsstärke (MSV)
- Linientyp Jahres-, Wochen-, Tagesganglinie

Die Belastung eines Ferientags ist um den Ferienfaktor höher als der DTV. Die Wochentagsfaktoren geben an, wie sich die Belastung an einzelnen Wochentagen sich vom DTV unterscheidet. Die maßgebende stündliche Verkehrsstärke bezeichnet die Verkehrsstärke in der 30.-höchstbelasteten Stunde des Jahres. Die Linientypen entsprechen typisierten Lastgängen wie sie zum Beispiel in Abbildung 4.3 gezeigt werden. Die Verkehrszählung des Jahres 1995 enthält nur noch die MSV und die Linientypen. Wie schon der DTV und die Schwerverkehrsanteile werden auch diese Daten für die Teilstücke aus den Zählabschnitten zusammengefasst.

Zur Berechnung der Höchstbelastung wird angenommen, dass die Lastspitzen zusammenfallen. Das heißt, in der Woche mit der höchsten Belastung wird der am stärksten belastete Wochentag mit der Spitzenstunde betrachtet. Die Daten, die in das Infrastrukturmodell eingehen, müssen als Anteil an der Jahresfahrleistung vorliegen. Das heißt, der Anteil der Woche mit der höchsten Belastung an der Jahresfahrleistung, der Anteil des am stärksten belasteten Wochentages an der Wochenfahrleistung und der Anteil der Spitzenstunde an der Tagesfahrleistung werden benötigt.

Aus der Verkehrszählung für 1987 erhält man die Faktoren für Ferientage, Wochentage und die MSV, aus der Verkehrszählung für 1995 die MSV. Diese Daten werden auf die oben definierten Teilstücke bezogen. Die weitere Berechnung ist im folgenden Abschnitt erläutert.

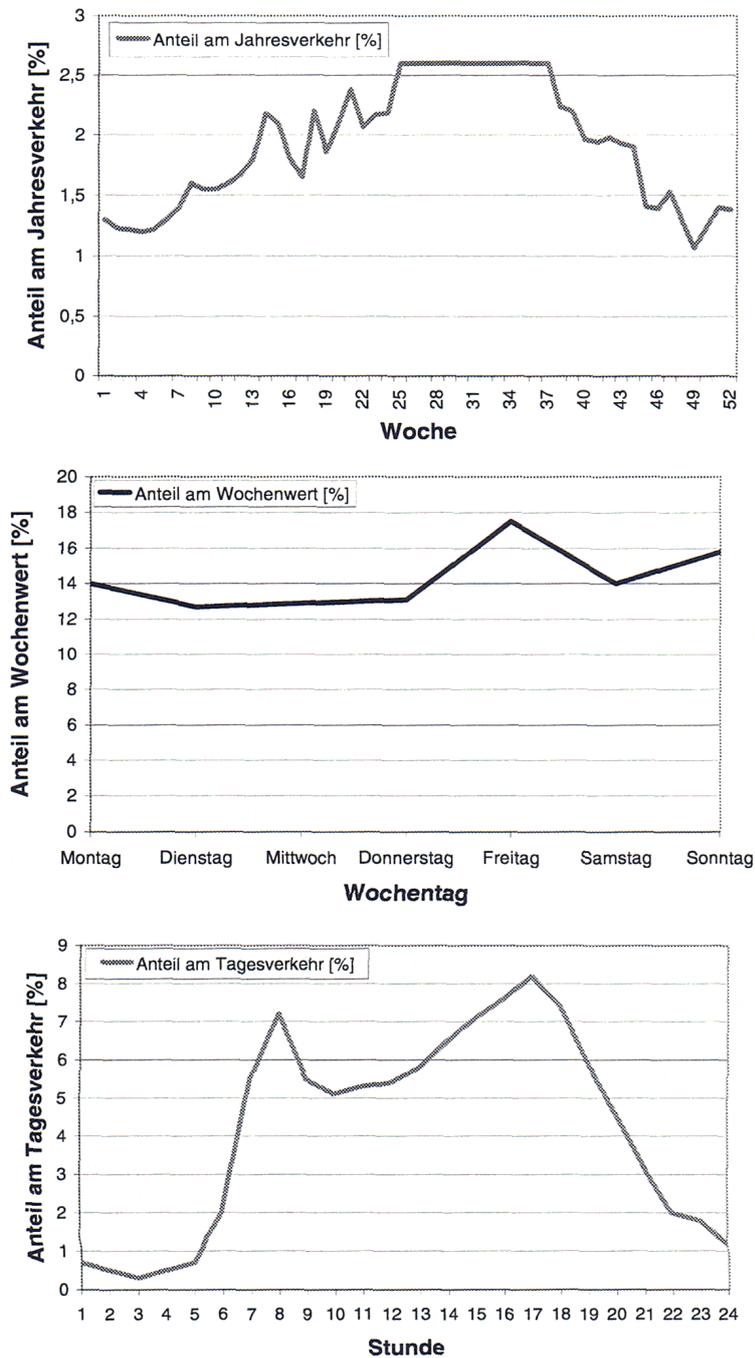


Abbildung 4.3: Lastganglinien einer Beispielausbahn aus dem Jahr 1987. Die Ordinate zeigt für den Jahreslastgang die Anteile einer Woche an der Jahresfahrleistung, beim Wochenlastgang die Anteile der Tage an der Wochenfahrleistung und beim Tageslastgang die Anteile der Stunden an der Tagesfahrleistung.

Oben: Jahreslastgang; in den Sommerwochen wurde die Spitzenbelastung durchgehend eingezeichnet; Mitte: Wochenlastgang mit Maximum am Freitag; unten: Tageslastgang für freitags. [BfS87]

4.2 Umrechnung der Belastungsdaten als Datengrundlage zur Infrastrukturberechnung

Die im vorhergehenden Abschnitt erläuterte Datengrundlage muss in Daten umgerechnet werden, die im Infrastrukturmodell verarbeitet werden können. Dazu wird im Folgenden zunächst die Umrechnung der Belastungsdaten in Anteile der Korridore an der Gesamtbelastung erläutert und anschließend die Berechnung der Spitzenlast in den Korridoren vorgenommen.

4.2.1 Anteile der Korridore an der Belastung

Die Belastungsdaten für Pkw, Lkw und Busse liegen für die einzelnen Teilstücke aus der Verkehrszählung von 1987 vor und werden ohne weitere Änderung für die Berechnung der Korridoranteile im Jahr 1989 verwendet. Die Belastung eines Korridors ist die Summe der Belastungen der Teilstücke. Ihr Anteil an der Gesamtbelastung des Netzes wird berechnet und in das Infrastrukturmodell übernommen. Die Fahrleistung in einem Korridor in einem bestimmten Stützjahr wird im Modell berechnet, indem der Anteil des Korridors mit der Gesamtfahrleistung aus dem Optimierungsmodell multipliziert wird. Die Daten aus der Verkehrszählung des Jahres 1995 werden auf die gleiche Weise wie die Daten des Jahres 1987 in das Infrastrukturmodell für das Jahr 1995 übernommen.

Für das Stützjahr 2005 wird die Belastung in den einzelnen Teilstücken zwischen der Verkehrszählung 1995 und der Prognose für das Jahr 2010 linear interpoliert. Ebenso wird der Schwerverkehrsanteil interpoliert. Mit den interpolierten Daten für die Teilstücke wird genauso wie mit den Daten der Verkehrszählungen verfahren.

Die Daten für das Stützjahr 2020 werden linear von der Verkehrszählung 1995 über die Prognose für 2010 extrapoliert. Das gilt für die DTV und die Schwerverkehrsanteile. Das weitere Verfahren entspricht den oben erläuterten Schritten.

In Tabelle 4.1 werden die Anteile der Verkehrsbelastung der einzelnen Korridore am Gesamtverkehr gezeigt. Deutlich kann man ein Anwachsen des West-Ost-Verkehrs in den Korridoren 1/20, 2 und 4 erkennen. Diese Entwicklung wird durch die Erholung der wirtschaftlichen Strukturen im Osten prognostiziert.

Für den Schienenverkehr liegen keine vergleichbaren Daten vor. Daher wird die geographische Aufteilung der Belastung für alle Stützjahre anlog zu den Straßenkorridoren geschätzt. Letztendlich werden durch das Optimierungsmodell Straßen- und Bahnverkehr als Substitute betrachtet. Daher ist anzunehmen, dass der Bahnverkehr in den Korridoren mit vergleichbaren Anteilen wie der Straßenverkehr stattfindet. Aus diesem Grund ist die Abschätzung gerechtfertigt.

Tabelle 4.1: Anteile der Belastung in den Korridoren an der Gesamtbelastung als Eingangsdaten in die Korridoreinteilung. (Quelle: s. Text)

Verkehrsträger	Korridor	1995	2005	2020
		[%]	[%]	[%]
Straße	K 1/3/5	28,67	24,29	23,05
	K 7	16,69	15,06	14,10
	K 9	13,12	14,07	13,70
	K 11	2,21	2,46	2,70
	K 1/20	3,43	5,70	6,20
	K 2	9,80	10,27	10,80
	K 4	7,59	10,11	11,80
	K 6	10,83	10,60	10,40
	K 8	7,65	7,45	7,25
	Σ		100	100
Schiene	K 1/3/5		20	
	K 7		15	
	K 9		10	
	K 11		5	
	K 1/20		3	
	K 2		7	
	K 4		15	
	K 6		15	
	K 8		10	
	Σ		100	

4.2.2 Berechnung der Spitzenbelastung

Zusätzlich zur geographischen Aufteilung muss die Spitzenbelastung in den Korridoren berechnet werden. Dies geschieht, indem den Autobahnabschnitten bestimmte charakteristische Lastganglinien (Abbildung 4.3) zugewiesen werden. Diese Lastganglinien sind aus der Verkehrszählung des Jahres 1987 entnommen. Auf einer in den Ferien stark belasteten Autobahn finden in einer Ferienwoche etwa 2,6 % der Jahresfahrleistung statt (bei gleichbleibender Belastung fielen auf eine Woche 1,9 %). Viele Strecken sind freitags und am Wochenende zusätzlich stark belastet. Typisch sind dann Werte von etwa 18 % der Wochenfahrleistung oder mehr pro Tag (alle Tage mit gleichbleibender Belastung: 14,3 %). Der Verkehr kann sich zusätzlich noch auf eine Stunde mit Werten von etwa 6 bis 11 % der Tagesfahrleistung (alle Stunden gleich belastet: 4,2 %) konzentrieren [BfS87]. Mit den Werten der Belastung in den Spitzenstunden, am Spitzenwochentag und in der Spitzenwoche eines Jahres und dem DTV kann die Spitzenbelastung einer Autobahn in gleicher Dimension wie die Kapazität (Anschnitt 4.5.2) berechnet werden.

Die Ermittlung der Belastungsdaten ergibt für die Teilstücke des Autobahnnetzes aus der Verkehrszählung des Jahres 1987 Belastungsfaktoren für die Ferien- und Tagesbelastung. Zusätzlich liegen aus den Verkehrszählungen der Jahre 1987 und 1995 Daten für die maßgebende stündliche Verkehrsstärke (MSV) vor. Aus diesen Daten müssen für das Infrastrukturmodell für die Stützjahre 1989, 1995, 2005 und 2020 Wochen-, Tages- und Stundenanteile an der Belastung generiert werden.

Diese zeitliche Differenzierung des DTV kann nur mit zusätzlichen Annahmen erreicht werden. Unter der Annahme, dass die Spitzenbelastung in der Spitzenstunde am Wochentag mit der höchsten Belastung an einem Ferientag liegt und mit der MSV übereinstimmt, ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\text{MSV} = \text{Ferienfaktor} \times \text{Tagesfaktor} \times \text{Stundenfaktor} \times \text{DTV}$$

Anhand dieser Gleichung kann der Stundenfaktor ermittelt werden, da alle anderen Größen bekannt sind. Aus dem Ferienfaktor wird, wenn er größer als eins ist, der Anteil der am stärksten belasteten Woche an der Jahresfahrleistung berechnet. Aus dem größten angegebenen Tagesfaktor wird der Anteil des Tages mit der Spitzenlast der Woche berechnet und aus dem Stundenfaktor der Anteil der Spitzenstunde an der Tagesfahrleistung. Die Werte, die aus den Daten der Verkehrszählung 1987 berechnet werden, werden ohne weitere Änderung für das Jahr 1989 übernommen. Damit stehen die notwendigen Daten der zeitlichen Differenzierung der Belastung für das Stützjahr 1989 zur Verfügung.

Da für das Jahr 1995 nur die MSV vorliegt, werden Wochen- und Tagesanteil des Jahres 1989 übernommen. Der Stundenanteil wird wie für das Jahr 1989 mit

der MSV des Jahres 1995 berechnet. Auf diese Weise erhält man die notwendigen Daten für das Stützjahr 1995. Mit der Prognose für das Jahr 2010 liegen lediglich Werte für den DTV vor, die, wie oben erläutert, für das Jahr 2005 inter- und für das Jahr 2020 extrapoliert werden. Auch für die Jahre 2005 und 2020 werden die Wochen- und Tagesanteile von 1989 übernommen. Die Stundenanteile werden aus der Entwicklung zwischen 1989 und 1995 extrapoliert. In der Regel handelt es sich hierbei um sinkende Werte. Das bedeutet, dass die Belastung in der Spitzenstunde weniger stark steigt als im Tagesdurchschnitt. Dieses Resultat scheint nach der bisher beobachteten Entwicklung des Straßenverkehrs plausibel.

Für den Güterverkehr wird eine in jedem Korridor konstante Wochenauslastung von 2 % der Jahresfahrleistung angenommen. Das bedeutet, dass in zwei Wochen im Jahr kein Verkehr stattfindet, während der Verkehr in den übrigen Wochen gleichbleibend stark ist. Der entsprechende Tageswert ist 19,7 % der Wochenfahrleistung, das entspricht einem gleichmäßigen Verkehr über 5 Tage der Woche. Aus der MSV für den Schwerverkehr ergibt sich für das Jahr 1987 mit diesen Werten ein Stundenanteil von 10,5 % der Tagesfahrleistung. Diese Anteile werden für alle Stützjahre übernommen. Da sich der Busverkehr in der Ferienzeit konzentriert, wird angenommen, dass die Wochenbelastung 4 % beträgt. Das entspricht einer Jahresfahrleistung, die bei konstanter Wochenbelastung in etwa 25 Wochen geleistet wird. Für den Tagesspitzenanteil wird 16,7 % der Wochenfahrleistung, für den Stundenwert 10 % der Tagesfahrleistung angenommen. Die Werte für Lkw und Busse ändern sich für alle Stützjahre nicht.

Auf diese Weise erhält man für Pkw, Lkw und Busse für die Jahre 1989, 1995, 2005 und 2020 für alle Korridore die zeitlichen Anteile der Spitzenbelastung an der Fahrleistung.

Für den Bahnverkehr wird im Infrastrukturmodell die Kapazität als Tageswert (in Fahrten pro Tag) berechnet, so dass auch die Spitzenbelastungen zum Vergleich mit der Kapazität nur als Tageswerte vorliegen müssen.

Die Hauptreisetage beim Personenfernverkehr der Bahn liegen im Sommer an den Wochenenden [DBAG96], daher sind die Werte für den höchsten Wochenanteil der Jahresfahrleistung und den höchsten Tagesanteil an der Wochenfahrleistung den Werten der mit Urlaubs- und Freizeitverkehr belasteten Autobahnen angeglichen. So wird zum Beispiel für den Korridor von Flensburg über Hamburg, Hannover, Kassel, Ulm in Richtung Alpen ein Spitzenwochenanteil von 2,01 % an der Jahresfahrleistung und ein Spitzentagesanteil von 17,92 % an der Wochenfahrleistung angenommen.

Für den Güterverkehr der Bahn wird, wie auch für den Straßengüterverkehr, eine in jedem Korridor konstante Wochenauslastung von 2 % der Jahresfahrleistung angenommen. Der entsprechende Tageswert beträgt 19,7 % der Wochenfahrleistung (s.o.).

Die Belastungspitzen der Fahrleistung des Bahnverkehrs sind weniger ausgeprägt als im Straßenverkehr. Daher sind die Daten für die zeitliche Spitzenbelastung weniger sensitiv im Vergleich mit den Werten für die Autobahnen.

4.2.3 Bedeutung der Spitzenbelastung für die Berechnung des Infrastrukturausbaus

Das Infrastrukturmodell schlägt dann einen Ausbau vor, wenn die Spitzenbelastung die Kapazität übersteigt. Mit anderen Worten bestimmt die Spitzenbelastung in der höchstbelasteten Stunde eines Stützjahres, die bei Autobahnen der maßgebenden stündlichen Verkehrsstärke (MSV) entspricht, den Ausbau der Kapazität.

In der realen Bundesverkehrswegeplanung ist die MSV nur eines von mehreren Kriterien. Sie ist ein Messwert, der auf eine häufige erhöhte Verkehrsstärke hinweist. Dennoch wird beobachtet, ob ein hoher Wert nicht nur in einem, sondern in mehreren Jahren erreicht wird. Ist das der Fall, so wird für verschiedene Ausbauvorschläge die Kosten-Nutzen-Relation überprüft. Als Nutzen gelten zum Beispiel Arbeitsplätze, die in der Bauphase und durch Erschließungsfunktionen entstehen, verbesserte Erreichbarkeiten und damit Zeiteinsparungen und Attraktivitätssteigerung für die Wirtschaft durch verbesserte Infrastruktur. Als Kosten gelten Herstellungskosten und Kosten für Ausgleichmaßnahmen im Rahmen der Umweltvorsorgevorschriften. Nach dem Verhältnis der monetarisierten Größen wird die Dringlichkeit der Projekte eingestuft [BMV92].

Die Spitzenbelastung ist im Modell im Vergleich zur Realität in ihrer Wirkung auf den Ausbau überbewertet. Da jedoch in die Datenbank des Infrastrukturmodells nur Projekte aufgenommen werden, die aus dem Bundesverkehrswegeplan (BVWP) stammen, ist die Kosten-Nutzen-Berechnung schon im Rahmen der Verkehrswegeplanung vorausgesetzt. Das Modell kann also nur Projekte vorschlagen, die ohnehin im BVWP enthalten sind. Dadurch ist auch die Auswahl der Projekte anhand der Spitzenbelastung realistisch.

4.3 Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung und ihre Wirkung

Die prognostizierte wachsende Verkehrsleistung wird in einer weiter wachsenden Fahrleistung resultieren. Seit 1976 ist die Fahrleistung auf den Autobahnen etwa um das Dreifache gestiegen. Die Länge der Autobahnen nahm dagegen lediglich um knapp das Zweifache zu, so dass in der Folge die Belastung, ausgedrückt im Durchschnittlichen Täglichen Verkehr, zunahm (siehe Abbildung 4.4).

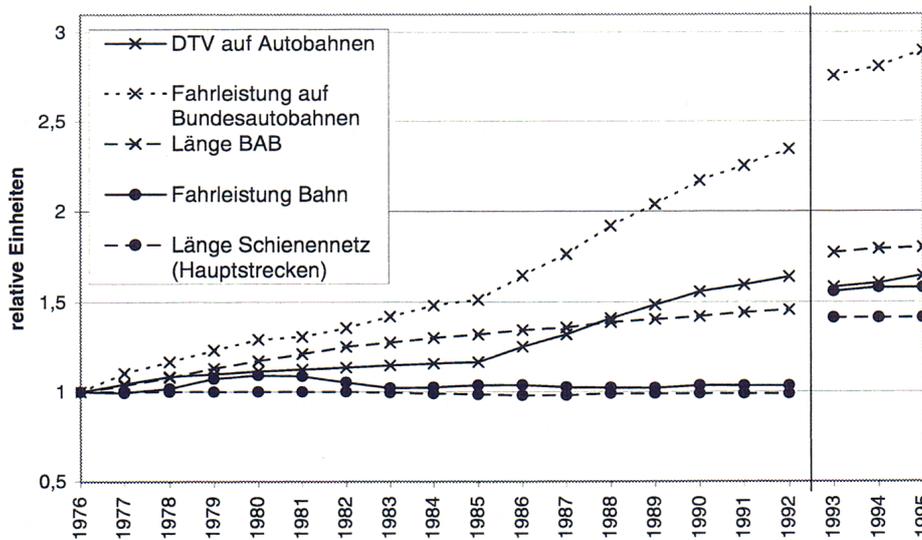


Abbildung 4.4: Zeitreihenvergleich von Fahrleistungen auf Autobahnen und Hauptschienennetz, der Netzlängen und der durchschnittlichen Belastungen auf Autobahnen in relativen Werten (1976 $\hat{=}$ 1; ab 1993 mit NBL). (Quellen: [BMV95], [BMV96a], [BMV96b])

Maßnahmen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur können neben der Kapazitätserweiterung mehrere Gründe haben. So kann es darum gehen, den Verkehr zu verflüssigen, Netzlücken zu ergänzen, Regionen zu erschließen oder Arbeitsplätze zu schaffen. In dieser Arbeit werden die Maßnahmen aus dem Blickwinkel der Kapazitätserhöhung zur Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses betrachtet.

Eine vierspurige Autobahn hat nach den Richtlinien für die Anlage von Straßen RAS-Q 96 ([FgSV96], S. 18) eine Kapazität von bis zu 70.000 Fahrzeugen pro Tag. Eine auf sechs Streifen ausgebaute Autobahn kann im Höchstfall mit 100.000 bis 120.000 Fahrzeugen pro Tag belastet werden. Teilweise liegt die reale Belastung allerdings höher, da der notwendige Sicherheitsabstand nicht eingehalten wird oder die Verkehrsqualität sinkt. Als Maß für die Verkehrsqualität wird die mögliche Durchschnittsgeschwindigkeit angesehen.

Der Bundesverkehrswegeplan sieht konkrete Neubau- und Ausbaumaßnahmen vor. Diese werden für die Autobahnen im Infrastrukturmodell folgendermaßen umgesetzt:

- **Neubau von Autobahnen:** Beim Neubau wird die Kapazität gemäß der in Abschnitt 4.5.2 erläuterten Funktion (Gleichung 4.10) für eine vierstreifige Autobahn berechnet.

- **Ausbau von Autobahnen:** Der Ausbau einer Autobahn wird mit der Kapazität eines zusätzlichen Fahrstreifens anhand von Gleichung 4.7 an jeder Fahrbahn berechnet.
- **Ausstattung mit Wechselverkehrszeichenanlagen (Telematik):** Wie in Abschnitt 4.5.2 (S. 59) beschrieben wird, hängt die Kapazität einer Autobahn in erster Linie von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Spuren einer Fahrbahn ab. Weiterhin hat auch die absolute Höhe der Geschwindigkeit Einfluss auf die Kapazität. Daher können sowohl Telematik in Form einer temporären Geschwindigkeitsbegrenzung mittels Wechselverkehrszeichen, als auch ein generelles Tempolimit kapazitätssteigernd wirken. Der Einbau einer Wechselverkehrszeichenanlage erhöht, wie ein Langzeitversuch auf der A 5 zeigt, die Kapazität um etwa 12 % ([Frank93], S. 7). Der Einbau von Wechselverkehrszeichenanlagen wird mit dieser Kapazitätssteigerung berücksichtigt. Weitergehende Möglichkeiten der Telematik (Verlagerungseffekte) können im Rahmen dieser Arbeit nicht quantifiziert und daher nicht berücksichtigt werden.

Ein Tempolimit wird in dieser Arbeit nicht diskutiert, da das Modell automatisch die Geschwindigkeit so ändert, dass sie der Belastung nachkommt². Das bedeutet, das Modell gibt eine Durchschnittsgeschwindigkeit an, die maximal für eine gegebene Belastung ist. Bei den Spitzenbelastungen, die hier vorkommen, liegt diese Geschwindigkeit bei höchstens 120 km/h.

Für den Schienenverkehr wird die Kapazität im zweigleisigen Gemischtverkehr mit 240 Fahrten/Tag angegeben ([BMV74], S. 30f; [Schulz96], S. 28). Dabei findet gewöhnlich nachts der Güter- und tagsüber der Personenverkehr statt. Im Folgenden wird immer davon ausgegangen, dass auf einer Strecke beide Verkehrsarten stattfinden. Nach verschiedenen Schätzungen kann eine Hochgeschwindigkeitsstrecke etwa 280 Fahrten/Tag aufnehmen ([Benz94]).

Für den Schienenverkehr werden folgende Maßnahmen vorgesehen:

- **Neubau von Schienenstrecken:** Die Neubaustrecken der Deutschen Bahn AG werden vornehmlich für den Hochgeschwindigkeitsverkehr gebaut. Durch die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit ist die Kapazität der Neubaustrecken mit 280 Fahrten pro Tag höher als im anderen Netz.
- **Zubau von Gleisen an bestehenden Schienenstrecken:** Diese Maßnahme wird, wenn sie zweigleisig erfolgt, mit der Kapazität des Gemischtverkehrs (240 Fahrten/Tag) in die Rechnung einbezogen. Ein eingleisiger Zubau wird mit 120 Fahrten/Tag eingerechnet.

²Ein Tempolimit wird allerdings nicht nur aus Gründen der Kapazität diskutiert, sondern auch aus Gründen der Emissionssenkung und vor allem, um die Schwere der Unfälle auf den Autobahnen zu senken.

- **Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit:** Diese Maßnahme kann die Kapazität um etwa 25 % erhöhen. Dieser Wert gilt nur für den höheren Geschwindigkeitsbereich (Personenzüge). Langfristig verfolgt die Deutsche Bahn AG das Konzept einer Trennung von (langsamem) Güter- und (schnellem) Personenverkehr. Das hat für Personenzüge den Vorteil, nicht auf Güterzüge warten zu müssen. Für den Güterverkehr ist von Vorteil, dass er seltener auf Überholgleise ausweichen muss. Durch diese Maßnahmen würde die Kapazität des gesamten Netzes erheblich steigen.
- **Verkürzung der Blocklängen:** Die Strecken der Deutschen Bahn AG sind in Blöcke eingeteilt. Ein Zug darf in einen Block nur dann einfahren, wenn der Vorhergehende den Block vollständig verlassen hat ([Kiefer95]). Eine Verkürzung der Blocklängen würde bedeuten, dass der Abstand zwischen den Zügen geringer wird und somit nach Schätzungen etwa 30 % mehr Züge verkehren können [IEV98].
- **Fahren im Bremswegabstand:** Die Blockeinteilung wird ganz aufgegeben. Der Abstand der Züge wird durch elektronische Überwachung der Strecke und der Zugintegrität gewährleistet. Die Abstände hängen dann nur noch vom tatsächlichen Bremsweg ab. Schätzungen gehen von einer zusätzlichen Kapazität von 50 % aus ([Gaidzik95], [IEV98]).
- **Einbau von zusätzlichen Überholgleisen:** Auch der Einbau von zusätzlichen Überholgleisen an einer Strecke hat eine kapazitätssteigernde Wirkung, da letztendlich die Durchschnittsgeschwindigkeit erhöht werden kann. Damit ist eine Steigerung von bis zu 50 zusätzlichen Fahrten pro Tag erreichbar [IEV98].

Die unterschiedlichen Maßnahmen zur Erweiterung des Autobahn- und Schienennetzes sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

4.4 Kosten, kumulierter Energieaufwand und Emissionen der Maßnahmen

Die Infrastrukturkapazität kann durch bauliche und betriebliche Maßnahmen erweitert werden. Als bauliche Maßnahmen werden im Folgenden alle Maßnahmen bezeichnet, bei denen größere Stoffströme bewegt werden (s. Tabelle 4.3). Betriebliche Maßnahmen sind für die Autobahnen der Einbau von Telematikanlagen und für die Bahn die Verkürzung der Blocklängen oder die Einrichtung der Möglichkeit zum Fahren im Bremswegabstand.

Die Kosten der baulichen Maßnahmen werden in Tabelle 4.3 gezeigt. Sie sind die Summe der Kosten aller gleichartigen Vorhaben in jedem Korridor. Sie werden

Tabelle 4.2: Übersicht über kapazitätserhöhende Infrastrukturmaßnahmen.

Verkehrsträger	Maßnahme	Wirkung
Straße	Neubau	nach Formel
	Ausbau	nach Formel
	Telematik	+ 12 %
Schiene	Neubau	280 Fahrten/Tag
	Ausbau	240 Fahrten/Tag
	Überholgleise	+ 50 Fahrten/Tag
	Erhöhung der Geschwindigkeit	+ 60 Fahrten/Tag
	Verkürzung von Blocklängen	+ 30 %
	Fahren im Bremswegabstand	+ 50 %

dem Bundesverkehrswegeplan entnommen. Die Kosten des Einbaus der Telematikanlagen wird gemäß den Angaben des Bundesverkehrsministeriums ([BMV95], S. 79) mit 1 Mio DM/km im Infrastrukturmodell berechnet. Die Kosten der betrieblichen Maßnahmen bei der Bahn liegen für die Verkürzung der Blocklängen bei 0,5 Mio DM/km, für die Ermöglichung des Fahrens im Bremswegabstand bei etwa 1 Mio DM/km (nach [Vallée95], S. 6.5-1).

Für die baulichen Maßnahmen werden KEA und Emissionen als Eingangsdaten für das Infrastrukturmodell bereitgestellt. Sie werden durch die Bilanzierung der Beispielprojekte und Zuordnung über die Korridoreinteilung berechnet. Tabelle 4.4 zeigt eine Übersicht über den KEA der baulichen Maßnahmen, Tabellen der Emissionen sind in Anhang E enthalten.

4.5 Berechnung des Infrastrukturausbaus

4.5.1 Modell zur Berechnung des Infrastrukturausbaus

Das Infrastrukturmodell berechnet anhand der vorgegebenen Fahrleistung den notwendigen Infrastrukturausbau. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

1. Die Fahrleistung (in Pkw, Lkw und Bus oder Personen- und Güterbahnfahrleistung getrennt) wird nach dem genannten Schlüssel (Tabelle 4.1) auf die Korridore aufgeteilt.

Tabelle 4.3: Kosten (K) in [Mio DM/km] und Länge (L) in [km] der baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell.

Korridor	Straße				Bahn							
	Neubau		Ausbau		Neubau		Zubau		Überholgleise		Geschwindigkeitserhöhung	
	L	K	L	K	L	K	L	K	L	K	L	K
K11/13	0	0	52	17,3	0	0	299	32,4	0	0	0	0
K1/20	482	13,1	80	21,2	75	25,4	50	34,5	161	1,2	496	15,3
K1/3/5	170	18,2	741	20,4	135	53,9	313	30,7	96	1,2	496	5,3
K2	61	24,9	495	15,1	150	27,8	17	34,5	87	4,1	534	7,4
K4	378	24,9	531	18,1	252	28,6	20	26,4	305	1,2	752	8,7
K6	95	14,5	304	23,6	128	18,1	10	34,0	84	2,7	461	4,4
K7	455	22,2	289	13,3	175	25,4	47	44,1	0	0	0	0
K8	270	14,8	303	13,7	228	28,5	112	17,8	0	0	620	7,5
K9	552	19,6	443	16,0	108	56,8	220	26,6	76	3,3	938	7,7

Tabelle 4.4: KEA der baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell in [GJ/km].

Korridor	Straße		Bahn			
	Neubau	Ausbau	Neubau	Zubau	Überholgleise	Geschwindigkeitserhöhung
K11/13	0	45.087	0	12.676	0	0
K1/20	77.305	12.910	34.450	13.189	475	5.849
K1/3/5	53.211	34.775	88.378	14.230	2.453	4.357
K2	72.458	44.827	55.420	29.398	3.474	2.786
K4	75.442	41.878	86.721	18.191	659	5.336
K6	80.631	44.221	46.999	8.051	643	1.692
K7	56.677	42.583	100.327	11.660	0	0
K8	83.311	45.326	46.255	13.863	0	5.367
K9	59.948	20.512	100.327	15.956	1.881	4.026

2. Die Spitzenbelastung wird für jeden Korridor anhand der Belastungsanteile (Abschnitt 4.2.2) berechnet.
3. Die Kapazität der Korridore wird berechnet (Abschnitt 4.5.2).
4. Spitzenbelastung und Kapazität werden für jeden Korridor miteinander verglichen. Ist die Kapazität kleiner, folgt Schritt 5., ist sie größer, folgt der Vergleich für den nächsten Korridor.
5. Das Modell berechnet die Kapazität aller Maßnahmen in den Korridoren, in denen ein Ausbau notwendig ist. Die Kosten jeder Maßnahme werden zur zusätzlichen Kapazität in Bezug gesetzt, anschließend werden die Maßnahmen nach diesen spezifischen Kosten aufsteigend sortiert.
6. Für jede Maßnahme wird durch das Modell nach steigenden spezifischen Kosten geprüft, ob die neue Kapazität ausreicht, um die Spitzenbelastung abzudecken. Ist dies der Fall, so wird die entsprechende Maßnahme vom Modell ausgewählt. Ist es nicht möglich, durch eine einzelne Maßnahme genug neue Kapazität zu schaffen, werden mehrere Maßnahmen kombiniert, bis die neue Kapazität die Spitzenbelastung abdeckt. Sind alle Maßnahmen im Korridor erschöpft, wird gemeldet, dass die Spitzenbelastung auch durch den Ausbau im Korridor nicht abgedeckt werden kann.
7. Die Kosten, der KEA und die Emissionen der ausgewählten Maßnahmen werden addiert und vom Modell ausgegeben. Die Ausgabe enthält ebenfalls die Kapazität des 1989 bestehenden Netzes³ und die neue Kapazität.

Das Optimierungsmodell in der hier verwendeten Version berechnet die Energiewirtschaft für die Jahre 1989 und 2005 getrennt nach alten und neuen Bundesländern, im Jahr 2020 wird die Rechnung für das gesamte Bundesgebiet durchgeführt. Daher erfolgt die Trennung nach alten und neuen Ländern für 2005 auch innerhalb des Infrastrukturmodells.

4.5.2 Berechnung der Kapazität der Verkehrsnetze

Der Einsatz von kapazitätserweiternden Maßnahmen erfolgt im Infrastrukturmodell dann, wenn die Spitzenbelastung die Kapazität übersteigt. Daher muss die Kapazität (in Fahrzeugen pro Zeit) der vorhandenen Infrastruktur und des Ausbaus bestimmt werden, damit sie mit der Spitzenbelastung verglichen werden kann. Dieser Abschnitt erläutert die Berechnung der Kapazität von Autobahnen und Schienenwegen.

³Im Modell wird – bedingt durch die Stützjahre – davon ausgegangen, dass die vorhandenen Netze den Umfang von 1989 haben.

Kapazität von Autobahnen

Die folgenden Gleichungen wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, um eine einfache Berechnung der Maximalkapazität von Autobahnen zu ermöglichen. Es wird von einer ausgelasteten Fahrbahn ausgegangen, also davon, dass zwischen den Fahrzeugen nur der Sicherheitsabstand liegt. Der Ansatz beruht darauf, dass bei einer gegebenen gleichmäßigen Geschwindigkeit an einem festen Beobachter die Streckenlänge $s = vt$ vorbeizieht. Das Modell berechnet die Anzahl der Fahrzeuge und Sicherheitsabstände, aus denen sich die Strecke s zusammensetzt. Die Fahrzeuglänge für Pkw wurde im Durchschnitt als 6 m (inklusive einem Mindestabstand von 1 m), für Lkw als 26 m angenommen. Der Sicherheitsabstand in Metern wird für Pkw mit $v^2/200$ (v : Geschwindigkeit in km/h; s. Abbildung 4.6), für Lkw mit $v^2/300$ angesetzt. Dies ist bei Geschwindigkeiten um etwa 100 km/h, die bei ausgelasteten Autobahnen vorherrschen, ein Abstand, der der halben Tachometer-Anzeige in Metern entspricht. Der tatsächliche Bremsweg ist allerdings durch $v^2/100$ gegeben.

Wie die tägliche Praxis zeigt, stimmt der reale durchschnittliche Sicherheitsabstand nicht mit dem notwendigen überein. Daher werden für die weitere Rechnung Annahmen für die Einhaltequote des Sicherheitsabstandes getroffen (Abbildung 4.5). Aus den gezeigten Annahmen wird ein durchschnittlicher Abstand als Anteil am Sicherheitsabstand $v^2/200$ errechnet (74,5 %). Dieser Anteil variiert nur um + 9 %, wenn zum Beispiel der Anteil der Fahrzeuge, die 100 % des Soll-Abstandes einhalten, auf 50 % steigt. Es handelt sich also nicht um eine besonders sensitive Größe.

Mit der Anzahl der Fahrzeuge auf dem rechten Streifen Q_r , der durchschnittlichen Länge S , die ein Fahrzeug beansprucht, der Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem rechten Streifen v_r und der Dauer der Fahrzeugzählung t gilt:

$$Q_r S = v_r [km/h] \cdot 1000 [m/km] \cdot t [h] \quad (4.1)$$

Da hier die Kapazität einer Stunde berechnet wird, ist $t = 1 h$. Die durchschnittliche Fahrzeuglänge S setzt sich aus Pkw- und Lkw-Längen zusammen. Mit dem Schwerverkehrsanteil λ , dem Pkw-Abstand S_p und dem Lkw-Abstand S_l , gilt für die durchschnittliche Länge, die ein Fahrzeug beansprucht:

$$S = (1 - \lambda)(S_p + 6 [m]) + \lambda(S_l + 26 [m]) \quad (4.2)$$

Damit ergibt sich aus Gleichung 4.1:

$$Q_r = \frac{v_r \cdot 1000}{(1 - \lambda)(S_p + 6) + \lambda(S_l + 26)} \quad (4.3)$$

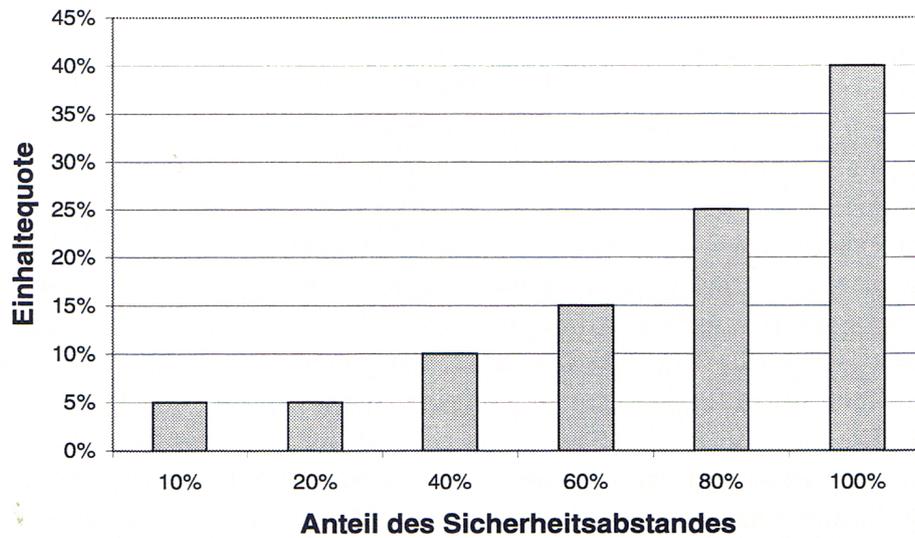


Abbildung 4.5: Annahmen über Einhaltequoten der Sicherheitsabstände zur Berechnung der Autobahnkapazität: Anteile der Gesamtzahl der Fahrzeuge, die einen bestimmten Sicherheitsabstand einhalten (Zum Beispiel: 100 % des Soll-Abstandes werden von 40 % der Fahrzeuge eingehalten).

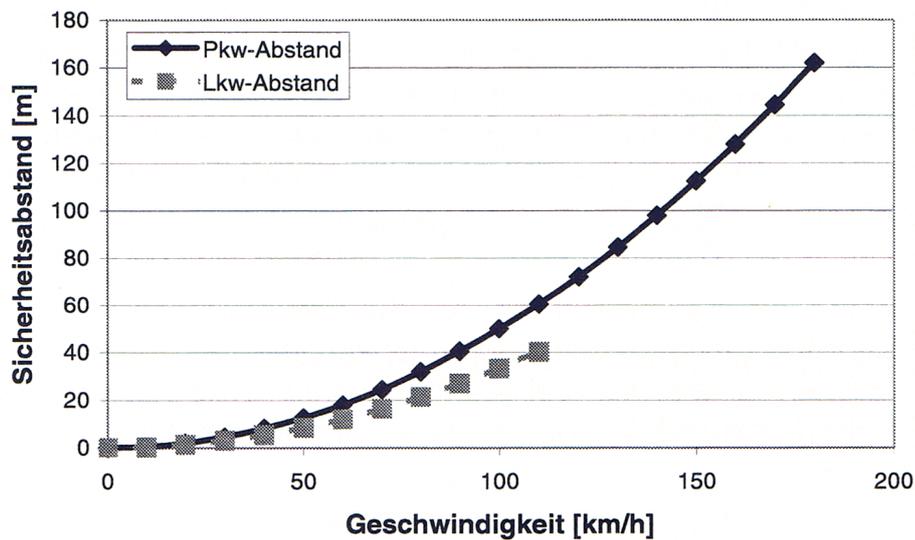


Abbildung 4.6: Annahmen über Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit nach $v^2/200$ (Soll-Abstände).

Bei der Einbeziehung des linken Fahrstreifens muss beachtet werden, dass Fahrzeuge die Spur von rechts nach links wechseln (überholen). Diese Fahrzeuge haben beim Wechsel eine geringere Geschwindigkeit, so dass die Differenzgeschwindigkeit durch Beschleunigen aufgeholt werden muss. In der Zwischenzeit entsteht eine Lücke, die zusätzlich zu den Sicherheitsabständen und den Fahrzeuglängen in die Berechnung einbezogen werden muss. Entsprechend sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem linken Streifen. Es wird angenommen, dass alle Nicht-Lkw die Spur wechseln. Wenn v_l die ursprüngliche Geschwindigkeit auf der linken Spur und v_r auf der rechten Spur ist und Q_l bzw. Q_r die Anzahl der Fahrzeuge links bzw. rechts ist, erhält man die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der linken Spur, indem man die Geschwindigkeiten mit der Anzahl der Fahrzeuge gewichtet:

$$\bar{v} = \frac{v_l Q_l + v_r (1 - \lambda) Q_r}{Q_l + (1 - \lambda) Q_r} \quad (4.4)$$

Die Lücke, die durch die notwendige Beschleunigung entsteht, lässt sich durch folgendes Gesetz für die Leistung P berechnen:

$$P = \frac{1}{2} \frac{m \Delta v^3}{\Delta s} \quad (4.5)$$

$$\Leftrightarrow \Delta s = \frac{1}{2} \frac{m \Delta v^3}{P} \quad (4.6)$$

Dabei sind Δv die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen rechten und linken Streifen und Δs die entstehende Lücke. Die Leistung P und die Masse m sind die durchschnittliche Pkw-Leistung bzw. -Masse. Ohne Berücksichtigung des Spurwechsels ist die Anzahl der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen durch

$$Q_L = \frac{v_l \cdot 100}{0,745(S_p + 6)} \quad (4.7)$$

gegeben. Durch die Spurwechsler, also $(1 - \lambda)Q_r$ Fahrzeuge, müssen die Lücken Δs und die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} einbezogen werden und die Abstände $S_p + 6$ und Δs mit den entsprechenden Fahrzeuganzahlen gewichtet werden:

$$Q_l = \frac{(Q_l + (1 - \lambda)Q_r) \bar{v} \cdot 1000}{Q_l(0,745(S_p + 6) + (1 - \lambda)Q_r \Delta s)} \quad (4.8)$$

Die Gesamtzahl der Fahrzeuge ist die Summe aus den Fahrzeugen links und rechts:

$$Q = Q_l + Q_r \quad (4.9)$$

$$= \frac{(Q_l + (1 - \lambda)Q_r)\bar{v} \cdot 1000}{Q_l(0,745\bar{v}^2/200 + 6) + (1 - \lambda)Q_r 0,5m\Delta v^3/P} + Q_r \quad (4.10)$$

Abbildung 4.7 zeigt die Funktion $Q(v_l, v_r)$. Deutlich ist zu sehen, dass die Kapazität links der Winkelhalbierenden $v_l = v_r$ (gleiche Geschwindigkeit auf beiden Fahrstreifen) geringer wird. Der Bereich rechts, $v_l < v_r$, ist nicht definiert. Das Maximum liegt bei etwa $v_r = v_l = 60$ km/h. Bei dieser recht geringen Geschwindigkeit hat eine Autobahn also die größte Kapazität. Die „Verkehrsqualität“ orientiert sich allerdings an der möglichen Durchschnittsgeschwindigkeit. Bei $v = 60$ km/h kann diese als stark eingeschränkt gelten. Wichtig für die Kapazität ist demnach in erster Linie eine auf beiden Streifen gleiche Geschwindigkeit und in zweiter Linie die absolute Höhe der Geschwindigkeit.

Das Modell berechnet die Kapazität ausgehend von einer Geschwindigkeit von 120 km/h auf der linken und 100 km/h auf der rechten Spur⁴ und vergleicht sie mit der Belastung. Ist die Kapazität kleiner, werden Maßnahmen ergriffen, die Kapazität neu berechnet und verglichen. Reichen alle Maßnahmen nicht aus, so wird die Geschwindigkeit gesenkt, bis die Kapazität größer als die Belastung ist. Dies entspricht dem Ziel, die größtmögliche Verkehrsqualität zur Verfügung zu stellen, also die Durchschnittsgeschwindigkeit so wenig wie möglich einzuschränken. Für das Infrastrukturmodell ist die Untersuchung der Sensitivität nur eingeschränkt aussagekräftig. Das Modell reagiert auf eine Erhöhung der Belastung bei mit einer Verringerung der Geschwindigkeit, wenn die möglichen Maßnahmen erschöpft sind. Diese Daten sind für die einzelnen Korridore spezifisch, eine allgemeine Aussage ist daher nur schwer möglich. Auch bei Rechnungen mit extremen Belastungen zeigte sich, dass in keinem Korridor eine Geschwindigkeit unter 80 km/h auf beiden Fahrstreifen gewählt werden musste.

Kapazität von Schienenwegen

Für die Schienenwege ist durch die Blockabhängigkeit der Kapazität eine Berechnung wie im Fall des Autobahnnetzes nicht möglich. Da bei der Bahn keine Spitzenbelastung in Form einer „Rushhour“ auftritt, wird die Kapazität der Schienenwege in Fahrten pro Tag angegeben. Durch die Literatur ist möglich, festzustellen, dass eine hochbelastete zweigleisige Strecke bis zu etwa 240 Fahrten/Tag im Gemischtverkehr⁵ aufnehmen kann ([BMV74], S. 30f; [Schulz96], S. 28). Nach ver-

⁴Die Geschwindigkeit auf dem rechten Fahrstreifen kann höher als die Lkw-Geschwindigkeit sein, da auch andere Fahrzeuge auf diesem Fahrstreifen fahren, Lkw die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht einhalten und Fahrzeuge für das Überholen vorbeschleunigen

⁵Güter- und Personenverkehr, die in unterschiedlichen Tageszeiten stattfinden

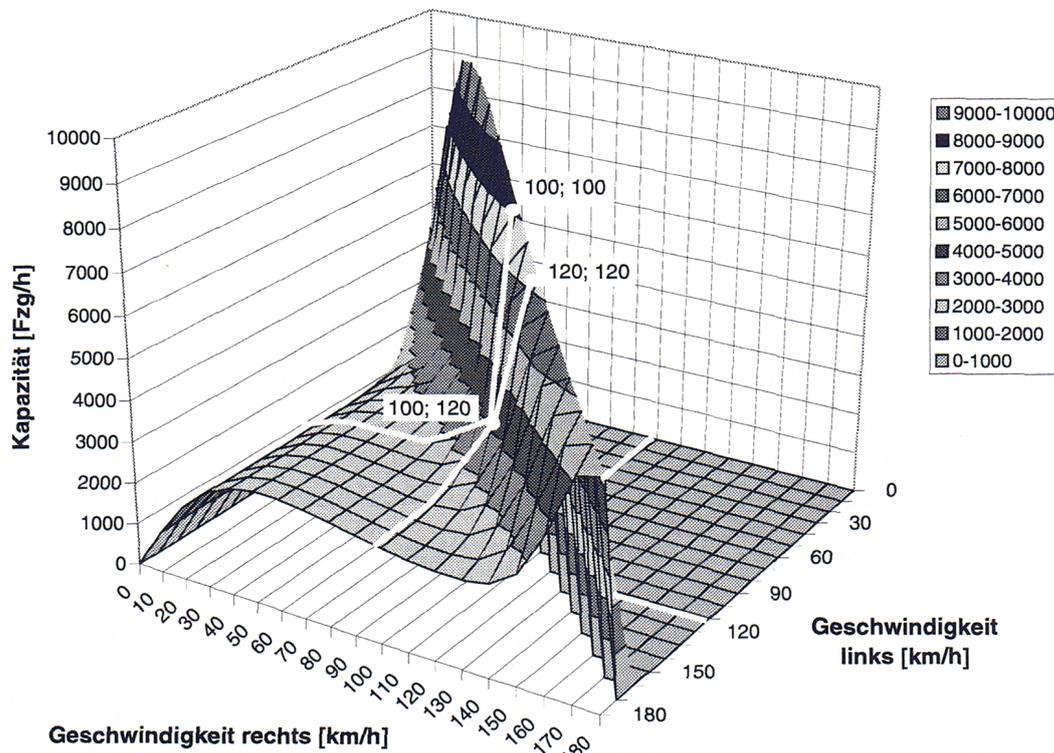


Abbildung 4.7: Darstellung der Ergebnisse der Kapazitätsberechnung: Kapazität einer zweistreifigen Fahrbahn in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten nach Gleichung 4.10. Der Bereich $v_l < v_r$ ist nicht definiert. Die maximale Kapazität liegt bei $v_l = v_r = 60$ km/h. Die hervorgehobenen Kapazitäten bei $v_r=100$ km/h und $v_l=120$ km/h betragen 4.100 Fzg/h, bei $v_r = v_l = 120$ km/h 7.200 Fzg/h und bei $v_r = v_l = 100$ km/h 8.000 Fzg/h.

schiedenen Schätzungen kann eine Hochgeschwindigkeitsstrecke etwa 280 Fahrten/Tag aufnehmen [Benz94].

4.5.3 Auswahl der Maßnahmen zum Ausbau

Das Infrastrukturmodell ist so konzipiert, dass es Erweiterungen vorschlägt, wenn in einem Korridor die Kapazität kleiner als die Belastung ist. Dabei wird auf folgende Weise vorgegangen:

Die Kosten der möglichen Maßnahmen werden je neugeschaffener Kapazität berechnet. Die Maßnahmen werden dann nach steigenden spezifischen Kosten sortiert. Die jeweils mögliche Kapazität jeder Maßnahme wird mit der Spitzenbelastung verglichen. Sobald eine Maßnahme ausreicht, wird sie gewählt. Reicht kein Projekt aus, die Spitzenbelastung abzudecken, werden – wieder der Reihenfolge nach – Maßnahmenkombinationen berechnet. Das heißt, bevorzugt wird eine einzelne Lösung. Erst wenn keine einzelne Maßnahme ausreicht, sind auch Kombinationen möglich. Damit soll erreicht werden, dass ein einzelnes Projekt eher in Betracht kommt, auch wenn es *spezifisch* teurer als die Kombination mehrerer Projekte ist. Dadurch kann die Entstehung von größeren Überkapazitäten durch eine Vielfalt an Projekten vermieden werden. Diese sind bei der Kombination mehrerer Maßnahmen wahrscheinlicher als bei einer einzelnen Maßnahme.

Als Kombinationen sind alle im Modell vorgesehenen Maßnahmen zugelassen, beim Autobahnbau sind das Telematik auf der gesamten Korridorlänge, Neubau und Ausbau auf den jeweiligen Projektlängen. Dies ist möglich, da die verschiedenen Neubau- und Ausprojekte auf unterschiedlichen Strecken geplant sind, so dass keine Überschneidung auftreten kann. Die Kombinationsmöglichkeiten gelten ebenfalls für die Schienenwege, wobei hier die Vielfalt größer ist. Neben Neu- und Ausbauprojekten können Projekte mit dem Einbau von Überholgleisen und Geschwindigkeitserhöhungen vorgesehen werden. Die Verkürzung von Blocklängen kann nicht mit der Einrichtung des Fahrens im Bremswegabstand kombiniert werden, da beide Möglichkeiten jeweils für das gesamte vorhandene Netz des jeweiligen Korridores eingerichtet werden und sich jeweils auf die Betriebsführung beziehen.

Wenn keine Kombination ausreicht, wird bei der Berechnung der Kapazität des Straßennetzes die Geschwindigkeit gesenkt. Dies stellt im Modell allerdings erst die letzte Möglichkeit dar, die Belastung durch die Kapazität abzudecken. Hier liegt also die Priorität nicht nur auf der Erhöhung der Kapazität, sondern auch auf der Erhaltung der Verkehrsqualität. Tabelle 4.2 auf Seite 56 gibt eine Übersicht über mögliche Maßnahmen.

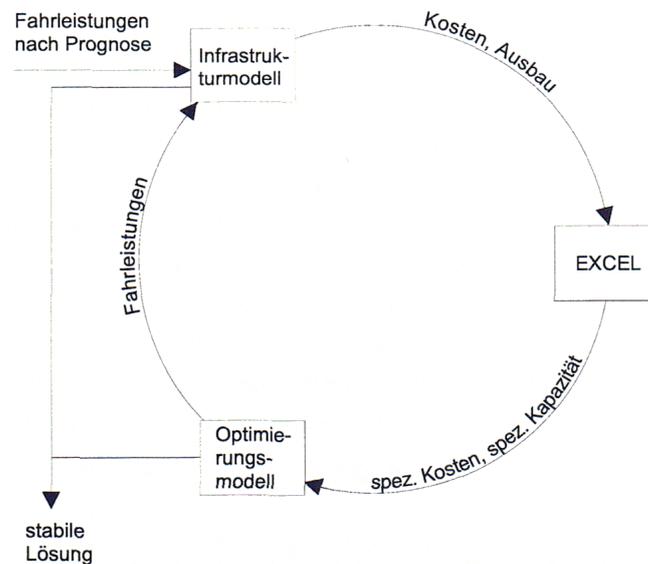


Abbildung 4.8: Schema des iterativen Vorgehens der Infrastrukturberechnung.

4.5.4 Iteratives Vorgehen

Das Infrastrukturmodell und das Optimierungsmodell sind nicht direkt miteinander gekoppelt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen hängen jedoch voneinander ab: Das Infrastrukturmodell benötigt die Fahrleistungen als Eingabegröße, die Rechnungen des Optimierungsmodell mit veränderten Technikkosten und Randbedingungen (wie durch den Infrastrukturausbau) resultieren in einem veränderten Ergebnis. Dieses besteht unter anderem aus neuen Fahrleistungen einzelner Verkehrsträger. Daher muss iterativ vorgegangen werden (s. Abbildung 4.8).

Zunächst werden mit den Prognosefahrleistungen zum Bundesverkehrswegeplan mit dem Infrastrukturmodell Ausbau und Kosten berechnet. In einer Tabelle werden diese Kosten auf die entsprechende Fahrleistung bezogen und dann zusammen mit den Kapazitätsbegrenzungen des Ausbaus in das Optimierungsmodell eingegeben. Dieses berechnet mit den neuen Kosten und den neuen Grenzen neue Fahrleistungen, die wiederum ins Infrastrukturmodell eingegeben werden. Nach mehreren (zwischen zwei und sechs) Iterationen erhält man eine Lösung des Optimierungsmodells, die sich nicht mehr ändert. Diese ist die Lösung der Iterationsläufe. Auf Grund der Strukturen des Optimierungsmodells und des Infrastrukturmodells endet die Iteration in jedem Fall, da die Lösung der Optimierung dadurch bestimmt ist, dass eine Variable solange gewählt wird, bis sie von einer Schranke eingegrenzt wird und damit fixiert ist. Eine andere Begrenzung der Lösung und damit das Ende der Iteration kann auf Grund der Ausbaugrenze der Infrastruktur eintreten. Das heißt, dass das Infrastrukturmodell in einem oder

mehreren Korridoren den Ausbau komplett ausschöpft.

Die Einbindung des Infrastrukturausbaus in das Optimierungsmodell wäre ohne iteratives Vorgehen einfacher. Das kann erreicht werden, indem für den Ausbau mehrere Techniken mit unterschiedlichen Kapazitäten und Kosten im Optimierungsmodell vorgesehen werden. Das Optimierungsmodell wählt dann zunächst den kostengünstigsten Ausbau, bis dessen Kapazitätsbeschränkung erreicht ist, um dann auf den etwas teureren Ausbau zurückzugreifen. Dadurch würde zwar nicht berücksichtigt, dass die Kapazität bei Autobahnen geschwindigkeitsabhängig berechnet wird, jedoch wäre diese Art der Einbindung für eine Anwendung im Optimierungsmodell ausreichend exakt und leichter bedienbar. Diese Erweiterung des Optimierungsmodells war jedoch nicht Ziel dieser Arbeit.

Kapitel 5

Eingangsdaten für den Verkehrssektor des IKARUS-Optimierungsmodells

Ungeachtet der Möglichkeit, dass neue Verkehrswege neben Verlagerung auch Neuverkehr induzieren können [Meier89], ist ein Neu- und Ausbau der Infrastruktur notwendig, um den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten. Es stellt sich jedoch die Frage, *welcher* Aufwand, vor allem in finanzieller Hinsicht, für Neu- und Ausbau notwendig ist. Im IKARUS-Optimierungsmodell war zwar die Berücksichtigung der Verkehrsinfrastruktur in der Modellstruktur vorgesehen, jedoch wurde diese Technik des Modells nicht genutzt, da keine Daten vorlagen. Somit waren auch zunächst keine Daten für Begrenzung und Ausbau der Verkehrsinfrastruktur vorhanden. Im Modell war es zum Beispiel möglich, die Nachfrage im Personenverkehr ausschließlich durch Pkw zu decken. In einem solchen Fall ist zu erwarten, dass die Straßeninfrastruktur kaum ausreichen wird. Daher ist es notwendig, in das Modell Daten zur Limitierung der Kapazität einzubringen. Die Zurechnung aller Kosten zu den einzelnen Verkehrsträgern, die bei ihrem Betrieb entstehen, ist für die gesamtwirtschaftliche Optimierung wichtig. Daher sollten auch die Kosten der Erweiterung der Infrastruktur erfasst werden.

Im vorhergehenden Kapitel wurde erläutert, wie das Infrastrukturmodell Daten für das Optimierungsmodell berechnet. Diese Daten müssen jedoch aufbereitet werden, um in das Optimierungsmodell eingegeben werden zu können (Abschnitt 5.1). Der zweite Abschnitt befasst sich mit den Daten des Nahverkehrsnetzes und ihrer Einbindung in das Optimierungsmodell. Dieses benötigt zusätzlich eine Vielzahl weiterer Eingangsdaten; von diesen werden diejenigen, die für die Interpretation wesentlich sind, in den beiden letzten Abschnitten dieses Kapitels erläutert. In Abbildung 5.1 werden die Datenflüsse, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden, gezeigt.

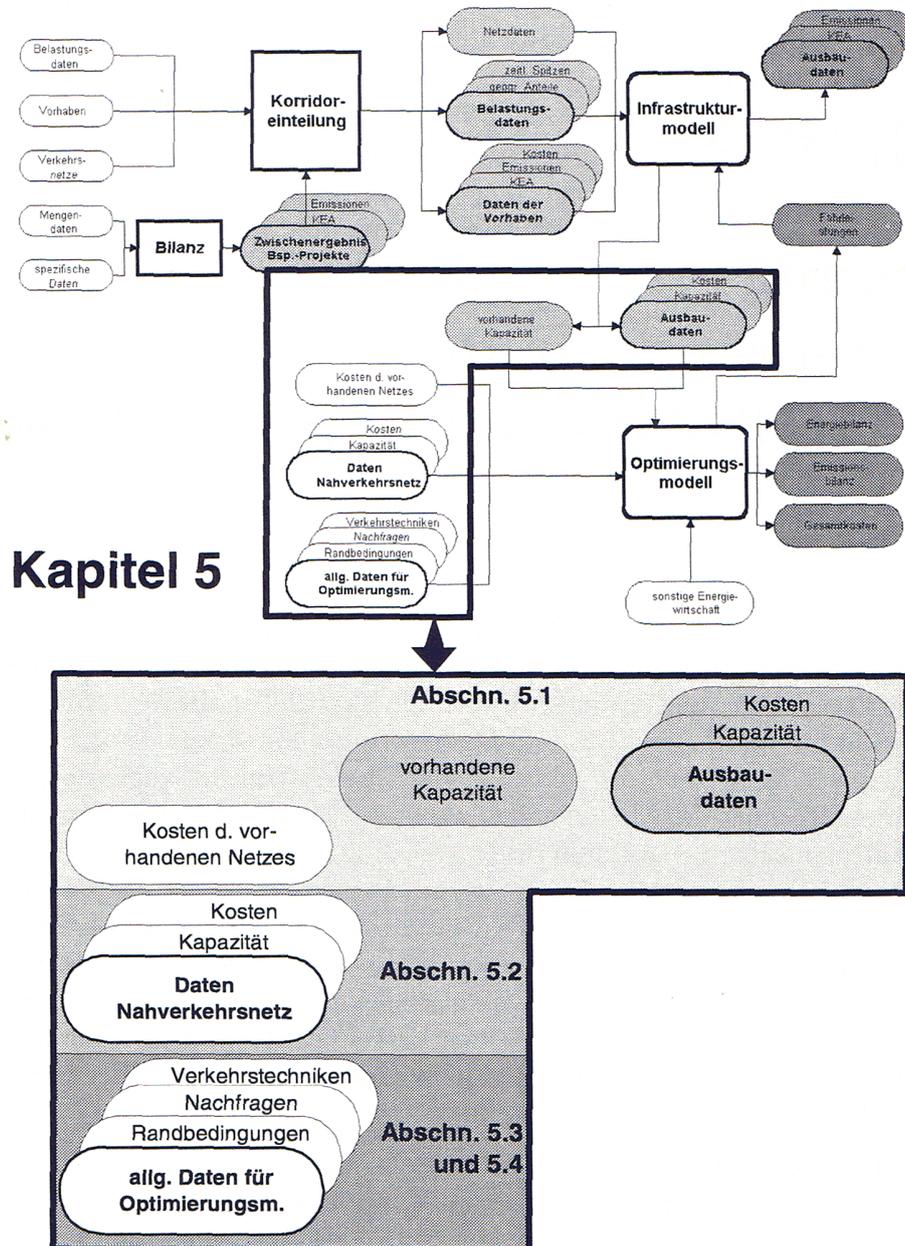


Abbildung 5.1: Schema der in Kapitel 5 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.

5.1 Daten der Fernverkehrsnetze

Die Eingangsdaten für das Optimierungsmodell sind auf die Fahrleistung bezogen. Folglich müssen die Kosten des Infrastrukturausbaus oder der Erhaltungsaufwendungen und auch die Wertminderungen und Kapitalkosten auf die realisierte Fahrleistung umgerechnet werden. Die Grenzen für Ausbau und vorhandene Infrastruktur müssen in maximal möglicher Fahrleistung vorliegen.

5.1.1 Begrenzung der vorhandenen Kapazität im Optimierungsmodell

Das Optimierungsmodell sieht die Begrenzung der vorhandenen Infrastrukturkapazität summarisch vor. Das heißt, alle Verkehrsträger, die dieselbe Infrastruktur nutzen, werden gemeinsam mit einer maximal möglichen Fahrleistung begrenzt. Im Fernverkehr auf der Autobahn werden also Pkw, Lkw und Bus beschränkt, im Fernverkehr des Schienennetzes gilt dies für den Personenfern- und den Güterverkehr. Die Kapazität muss in der Dimension Fahrzeugkilometer pro Jahr angegeben werden. Die vorhandenen Kapazitäten beziehen sich auf das Netz aus dem Jahre 1989 (als Basisjahr).

Eine Abbildung der Infrastrukturkapazität analog zu den Kraftwerkskapazitäten im Stromsektor (s. [Markewitz98], S. 101) des Optimierungsmodells könnte unabhängig von der Fahrleistung vorgenommen werden und wäre damit realitätsgetreuer. Das würde bedeuten, dass die Herstellungskosten und die fixen Kosten der Infrastrukturkapazität und die variablen Kosten der Fahrleistung zugeschrieben würden. Eine Änderung der Struktur des Optimierungsmodells war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Kapazität für den Straßenfernverkehr

Die vorhandene Kapazität im Straßenfernverkehr wird im Infrastrukturmodell anhand der erläuterten geschwindigkeitsabhängigen Gleichung und der Länge des vorhandenen Netzes berechnet (Kapitel 4.5.2). Sie beträgt in den alten Bundesländern 258.020 Mio Fzgkm/a.

Kapazität für den Schienenfernverkehr

Für die Kapazität im Schienenfernverkehr wird die Länge des Hauptnetzes der Deutschen Bahn AG (10.975 km in den alten Ländern, [BMV96b]) mit 240 Fahrten/Tag und 365 Tagen/Jahr multipliziert. Damit erhält man eine maximale Kapazität von 960 Mio Fzgkm/a.

Allerdings existiert sowohl im Bahn- als auch im -fernverkehr eine weitere Begrenzung durch den zur Verfügung stehenden Fahrzeugbestand, der in dieser Arbeit nicht als Einschränkung berücksichtigt wird, da der Untersuchungsgegenstand die Kapazität des Netzes ist (s. Kapitel 6.2.2).

5.1.2 Kosten der vorhandenen Infrastruktur

Die Kosten der bestehenden Infrastruktur werden als Eingangsdaten des Optimierungsmodells ebenfalls wie die Kapazitäten auf die Fahrleistung bezogen. Die Kosten werden als fixe, variable und Herstellungskosten getrennt angegeben ([Markewitz98], S. 98). Fixe Kosten sind unabhängig von der Fahrleistung auf einer Strecke. Die zur Verfügung stehenden Daten erlauben es lediglich, die Kosten für Winterdienst und Grünpflege von den sonstigen Betriebskosten abzugrenzen. Da sie unabhängig von der Fahrleistung entstehen, werden sie als fixe Kosten gerechnet. Variable Kosten umfassen alle anderen Betriebskosten. Darunter zählen vor allem die Sanierung der Verkehrswege und die Reparatur der Ausstattung. Die Herstellungskosten fallen beim Bau der Verkehrswege an.

Kosten des vorhandenen Autobahnnetzes

Für Autobahnen liegen die fixen Kosten nach Angaben des Bundesverkehrsministeriums [BMV95] bei etwa 31.300 DM/km, die variablen Kosten bei ca. 159.000 DM/km. Diese Angaben gelten für das Jahr 1995. Da für sie – außer der allgemeinen Preissteigerung – keine Änderungen erwartet werden, werden sie für die anderen Stützjahre ebenfalls übernommen. Die Herstellungskosten werden (inklusive Grunderwerb) auf 25 Mio DM/km geschätzt.

Für die verschiedenen Verkehrsträger (Pkw, Lkw, Bus), die die Autobahn nutzen, wird eine Zurechnung der Kosten anhand von gewichteten Fahrleistungen vorgesehen. Die Gewichtung richtet sich nach der Achslast und entspricht bei Autobahnen dem Verhältnis 10:30:1 (Bus:Lkw:Pkw).

Kosten des vorhandenen Hauptschienennetzes

Nach einer Untersuchung des DIW über die Trassenpreisbildung der Deutschen Bahn AG [Link97] lagen die Trassenkosten¹ im Jahr 1995 bei 12,9 Mrd DM für das gesamte Schienennetz. Nach den dort enthaltenen Angaben setzen sich die Kosten im Wesentlichen aus 40 % Wertminderung (ohne Kapitalverzinsung) und 60 % Betriebskosten (fixe und variable Kosten) zusammen. Von den fixen Kosten wird angenommen, dass sie je Streckenkilometer genauso hoch wie bei den

¹Die Trassenkosten umfassen nach dieser Untersuchung Betrieb, Verwaltung, Erhaltung und Wertminderung der Fahrwege

Autobahnen sind und sich aus Grünpflege und Winterdienst zusammensetzen. Sie machen damit etwa 20 % der Betriebskosten aus. Die jährliche Wertminderung des Schienennetzes nach Angaben des DIW wird auf die angenommene Lebensdauer von 80 Jahren hochgerechnet und als Herstellungskosten in das Optimierungsmodell eingegeben. Die Wertminderung und fixen Kosten werden zu 62 % dem Netz der alten Bundesländer und zu 38 % den neuen Bundesländern zugeordnet. Diese Aufteilung entspricht den Anteilen der Netzlängen an der Gesamtlänge. Die variablen Kosten werden entsprechen den Fahrleistungsanteilen mit 67 % zu 33 % aufgeteilt. Zusätzlich werden Personenfern-, -nah- und Güterverkehr unterschiedlich gewichtet, da diese durch unterschiedliche Geschwindigkeiten und Massen die Strecken unterschiedlich belasten. Die Gewichtung richtet sich nach dem Trassenpreissystem der Bahn, das – je Fahrzeugkilometer – ein Verhältnis von 1,16 : 1 : 0,83 (Personenfernverkehr : Personennahverkehr : Güterverkehr) aufweist. Mit den gewichteten Fahrleistungen erhält man für den Personenfernverkehr der Bahn fixe Kosten von 31.300 DM/km/a, variable Kosten von 59.850 DM/km/a und eine Wertminderung von 38.250 DM/km/a.

5.1.3 Einbindung des Infrastrukturausbaus in das Optimierungsmodell

Das Infrastrukturmodell berechnet, wie im vorhergehenden Kapitel erläutert, die Erweiterung der Verkehrsnetze, wenn in einem Korridor die Kapazität zur Aufrechterhaltung des Verkehrs nicht ausreicht. Das Resultat dieser Rechnung sind KEA, Emissionen, Kosten und Kapazitäten des Ausbaus. Von diesen Ergebnissen des Infrastrukturmodells werden Kosten und Kapazitäten im Optimierungsmodell weiterverarbeitet. Der KEA und die Emissionen werden nach der sektoralen Aufteilung im Optimierungsmodell im Industriesektor, der auch die Bauwirtschaft enthält, bilanziert. Sie werden daher nicht in das Modell übernommen, um eine Doppelzählung zu vermeiden.

Die Ausbaupkapazität wird, genauso wie die Kapazität des vorhandenen Netzes, summarisch für die Verkehrsträger, die den Ausbau nutzen, begrenzt. Diese gemeinsame Begrenzung ist im Optimierungsmodell nicht von vorneherein vorgesehen, so dass neue Gleichungen in das Modell eingeführt werden (s. Abschnitt 5.4.5). Mit den Gleichungen kann zum Beispiel der Ausbau der Fernverkehrsstraßen begrenzt werden, so dass Busse, Lkw und Pkw in der Summe der Fahrleistungen beschränkt sind.

Die Kapazität des Autobahnnetzes steigt, wenn *alle* vorgesehenen Maßnahmen des BVWP durchgeführt werden, bis 2005 um etwa 77.000 Mio Fzgkm/a. Die Kapazität des Hauptschienennetzes steigt bei Durchführung aller Projekte im gleichen Zeitraum um etwa 330 Mio Fzgkm/a.

Herstellungskosten und Kapazität der Erweiterung der Fernverkehrsnetze wer-

den, wie in Kapitel 4.5 erläutert, vom Infrastrukturmodell berechnet und entsprechend in das Optimierungsmodell als Herstellungskosten und Begrenzungen der Infrastrukturausbautechniken eingegeben. Die variablen und fixen Kosten werden aus den Berechnungen für das vorhandene Netz übernommen.

5.1.4 Umrechnung der Daten für das Optimierungsmodell

Die Umrechnungen auf die Fahrleistung werden innerhalb einer Tabellenkalkulation durchgeführt. Dort werden die Fahrleistungen der Verkehrsträger und die Ausbaulängen und -kosten eingegeben. Die Kosten der vorhandenen Infrastruktur werden nach oben genannten Gewichtungen auf die Fahrleistung bezogen. Die Kosten des Ausbaus werden auf die *zusätzliche* Fahrleistung umgerechnet. Folgende Gleichung zeigt als Beispiel die Umrechnung der Herstellungskosten K des Bahnausbaus auf die zusätzliche Fahrleistung im Personenfernverkehr F_{zP} :

$$k_P = \frac{K \cdot g}{F_{zP}}$$

wobei k_P die auf die Fahrleistung bezogenen Herstellungskosten sind und

$$g = \frac{G_P F_P}{G_P F_P + G_G F_G}$$

der Gewichtung durch die Fahrleistungen 1989 im Personen- (F_P) und Güterverkehr (F_G) und die Gewichtungsfaktoren für Personenfern- (G_P) und Güterverkehr (G_G) (Abschnitt 5.1.2) entspricht. Im Beispiel ergeben sich mit $g = 0,46$ die spezifischen Herstellungskosten $k_P = 230 \text{ DM/Fzgkm}$.

5.2 Daten der Nahverkehrsnetze

Im Infrastrukturmodell werden lediglich Fernverkehrsmaßnahmen berücksichtigt. Zum einen ist der Ausbau der Infrastruktur im Fernverkehr in besonderem Maße kapazitätsabhängig, wogegen im Nahverkehr die Erschließungsaufgaben überwiegen, zum anderen ist durch die Bundesverkehrswegeplanung die Datengrundlage wesentlich leichter zu erfassen. Zudem wird auf dem – relativ zum Netz der restlichen Straßen – wenig umfangreichen Bundesfernstraßennetz immerhin die Hälfte der gesamten KFZ-Fahrleistung und durch die höheren Besetzungs- bzw. Beladungszahlen mehr als die Hälfte der Straßenverkehrsleistung erbracht. Die Kosten für den Ausbau der Nahverkehrsnetze werden für das Optimierungsmodell abgeschätzt.

5.2.1 Nahverkehr auf der Straße

Als Nahverkehrsstraßennetz werden für die in dieser Arbeit durchgeführten Rechnungen Gemeinde-, Kreis-, Land- und Bundesstraßen zusammengefasst, wobei insbesondere das Gemeindestraßennetz sehr umfangreich ist. Bund, Länder und Gemeinden gaben im Jahr 1989 für die Erhaltung und Pflege dieser Straßen 6,965 Mrd DM aus [Knoll97]. Davon sind 16,5 % fixe und 83,5 % variable Kosten. Diese Aufteilung entspricht den Anteilen fixer und variabler Kosten an den Betriebskosten der Autobahnen. Für die östlichen Bundesländer wird angenommen, dass im Jahre 1989 in der DDR lediglich die Hälfte der spezifischen Kosten ausgegeben wurde. Nach [BMV96b] beträgt die Wertminderung für die Nahverkehrsstraßen in den alten Ländern 2,378 Mrd DM/a, in den neuen Ländern nach einer Bewertung des DIW [Enderlein94] 58,5 Mio DM/a. Die Kosten für einen Kilometer Neubau im Nahverkehrsnetz werden auf 2 Mio DM geschätzt. Die Aufteilung der Kosten auf die Verkehrsträger Pkw, Bus und Lkw, erfolgt wie im Fernverkehr mit Hilfe von gewichteten Fahrleistungen. Dabei ist das Verhältnis der Gewichte im Nahverkehr Bus:Lkw:Pkw wie 10:10:1.

Unter Berücksichtigung der Verkehrsspitzen erhält man für die Kapazität der Straßen des Nahverkehrsnetzes in den alten Ländern etwa 500.000 Mio Fzgm/a. Das dem Nahverkehr zugeordnete Netz wächst pro Jahr in den westlichen Bundesländern durchschnittlich um etwa 3.800 km. Über 62.500 Mio Fzgm/a Kapazität können so in 16 Jahren von 1989 bis 2005 neu entstehen. Allerdings wird für das Nahverkehrsstraßennetz angenommen, dass der Ausbau nicht kapazitätsbedingt erfolgt, sondern hauptsächlich zur Erschließung. Das heißt, er ist auch nicht über das Infrastrukturmodell mit der Kapazität und der Belastung verknüpft und steht dem Optimierungsmodell in jeder Rechnung mit der gleichen Maximalmenge zur Verfügung.

5.2.2 Schienennahverkehr

Die Kosten des Nahverkehrsnetzes der Bahn werden, wie die Kosten im Hauptschienennetz, nach dem bereits erwähnten Trassenpreissystem berechnet [Link97]. Mit den gewichteten Fahrleistungen erhält man für den Personennahverkehr der Bahn in Bezug auf den Netzkilometer fixe Kosten von 31.300 DM/km/a, variable Kosten von 234.330 DM/km/a und eine Wertminderung von 100.730 DM/km/a.

Für die Kapazität im Schienennahverkehr wird die Schienenlänge des nachgeordneten Netzes der Deutschen Bahn AG (20.800 km in den alten Ländern im Jahr 1989 [BMV96b]) mit 240 Fahrten/Tag und 365 Tagen/Jahr multipliziert, so dass man 1.822 Mio Fzgm/a erhält. Für die Ausbaupkapazität wird angenommen, dass ein Neubau bis zu 265 km/Jahr möglich ist. Dieser Wert entspricht dem höchsten Ausbau, der in den letzten zwei Jahrzehnten im Schienennahver-

kehr durchgeführt wurde. Damit erhält man in 16 Jahren von 1989 bis 2005 eine zusätzliche Kapazität von 371,4 Mio Fzgkm/a.

5.3 Allgemeine Eingangsdaten für das Optimierungsmodell

Das Optimierungsmodell bildet die gesamte deutsche Energiewirtschaft ab und benötigt daher eine Vielzahl an Eingangsdaten. Diese sind in einer modellinternen Datenbank abgelegt. Im Folgenden wird über die wesentlichen Faktoren, die das Ergebnis bestimmen, ein Überblick gegeben. Diese Einflussgrößen sind vor allem die Nachfragegrößen und die Begrenzungen.

5.3.1 Annahmen im Optimierungsmodell

Die Optimierungsrechnungen sind von Annahmen über ökonomische Rahmenbedingungen abhängig, von denen die wichtigsten im Folgenden genannt werden:

- Der Rohölimportpreis steigt in den Annahmen des IKARUS-Projektes zwischen den Jahren 2005 und 2020 um ca. 2 % p.a., das heißt bis zum Jahr 2020 um 30 %². Dadurch steigen entsprechend die Kraftstoffpreise im Verkehrssektor.
- Die Kapitalkosten im Modell werden mit einem Zinssatz von 5 % p.a. berechnet. Ausgangsbasis sind die Herstellungskosten einer Technik; die Dauer der Verzinsung wird durch den Parameter „ökonomische Lebensdauer“ der jeweiligen Technik bestimmt. Alle Kosten im Modell werden ohne Steuern berechnet.
- Das Wachstum des Brutto-Inland-Produkts beträgt in den Annahmen des Modells 2,5 % p.a..
- Nach den Annahmen in der hier verwendeten Version des Modells wächst die Wohnbevölkerung in Deutschland bis zum Jahr 2005 auf knapp 80 Millionen Menschen, bis 2020 vermindert sie sich auf 75 Millionen Einwohner.

Durch das Optimierungsmodell werden die Emissionen von sechs klimarelevanten Gasen bilanziert:

- Kohlendioxid (CO₂)

²Diese Annahmen wurden im neusten Datensatz nach unten korrigiert. Inzwischen wird nur noch eine Steigerung des Rohölimportpreises um 1,1 % p.a. angenommen.

Tabelle 5.1: Das Optimierungsergebnis bestimmende Nachfragen. (ABL: Alte Bundesländer, NBL: Neue Bundesländer, D: Gesamtes Bundesgebiet; Quelle: [Markewitz98], S. 105)

Sektor			ABL		NBL		D
			1989	2005	1989	2005	2020
Haushalte (Raumwärme)	[Mio m ²]	Einfamilienh.	1.328	1.601	157	211	1.893
	[Mio m ²]	Mehrfamilienh.	871	985	262	269	1.261
Warmwasser	[Mio Pers.]	Personen	62	64,2	16,6	15,6	74,8
Verkehr	[Mrd Pkm]	Personennahv.	383	467	78	106	573
	[Mrd Pkm]	Personenfernvh.	307	383	64	107	576
	[Mrd tkm]	Güternahv.	47	71	9	16	101
	[Mrd tkm]	Güterfernvh.	234	344	66	66	473
Industrie	[Mrd DM]	Nettoproduktionswert	591,7	802	34,7	134	1.299
Kleinverbraucher	[Mio Pers.]	Warmwasser, Raumwärme ...	21,6	23,5	4,6	6	29,3

- Kohlenmonoxid (CO)
- Schwefeldioxid (SO₂)
- Stickoxide (NO_x)
- Methan (CH₄)
- Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (KWS)

5.3.2 Nachfragen

In der Lösung der Optimierungsrechnung werden die Nachfragen nach Energiedienstleistungen auf jeden Fall erfüllt. Die aggregierten Nachfragegrößen werden in Tabelle 5.1 gezeigt. Der Raumwärmebedarf in Haushalten und bei Kleinverbrauchern wird durch die zu beheizende Fläche und der Warmwasserbedarf durch die Größe der Wohnbevölkerung bzw. die Anzahl der Beschäftigten bestimmt. Im Verkehrssektor ist die Strecke multipliziert mit der Anzahl an Personen oder der Menge an Gütern die Nachfragegröße. Für die Industrie ist sie durch den Nettoproduktionswert gegeben. Die aggregierten Werte sind im Modell weiter aufgegliedert, zum Beispiel im Falle der Industrienachfragen in verschiedene Untersektoren.

Tabelle 5.2: Das Optimierungsergebnis bestimmende energiepolitische Beschränkungen (ohne Begrenzungen im Verkehrssektor; Quelle: [Markewitz98], S. 106).

Begrenzte Größe		ABL	NBL	D	Art der Grenze
		2005	2005	2020	
Steinkohleförderung		1.100 PJ	0 PJ	745 PJ	untere
davon zur Stromerzeugung		500 PJ	45 PJ		untere
Einsatz von Braunkohle in der Stromerzeugung		750 PJ	550 PJ		untere
Importsteinkohle		807 PJ	269 PJ	1.614 PJ	obere
Kapazität Kernenergie		21,1 GW	0 GW	6,0 GW	fix
Zubau	Steinkohle	3,9 GW	2,4 GW	40 GW	obere
	Braunkohle	2,9 GW	10,1 GW	25 GW	obere
	Kernkraft	0 GW	0 GW	14,2 GW	obere
	Erdgas	7,5 GW	6,3 GW	41,4 GW	obere
	Windkraft	4,0 GW	0,5 GW	4,9 GW	obere

5.3.3 Energiepolitische Randbedingungen

Neben den Nachfragen bestimmen die Randbedingungen im Wesentlichen das Optimierungsergebnis. Sie erzwingen eine Technik oder schränken ihre Verwendung ein. Zusätzlich zu den Techniken können aber auch aggregierte Werte von Randbedingungen eingeschränkt werden. Wie schon in Kapitel 2.3.3 erwähnt, werden solche Begrenzungen unter anderem aus Gründen der Verfügbarkeit, aus politischen Erwägungen oder um das Verhalten der Verbraucher zu simulieren, gesetzt. Alle Begrenzungen außer denjenigen im Verkehrssektor (Kapitel 5.4.5, S. 81) sind den IKARUS-Basisfällen entnommen. Die Datengrundlage der Basisfälle entspricht einer Fortschreibung der bis Ende 1998 absehbaren energiepolitischen Rahmenbedingungen [Markewitz98]. In Tabelle 5.2 sind die Wichtigsten der allgemeinen Randbedingungen enthalten. Ohne ihre Kenntnis kann die Interpretation der Optimierungsergebnisse nur unvollständig erfolgen.

Die Begrenzungen der Stein- und Braunkohle entsprechen den politisch geforderten Mindestfördermengen, die Begrenzung der Kernenergie erfolgt auf der Basis der Kapazität von 1998 bzw. der zu einem späteren Zeitpunkt wahrscheinlich verbleibenden Kapazität. Die Zubaukapazitäten sind die zwischen 1989 und dem entsprechenden Stützjahr als maximal möglich angesehenen zusätzlichen Kapazitäten.

5.4 Daten der Verkehrstechniken für das Optimierungsmodell

Die Datenbasis des Verkehrssektors in der hier verwendeten Modellversion wurde zuletzt im Jahr 1993 aktualisiert. Inzwischen ist eine Neufassung durchgeführt worden, auf die zum Zeitpunkt der Durchführung der Rechnungen allerdings noch nicht zurückgegriffen werden konnte. Daher war es notwendig, die Daten des Verkehrssektors im Optimierungsmodell zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren.

5.4.1 Struktur und Annahmen im Verkehrssektor

Die Struktur des Verkehrssektors im Optimierungsmodell ist in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt. Die Verkehrsleistungen im Personennah- und -fernverkehr sowie im Güternah- und -fernverkehr sind die Nachfragegrößen. Sie werden durch das Modell kostenoptimal auf die Verkehrsträger aufgeteilt. Zum Beispiel wird die Nachfrage im Personenfernverkehr auf Bahn, Bus und Pkw aufgeteilt. Für jeden Verkehrsträger gibt es eine charakteristische Besetzungszahl (ein Bus im Fernverkehr 2005 ist zum Beispiel mit 25 Personen/Fahrzeug besetzt). Die Verkehrsleistung dividiert durch die Besetzungszahl ergibt die Fahrleistung, für die, eventuell zusammen mit anderen Fahrzeugen, ausreichend Infrastrukturkapazität vorhanden sein muss. Ist dies nicht der Fall, kann auf den Infrastrukturausbau zurückgegriffen werden. Dadurch erhält man die realisierte Fahrleistung. Die Kapazität der Infrastruktur und ihres Ausbaus beschränkt also die Summe dieser Fahrleistungen.

Zur Erbringung der Fahrleistung kann das Optimierungsmodell für jede Fahrzeugart verschiedene Antriebstechniken wählen. Zum Beispiel stehen für Straßenfahrzeuge als Antriebstechniken zur Verfügung:

- Benzin- und Dieselantrieb
- Benzin- und Dieselsparantrieb (Die Sparantriebe sind sehr aufwendig und teuer weiterentwickelte Normalantriebe und daher sparsamer als diese.)
- Methanolantrieb (Die Daten für den Methanolantrieb sind entsprechend den Erwartungen an ein Brennstoffzellenfahrzeug angepasst.)
- Ethanolantrieb (Die Daten für den Ethanolantrieb entsprechen denen des Methanolantriebs, mit Ausnahme der CO₂-Emissionen. Ethanol wird als biologisch erzeugter Treibstoff behandelt und gilt damit als CO₂-neutral.)
- CNG-Antrieb (Compressed Natural Gas)

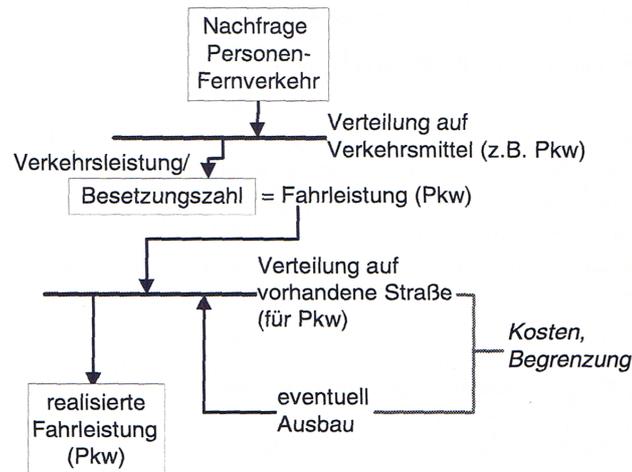


Abbildung 5.2: Schema der Struktur des Verkehrssektors im Optimierungsmodell. In dieser Arbeit liegt das Augenmerk besonders auf Kosten und Begrenzung von vorhandener Infrastruktur und deren Ausbau. (nach [Jagodzinski95])

- LPG-Antrieb (Liquid Purified Gas, Flüssiggas)
- Rapsölantrieb (Der Rapsölantrieb ist dem Dieselantrieb ähnlich; das Rapsöl ist als biologisch erzeugter Treibstoff CO₂-neutral.)
- Elektroantrieb (Fahrzeuge mit diesem Antrieb sind batteriebetrieben und haben eine kurze Reichweite. Sie sind daher nur für den Nahverkehr vorgesehen.)
- Wasserstoffantrieb (Wasserstofffahrzeuge stehen dem Modell erst für das Jahr 2020 zur Verfügung, da eine Einführung der Wasserstofftechnologie zum Jahr 2005 nicht vorgesehen ist.)

Diese Antriebstechniken stehen den Straßenfahrzeugen zur Verfügung. Im Schienenverkehr sind Elektro- und Dieselantrieb möglich. Für beide Antriebe sind Versionen vorgesehen, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, aber auch mit Mehrkosten weiterentwickelte, sparsamere Versionen. Auch für den Flugverkehr sind zwei Varianten vorgesehen, von denen eine dem Stand der Technik entspricht und die andere unter Mehrkosten weiterentwickelt wurde. Für die Binnenschifffahrt steht nur eine Antriebsart (Dieselmotor) zur Verfügung.

In den folgenden Abschnitten werden Kosten-, Emissions- und Energiedaten der einzelnen Techniken beschrieben.

Tabelle 5.3: Herstellungskosten von ausgewählten Fahrzeugen als Eingangsdaten in das Optimierungsmodell für das Jahr 2005 (inflationsbereinigt auf Basis von 1989).

	Fahrzeug	Lebensdauer	Kosten
		[Jahre]	[DM]
Personen- nahver- kehr	Benzin Pkw	12	29.000
	Diesel Pkw	14	31.000
	Diesel Bus	15	462.000
	Elektro Bahn	25	15.400.000
	Diesel Bahn	30	14.000.000
Personen- fernver- kehr	Benzin Pkw	12	29.000
	Diesel Pkw	14	31.000
	Diesel Bus	15	528.000
	Elektro Bahn	30	38.640.000
	Diesel Bahn	30	14.000.000
	Flugzeug	20	90.000.000
Güter- nahver- kehr	Diesel Lkw	15	120.000
	Methanol Lkw	15	125.000
	LPG Lkw	15	125.000
	Benzin Lkw	15	67.890
Güter- fernver- kehr	Binnenschiff	40	1.758.000
	Elektro Bahn	35	7.700.000
	Diesel Lkw	15	280.000
	Flugzeug	20	90.000.000

5.4.2 Kostendaten der Fahrzeuge

Die Kostendaten der Fahrzeuge des Straßenverkehrs werden aus Herstellerangaben entnommen. Die Herstellungskosten der Fernverkehrszüge entsprechen den Angaben zur ICE-Entwicklungslinie. Daten, für die keine aktuellen Angaben ermittelt werden konnten, werden aus der Datenbank des Optimierungsmodells übernommen, die vom TÜV Rheinland für den Verkehrsbereich erhoben worden ist ([Brosthaus95]). In Tabelle 5.3 werden als Beispiel die Herstellungskosten für die vom Modell im Basisfall (s. Kapitel 6) vorgeschlagenen Techniken aufgeführt. Die Einbindung der Infrastrukturkosten in das Optimierungsmodell wurde bereits in Abschnitt 5.1.3 beschrieben.

5.4.3 Emissionsdaten der Fahrzeuge

Für konventionelle Straßenfahrzeuge werden die Emissionsfaktoren durch das Programm „Handbuch für Emissionsfaktoren“ [infras95] in verschiedenen Fahr-

zuständen berechnet. Beim Nahverkehr werden auch Kaltstart- und Verdampfungszuschläge berechnet. Diese Zuschläge wirken sich vor allem bei den Nicht-CO₂-Gasen aus. Beim Fernverkehr werden die Emissionen, die während der Fahrt entstehen, berechnet. Die Rechnungen mit Hilfe des Handbuches sind für Pkw mit Benzin- und Dieselantrieb und für Lkw möglich. Sie beziehen sich auf die Jahre 2005 und 2010, so dass der Trend zwischen 2005 und 2010 bis 2020 extrapoliert wird.

Als Energieträger aus nachwachsenden Quellen werden im Optimierungsmodell Rapsöl und Ethanol behandelt. Da diese Energieträger bei der Verbrennung CO₂-neutral sind, werden für sie keine CO₂-Emissionen im Verkehrssektor berechnet. Die Emissionen bei der Herstellung der Energieträger werden im Umwandlungs- bzw. Industriesektor bilanziert.

Auch bei nicht-konventionellen Fahrzeugen sind die Kohlendioxidemissionen gut erfasst, obwohl sie aus verschiedenen Veröffentlichungen ermittelt wurden. Alle anderen Emissionen bei nicht-konventionellen Fahrzeugen sind geschätzt und daher unsicher. Da jedoch in den Reduktionsrechnungen (Kapitel 6) lediglich CO₂-Emissionen limitiert werden, ist diese Unsicherheit für das Ergebnis der Rechnungen von geringer Bedeutung.

Die vom Infrastrukturmodell berechneten Emissionen für den Ausbau der Infrastruktur werden nicht in die Optimierungsrechnungen einbezogen. Der Sektor Bauwirtschaft, dem diese Emissionen direkt zuzuordnen sind, wird innerhalb des Industriesektors abgebildet. Eine Berücksichtigung im Verkehrssektor würde daher, wie bereits erwähnt, zu einer Doppelzählung führen. Die indirekten Emissionen von stromgetriebenen Fahrzeugen, also Elektro-Pkw, -Lkw und den stromgetriebenen Eisenbahnen werden innerhalb des Umwandlungssektors bei der Stromproduktion berechnet.

5.4.4 Energiedaten der Fahrzeuge

Über die Energieträger sind die einzelnen Sektoren der Energiewirtschaft im Modell miteinander verknüpft. Die Verkehrstechniken sind Energienutzer, bei denen je Fahrleistung eine bestimmte Energiemenge eingesetzt werden muss. Die dafür nötigen Verbrauchsdaten stammen überwiegend von Herstellern. Waren diese nicht verfügbar, wurde die Datenbank im Optimierungsmodell unverändert gelassen.

Der Kraftstoffverbrauch von Pkw und Lkw mit konventionellen Antrieben ist bei genormter Messmethode genau bekannt. In der Realität wird allerdings ein hoher Anteil des Verbrauchs von der Fahrweise bestimmt. Die Verbrauchswerte im Modell unterliegen damit der Einschränkung, von der Norm entsprechender Nutzung abzuhängen. Die in Abbildung 5.3 gezeigten Werte werden ins Modell

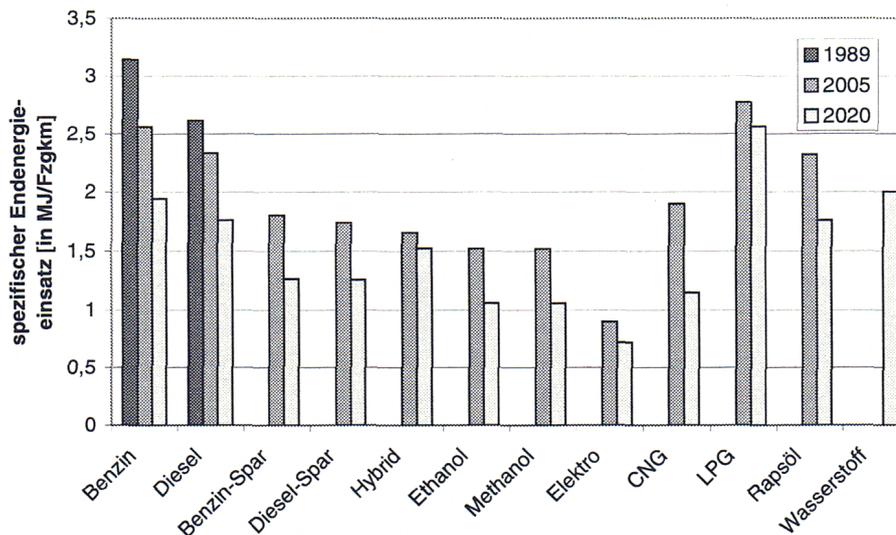


Abbildung 5.3: Daten im Optimierungsmodell: Energiebedarf verschiedener Pkw-Antriebe. Der Wert für den Benzin-Pkw von 1989 entspricht etwa 8 l Benzin/100 km.

übernommen. Sie entsprechen einer gebremsten Entwicklung in Bezug auf die Einsparung des Energieverbrauchs im Fahrzeugbau.

Für die Berechnung des Verbrauchs der Bahn müssen die folgenden Umrechnungen vorgenommen werden. Sie beruhen auf Angaben aus dem Umweltbericht der Deutschen Bahn AG [Jopp96]. Danach wurden im Jahr 1995 für die Fahrleistung von 908,8 Mio Fzgkm knapp 9.700 GWh Strom eingesetzt. Das sind im Mittel 1.067 kWh/100 km, die allerdings noch nach Nah- und Fernverkehr differenziert werden müssen. Der ICE 1 verbraucht 2.300 kWh/100 km [Jänsch93], die neueren ICE-Generationen allerdings erheblich weniger, da Gewicht eingespart und die Antriebstechnik verbessert wurde (zum Beispiel der Direktantrieb an den Achsen für den ICE 3). Für die Bahn wurden im Modell für den Personennahverkehr 975 kWh/100 km (35 MJ/Fzgkm) und für den Personenfernverkehr 1.372 kWh/100 km (49 MJ/Fzgkm) angenommen.

5.4.5 Randbedingungen im Verkehrssektor

Die Randbedingungen im Optimierungsmodell begrenzen die Lösungsmöglichkeiten einer Rechnung. Je nach Aufgabenstellung können sie – wie in dieser Arbeit – am technisch Möglichen orientiert sein oder das Modell bis zu einer Berechnung der erwarteten Entwicklung eingrenzen (wie im Trendszenario, Kapitel 6). Je enger die Rechnung eingegrenzt wird, desto weiter entfernt liegt das Ergebnis von der kostenminimalen Lösung. Je weiter die Grenzen gezogen werden, desto weni-

ger entspricht die Lösung einem realistischen Szenario. Dieser Zwiespalt entsteht bei jeder Optimierungsrechnung, so dass die Randbedingungen und die darin liegenden Annahmen genannt sein müssen, um die Ergebnisse einer Rechnung entsprechend interpretieren zu können.

Zusätzliche Gleichungen

Einige für den Verkehrssektor wichtige Aspekte werden vom Optimierungsmodell nicht abgebildet, daher werden zwei Erweiterungen gegenüber dem Standardmodell eingeführt, von denen die erste der Verknüpfung von Pkw im Nah- und Fernverkehr dient; die zweite dient der Begrenzung des Infrastrukturausbaus, der gemeinsam von verschiedenen Verkehrsträgern genutzt wird.

Im Modell ist in der hier verwendeten Version keine Kopplung zwischen Pkw im Fern- und Nahverkehr vorgesehen. Das heißt, dass im Modell ein Pkw ausschließlich im Nah- oder Fernverkehr eingesetzt werden könnte. Die den Nah- und Fernverkehrstechniken zugrunde liegenden Daten sind zwar gleich, allerdings wird damit nicht vermieden, dass im Nahverkehr zum Beispiel nur Benzin-Pkw und im Fernverkehr nur Diesel-Pkw fahren. Die Diesel-Pkw haben im Modell eine größere jährliche Fahrleistung im Fernverkehr als die Benzin-Pkw. Das kann dazu führen, dass die höheren Herstellungs- und Fixkosten des Diesel-Pkw auf die Fahrleistung umgerechnet günstiger sind als beim Benzin-Pkw. Ist Dieselkraftstoff im Modell zudem günstig verfügbar, kann das genannte Beispiel resultieren. Im Nahverkehr sind die jährlichen Fahrleistungen von Benzin- und Diesel-Pkw gleich, so dass der günstigere Benzin-Pkw gewählt wird. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass ein Pkw, wenn er für die eine Verkehrsart verwendet wird, auch für die andere zur Verfügung steht. Um dies wenigstens zum Teil zu ermöglichen, müssen für die Pkw-Techniken neue Gleichungen in die zu optimierende Matrix eingefügt werden. Da nur Gleichungen in der Form der Gleichung 2.2 (S. 12) in dieser Version des Optimierungsmodells möglich sind, muss auch die Verknüpfung von Pkw-Fahrleistungen im Fern- und Nahverkehr in diese Form gebracht werden. Da nach Rechnungen ohne zusätzliche Gleichungen deutlich wurde, dass das Modell für den Personennahverkehr den Pkw bevorzugt, wurden Gleichungen eingeführt, die eine Wahl des Pkw für den Nahverkehr erzwingen, wenn er auch für den Fernverkehr gewählt wird. Dies entspricht der Annahme, dass auf ein eigenes Fahrzeug eher im Fernverkehr als im Nahverkehr verzichtet wird, besonders im Hinblick auf die nur unzureichend durch Öffentlichen Nahverkehr erschlossenen ländlichen Gebiete. Nach Untersuchungen des Pkw-Verkehrs [Hautzinger96] muss davon ausgegangen werden, dass im Durchschnitt das etwa 1,54-fache der Pkw-Fernverkehrsleistung im Nahverkehr stattfindet. Für alternative Antriebe wird angenommen, dass sie eher für den Nahverkehr benutzt werden, da anzunehmen ist, dass die Bereitschaft im Fernverkehr auf die Bahn umzusteigen bei Benutzern dieser Fahrzeuge größer ist. Bei den alternativen Antrieben wird daher der

Faktor 1,67 (das entspricht einem Fernverkehrsanteil von etwa 37 %) und bei Pkw, die einen besonders sparsamen konventionellen Antrieb haben, der Faktor 1,82 (Fernverkehrsanteil: 35 %) angenommen. Das Verhältnis von Fern- zu Nahverkehrsleistung ist bei Diesel-Pkw größer als bei anderen Pkw ([Shell93], S. 19), so dass für sie der Faktor 1,43 (mehr als 41 % Fernverkehrsanteil) gewählt wird.

Für den Ausbau der Infrastruktur ist keine gemeinsame Beschränkung bei Techniken, die die gleichen Verkehrswege benutzen, vorgesehen. Eine solche Beschränkung ist für die bestehende Infrastruktur vorgesehen, zum Beispiel sind sowohl Lkw- als auch Pkw-Fernverkehr auf die Autobahn angewiesen. Damit auch der Ausbau eine solche Beschränkung erhält, werden Gleichungen der Form:

$$\text{Ausbau}_{\text{Pkw}} + \text{Ausbau}_{\text{Lkw}} \leq \text{Ausbaugrenze}$$

eingeführt. Damit ist eine Beschränkung der Neubaukapazität und die Verknüpfung der Verkehrsträger erreicht.

Randbedingungen der Verkehrstechniken

Begrenzungen im Verkehrssektor können grundsätzlich auf zwei Weisen wirken, auf einen ganzen Verkehrsträger oder auf eine einzelne Technik. Indirekt können zusätzliche Begrenzungen durch die Verfügbarkeit von Energieträgern und Infrastruktur auftreten. Aufgabe dieser Arbeit ist unter anderem, die Begrenzungen durch die Kapazität der Infrastruktur für das Modell zu quantifizieren (s. Kapitel 5.1.1).

Die Randbedingungen werden erst nach verschiedenen Testrechnungen gesetzt, um ihre Anzahl möglichst gering zu halten und das Ergebnis im Verkehrssektor besser einschätzen zu können. Das heißt, durch diese Vorgehensweise ist die Interpretation der Ergebnisse mit geringerem Aufwand verbunden, da schon in den Testrechnungen der Vorzug einer Technik vor allen anderen sehr deutlich ist. In den Ergebnissen der Szenarienrechnungen (Kapitel 6) ist nicht in jedem Fall sofort zu erkennen, welche Technik als kostengünstigste einzustufen ist, da die Lösung durch die Beschränkungen bestimmt ist.

Bei einer Rechnung ohne Begrenzungen und ohne Kapazitätsgrenzen der Infrastruktur setzt das Modell im Personenfernverkehr Bahnen mit Elektroantrieb ein. Im Personennahverkehr ist der Benzin-Pkw im Modell im Rahmen der berücksichtigten Kosten das kostengünstigste Fortbewegungsmittel (ohne Fußgänger und Fahrradfahrer) und wird daher ausschließlich vorgeschlagen. Im Güternahverkehr ist der Lkw der einzige Verkehrsträger, der allerdings mit verschiedenen Antriebstechniken gewählt werden kann. Bei einer Rechnung ohne Begrenzungen wird der LPG-Antrieb gewählt, da der Brennstoff aus dem Raffineriesektor zu niedrigen

(modellinternen) Kosten bezogen wird. Für den Güterfernverkehr ist das Binnenschiff das günstigste Verkehrsmittel. Nach einer Begrenzung dieser „ersten Wahl“ des Modells werden im Personennah- und -fernverkehr Dieselbusse eingesetzt. Im Güterfernverkehr wird die Bahn gewählt.

Die Begrenzung eines gesamten Verkehrsträgers erfolgt nach dem Konzept des „gebundenen Verkehrs“. Der gebundene Verkehr entspricht der Verkehrsnachfrage von Personen, die auf einen bestimmten Verkehrsträger angewiesen sind, also zum Beispiel auf den Pkw oder den öffentlichen Verkehr. Gründe können sein, dass keine Verbindung durch den öffentlichen Verkehr (ÖV) oder dass kein Pkw zur Verfügung steht oder auch dass der Verkehrsteilnehmer keinen Führerschein besitzt. Nach [Brög92] waren im Jahr 1989 mehr als die Hälfte der Benutzer des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) an den jeweiligen Verkehrsträger (Bus oder Bahn) gebunden, wobei eine fallende Tendenz festgestellt wurde. Auf Grund dieses Trends und der allgemein steigenden Nachfrage wird für die hier verwendeten Grenzen der Verkehrsträger (Tabelle 5.4) angenommen, dass die Anzahl der im Jahr 1989 gebundenen Personen konstant bis 2005 bleibt. Daraus folgt ein Anteil an ÖV-gebundenem Verkehr von mindestens 6 % an der Verkehrsleistung im Personennahverkehr des Jahres 2005. Aus derselben Quelle folgt, dass im Jahr 1989 39 % der Pkw-Nutzer gebunden waren. Im Jahr 2005 resultiert daraus ein Anteil von mindestens 28 % Pkw-Nutzung an der gesamten Personennahverkehrsleistung. Beim Fernverkehr ist ein Anteil von ca. 5 % ÖV-gebunden und ein Anteil von 28 % an den Pkw gebunden.

Für die Begrenzung des Einsatzes einer Technik ist bestimmend, welche Marktanteile am Fahrzeugmarkt eine neue Antriebstechnik erlangen kann. Im Extremfall, wenn diese Technik zu sehr geringen Kosten angeboten würde, könnte er 100 % der Neuzulassungen betragen. Die Marktanteile, die neue Fahrzeugkonzepte erlangen können, sind schwer einzuschätzen, da sie vor allem vom Verkaufspreis abhängen. Daher wird in diese Arbeit für die Begrenzung einer Technik angenommen, dass maximal alle Neuzulassungen diese Technik benutzen können. Für die Berechnung muss dann ein „Startjahr“ angenommen werden, und die jährlichen Neuzulassungen müssen bekannt sein. Zum Beispiel werden pro Jahr mehr als 3 Mio Pkw neu zugelassen, also in knapp sieben Jahren etwa der halbe Pkw-Bestand. Für folgende Techniken wurde angenommen, dass sie im Prinzip schon im Jahr 1998, wenn auch nicht zu niedrigen Kosten bzw. mit entsprechender Brennstoffversorgung, verfügbar sind:

- Liquid Purified Gas (Pkw, Busse und Lkw)
- Elektro (Pkw und Busse)
- Hybrid Elektro-/Diesel- oder Benzinantrieb für Pkw und Lkw im Nahverkehr

- Rapsölfahrzeuge
- Benzin-Spar-Pkw
- Busse mit Brennstoffzellen und Methanol als Brennstoff

Bei allen anderen Antriebsarten wurde als Startjahr das Jahr 2003 angenommen. Tabelle 5.4 zeigt die wesentlichen Begrenzungen im Verkehrssektor. Die in der Tabelle enthaltenen Daten geben eine maximale obere oder untere Grenze an, die als Eingangsdaten in das Modell das Optimierungsergebnis einschränken. Diese Grenzen entsprechen also nicht einer erwarteten, sondern einer maximal möglichen Entwicklung. Daher sind die Modellergebnisse auch in keiner Hinsicht mit einer Prognose zu vergleichen, sondern entsprechen einer kostenminimalen Entwicklung bis zum jeweiligen Stützjahr.

Tabelle 5.4: Vorgaben der Begrenzungen im Verkehrssektor. Die Begrenzungen der Nachfragen sind gebundene Verkehre, die anderen Grenzen entstehen durch die maximal mögliche Menge an neuen Fahrzeugen.

	begrenzte Größe	Einheit	1989 ist (D)	2005		2020 D	Art der Grenze
				ABL	NBL		
Personennahverkehr	Nachfrage Bahn	[Mrd Pkm]	36	12	3,9	14,4	untere
	Diesel-Bahn	[Mio km]	180	69	21		untere
	Nachfrage Bus	[Mrd Pkm]	36	15	1,8	14,4	untere
	Diesel-Bus	[Mio km]	3.597	1.400	201		untere
	alternative Busse (98)	[Mio km]	0	1.900	243		obere
	alternative Busse (03)	[Mio km]	0	800	102		obere
	Nachfrage Pkw	[Mrd Pkm]	383	130	29	153	untere
	Benzin-Pkw	[Mio km]	247.581	125.000	28.800		untere
	Diesel-Pkw	[Mio km]	43.680	31.306	7.200		untere
	alternative Pkw (98)	[Mio km]	0	104.352	24.000		obere
	alternative Pkw (03)	[Mio km]	0	47.000	10.800		obere
Personenfernverkehr	Nachfrage Bahn	[Mrd Pkm]	31	7	5,4	12,4	untere
	Diesel-Bahn	[Mio km]	62	13	4,14		untere
	Nachfrage Bus	[Mrd Pkm]	46	12	5,7	16,8	untere
	Diesel-Bus	[Mio km]	1.477	391	184		untere
	alternative Busse (98)	[Mio km]	0	519	243		obere
	alternative Busse (03)	[Mio km]	0	218	102		obere
	Nachfrage Pkw	[Mrd Pkm]	303	107	12	116	untere
	Benzin-Pkw	[Mio km]	161.924	85.932	28.800		untere
	Diesel-Pkw	[Mio km]	35.180	21.483	7.200		untere
	alternative Pkw (98)	[Mio km]	0	71.610	24.000		obere
	alternative Pkw (03)	[Mio km]	0	32.224	10.800		obere
	Nachfrage Flugzeug	[Mrd Pkm]	5	5	2,5		untere
Güternahverkehr	Benzin-Lkw	[Mio km]	11.818	792	119		untere
	Diesel-Lkw	[Mio km]	17.303	1.241	186		untere
	alternative Lkw (98)	[Mio km]	0	3.682	741		obere
	alternative Lkw (03)	[Mio km]	0	1.594	321		obere
Güterfernverkehr	Nachfrage Schiff	[Mrd tkm]	58	84	7	82	obere
	Nachfrage Lkw	[Mrd tkm]	128	50			untere
	Diesel-Lkw	[Mio km]	14.185	4.356	1.553		untere
	alternative Lkw (98)	[Mio km]	0	8.844			obere
	alternative Lkw (03)	[Mio km]	0	3.828	800		obere
	Nachfrage Flugzeug	[Mrd Pkm]	0	0,3	0,03	1	untere

Kapitel 6

Rechnungen mit dem Optimierungsmodell

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Bilanz von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen beim Bau von Verkehrswegen vorgestellt, das Infrastrukturmodell wurde erläutert und die benötigten Daten wurden aufbereitet. Im Folgenden werden die Optimierungsrechnungen und ihre Ergebnisse vorgestellt. Die Rechnungen werden unter Einbeziehung der Infrastruktur durch die oben erläuterten Iterationen durchgeführt. In Abbildung 6.1 werden die Zusammenhänge der benötigten Daten und der Inhalt der folgenden Abschnitte graphisch dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Version des Optimierungsmodells verwendet, die die Berechnung von drei Stützjahren (1989, 2005 und 2020) zulässt. Für die Jahre 1989 und 2005 ist eine getrennte Berechnung nach ost- und westdeutschen Bundesländern (NBL und ABL) vorgesehen, für 2020 für das gesamte Bundesgebiet. Im Folgenden werden die Rechenfälle (Szenarien) vorgestellt und dann die entsprechenden Ergebnisse erläutert. Zur Einschätzung der Sensitivität des Modells werden verschiedene Parameter im Verkehrssektor variiert. Die Variationen und ihre Auswirkungen auf die Optimierungsergebnisse werden im Abschnitt 6.3 beschrieben. Der letzte Abschnitt in diesem Kapitel analysiert die Auswirkung der Einbindung der Infrastruktur in das Optimierungsmodell.

Im Optimierungsmodell sind in der vorliegenden Version bereits Platzhalter¹ für die vorhandene Infrastruktur und ihren Ausbau vorgesehen. Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, für diese Platzhalter die entsprechenden Techniken mit Daten zu versehen und die Verwendung der Techniken durch das Modell zu analysieren.

¹Platzhalter sind im Optimierungsmodell vorgesehene Strukturen, die durch unterschiedliche Techniken ausgefüllt werden können. Zum Beispiel gibt es den Platzhalter Pkw-Nahverkehr, in den der Benzin-, der Diesel- oder (oder und) andere Pkw eingesetzt werden können.

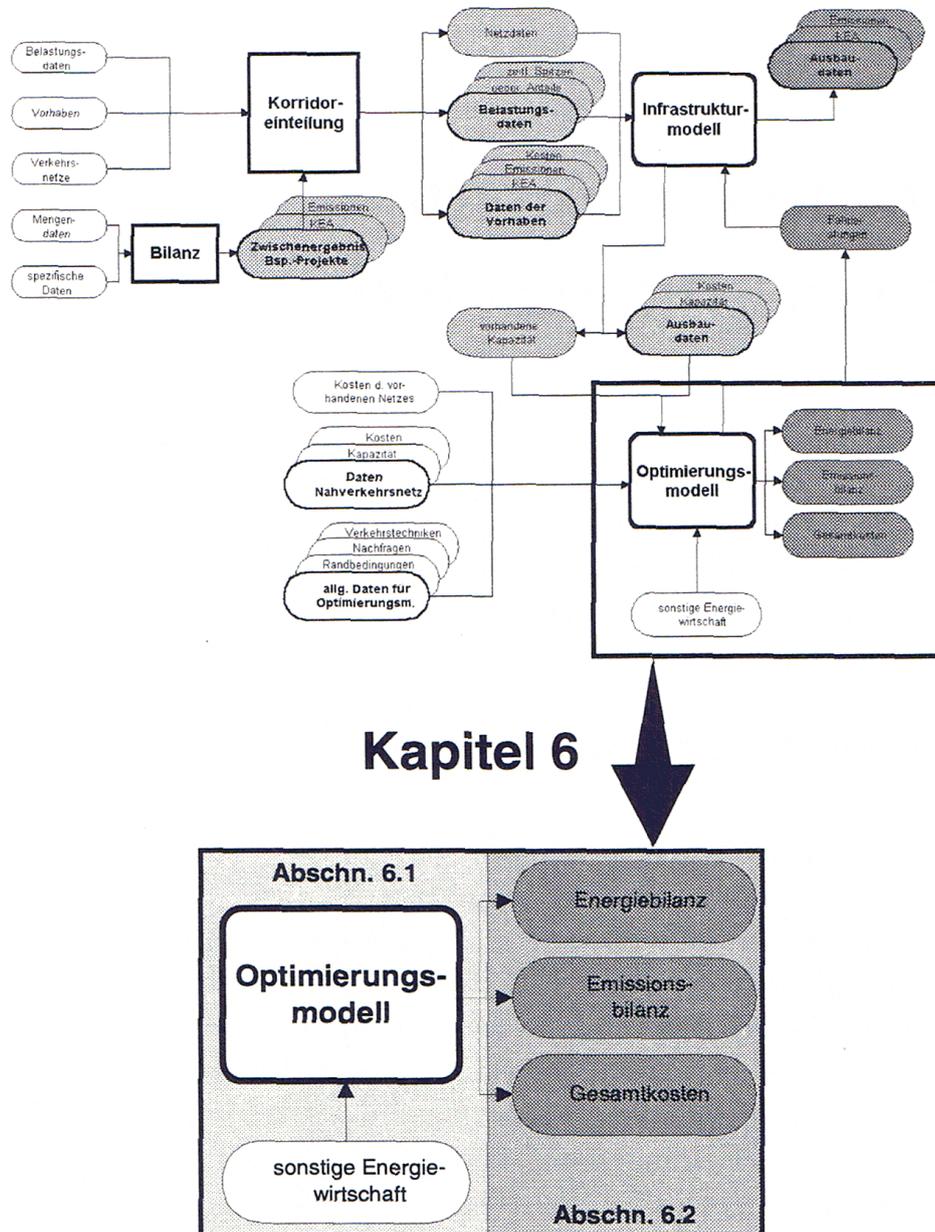


Abbildung 6.1: Schema der in Kapitel 6 relevanten Daten mit den Inhalten der folgenden Unterkapitel.

Die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen (Abschnitt 6.2) zeigen, dass die vorgesehenen Platzhalter durchaus in der Lage sind, die Einbindung der Infrastruktur zu leisten, allerdings muss – wie bereits beschrieben – iterativ vorgegangen werden. Alle in diesem Kapitel analysierten Rechnungen werden mit unveränderten Begrenzungen für die Technikplatzhalter, ausgenommen die Infrastruktur, durchgeführt. Die Begrenzungen der Infrastruktur, also die Kapazitäten, variieren infolge der Iterationen. Wie in Kapitel 4 erläutert, sind sowohl die Kosten der Infrastruktur als auch die vorgeschlagene Neubaukapazität von der Fahrleistung, die das Optimierungsmodell vorgibt, abhängig.

6.1 Szenarien der Optimierungsrechnungen

Referenzszenarien

Die Auswirkungen der Infrastruktureinbindung ins Modell können unter den Aspekten minimaler Kosten und der Reduktion der CO₂-Emissionen nur in Bezug auf die Vergangenheit (1989) und die „unbeeinflusste“ Zukunft (Trend) analysiert werden. Daher werden sowohl für die alten als auch die neuen Länder Referenzrechnungen für das Jahr 1989, die den Statistiken entsprechen, durchgeführt.

Trendszenarien

Im Trendszenario wird die Entwicklung des Verkehrssektors berechnet, die sich aus den prognostizierten Fahrleistungen ergibt, wenn sie sich unbeeinflusst, etwa von stark geänderten Kraftstoffpreisen oder CO₂-Reduktionsvorschriften, vollziehen kann. Die dazu notwendige Prognose stammt aus einem Gutachten der PROGNOSE AG ([Eckerle95]). Aus dieser Studie werden die Fahrleistungen der einzelnen Verkehrsträger entnommen bzw. berechnet und dem Optimierungsmodell als feste Größen vorgegeben. Die Benennung „Trend“ bezieht sich dabei auf den Verkehrssektor. Die Größen und Begrenzungen aller anderen Sektoren werden unverändert aus den vordefinierten Standardszenarien des IKARUS-Optimierungsmodells übernommen ([Markewitz98], S. 103).

Die Trendszenarien dienen in dieser Arbeit dem Vergleich von Energieverbrauch, Emissionen und Kosten mit den Basis- und Reduktionsszenarien. Die PROGNOSE-Studie und das IKARUS-Projekt schätzen die Entwicklung der Nachfrage nach Mobilität in etwa gleich ein. Durch die unterschiedlichen Annahmen in den Besetzungs- und Beladungszahlen resultieren aus der Nachfrage aber sehr unterschiedliche Fahrleistungen. Da hier ein Vergleich von Energie, Emissionen und Kosten, also von Größen, die mit Fahrleistungen verbunden sind, vorgenommen werden soll, werden nicht die Nachfragegrößen (Verkehrsleistungen), sondern die Fahrleistungen im Trendszenario übernommen.

Basisszenarien

Im Gegensatz zu den Trendszenarien folgen die Basisszenarien keiner Prognose, sondern werden mit minimalen Kosten berechnet. Die Ergebnisse entsprechen daher im Rahmen der Einschränkungen aus Kapitel 5.4.5 und 5.3.3 der Befriedigung der Nachfragen zu minimalen Kosten.

Reduktionsszenarien

Die Reduktionsszenarien ergeben ebenfalls im Rahmen der gesetzten Grenzen ein kostenminimales Resultat, sind aber zusätzlich durch die Forderung nach einer Minderung der CO₂-Emissionen eingeschränkt. Die CO₂-Emissionen sollen für das Jahr 2005 um mindestens 25 % gegenüber dem Jahr 1989 sinken. Da in der verwendeten Modellversion östliche und westliche Bundesländer (NBL und ABL; neue/alte Länder) für die Jahre 1989 und 2005 getrennt berechnet werden, muss die Reduktionsforderung auf diese beiden Gebiete aufgeteilt werden. Die Rechnung des Basisszenarios für 2005 in den neuen Ländern zeigt durch den Strukturumbruch bereits eine Verminderung von 50,6 % der CO₂-Emissionen. Daher muss zur Erfüllung des gesamten Reduktionsziels in den alten Bundesländern die Emission von CO₂ um 14,7 % bis zum Jahr 2005 vermindert werden. Der Datensatz des Jahres 2020 beinhaltet den Energiesektor für *ganz* Deutschland. Für dieses Stützjahr wird in dieser Arbeit eine Reduktion von 60 % der CO₂-Emissionen gegenüber 1989 gefordert². Diese Forderung kann durch den im Modell vorgesehenen Datenbestand außerhalb des Verkehrssektors nicht sinnvoll erfüllt werden, insbesondere müssen dann die politischen Randbedingungen (Kapitel 5.3.3, S. 76) überprüft werden. Sie eröffnet aber eine Möglichkeit, die Auswirkungen von hohen Reduktionsforderungen im Verkehrssektor zu analysieren.

Insgesamt ergeben sich also für das Stützjahr 1989 zwei (alte und neue Bundesländer), für 2005 sechs (Trend-, Basis- und Reduktionsszenario für NBL und ABL) und für 2020 drei Rechenläufe.

6.2 Ergebnisse der Optimierungsrechnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Rechnungen für die Szenarien analysiert. Dabei wird besonderes Augenmerk auf den Verkehrssektor gerichtet, der jedoch durch die Verknüpfungen im Optimierungsmodell nicht isoliert von den anderen Sektoren gesehen werden kann. Daher werden auch wichtige Ergebnisse aus den anderen Sektoren kurz dargestellt.

²Dieses Ziel wurde von der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ ([Bundestag91], S. 73) als klimapolitisch wünschenswert angesehen.

6.2.1 Ergebnisse der Trendszenarien

Die Rechnungen für die Trendszenarien werden für drei Fällen durchgeführt: Für das Jahr 2005 für die neuen und die alten Bundesländer und für das Jahr 2020 für das gesamte Bundesgebiet.

Die Fahrleistung im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) verringert sich nach den Rechnungen, die durch die Prognose bestimmt sind, vom Jahr 1989 bis zum Jahr 2005 und auch bis 2020. Dagegen steigt die Fahrleistung, die von Pkw im Nahverkehr erbracht wird, an. Nach der Statistik [Stat. Bundesamt98] für das Jahr 1997 kann dieser Trend nicht durchgängig bestätigt werden. Die Verkehrsleistungen im öffentlichen Nahverkehr wuchsen gegenüber 1989 um 54 % und damit stärker als die Pkw-Nahverkehrsleistung (+ 10 % gegenüber 1989).

Nach der Prognose für das Jahr 2005 vergrößert sich die Fahrleistung der Bahn im Personenfernverkehr um etwa 60 %, während die Fahrleistung der Pkw nur um gut ein Drittel zunimmt. In der Statistik für das Jahr 1997 [Stat. Bundesamt98] liegt die Verkehrsleistung im öffentlichen Personenfernverkehr auf gleichem Niveau wie im Jahr 1989, der Trend im Pkw-Verkehr kann bestätigt werden. In der Prognose für den Güterverkehr auf der Straße im Jahr 2005 verdreifacht sich die Fahrleistung im Nahverkehr und vervierfacht sich im Fernverkehr. Die Trends im Güterverkehr können anhand der Statistik für 1997 bestätigt werden. Die Angaben gelten jeweils für das ganze Bundesgebiet, einschließlich der neuen Länder.

Für die gesamte Energiewirtschaft liegen die Nachfragen im Trendszenario erheblich höher als im Jahr 1989. Dennoch steigt der Primärenergieeinsatz bis zum Jahr 2005 nur um etwa 5 % in den alten Ländern an. Für die neuen Länder liegt er im Jahr 2005 sogar um die Hälfte niedriger als 1989. Bis zum Jahr 2020 steigt der Primärenergieeinsatz für das ganze Bundesgebiet wieder leicht an. Abbildung 6.2 zeigt Primärenergieeinsatz, CO₂-Emissionen und Nachfragen in den unterschiedlichen Stützjahren und Regionen in relativen Einheiten (1989 $\hat{=}$ 100 %). Im Trendszenario gelingt es lediglich, die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 14 % gegenüber 1989 für ganz Deutschland zu senken. Bis zum Jahr 2020 können die CO₂-Emissionen allerdings noch einmal um weitere 15 % gesenkt werden. Bei anderen klimarelevanten Gasen ist der Rückgang der Emissionen wesentlich stärker, zum Beispiel bei NO_x um knapp 60 % bis zum Jahr 2020.

Es gelingt also in der Trendentwicklung nicht, das Reduktionsziel der Bundesregierung zu erreichen. Der Rückgang der CO₂-Emissionen resultiert aus der Umstrukturierung der östlichen Bundesländer. In den westlichen Ländern steigen dagegen die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 sogar an.

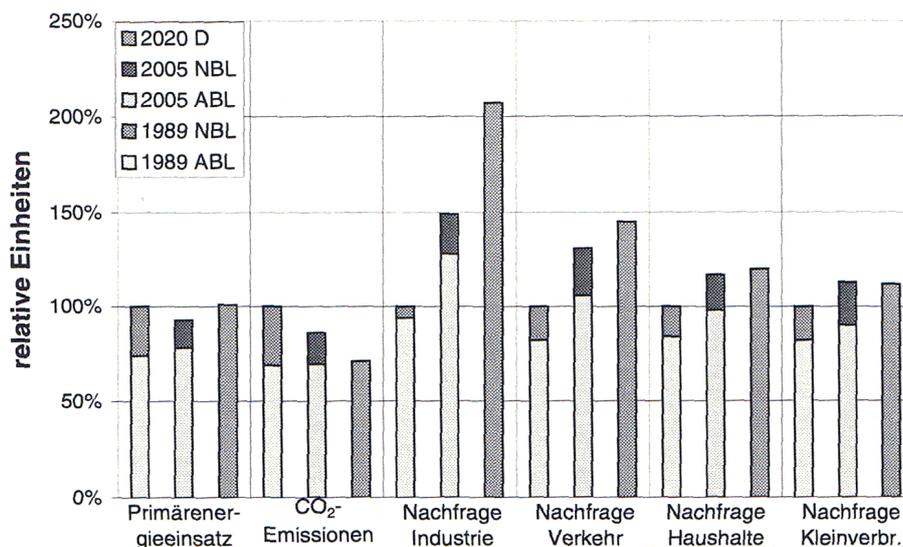


Abbildung 6.2: Optimierungsergebnis: Primärenergieeinsatz, CO₂-Emissionen und Nachfragen in den Jahren 1989, 2005 und 2020. (Relative Einheiten, 1989 $\hat{=}$ 100 %)

6.2.2 Ergebnisse der Basisszenarien

Im Gegensatz zu den Trendszenarien sind die Basisszenarien mit wenigen Einschränkungen im Verkehrssektor versehen. Die Grenzen (Kapitel 5.4.5) geben nicht die erwartete Realität wieder, sondern ergeben sich aus der heutigen Situation bei einer optimistisch eingeschätzten technischen Entwicklung zu konkurrenzfähigen Kosten. Wie im Trendszenario entsprechen auch hier die Nachfragen nach Energiedienstleistungen den in Kapitel 5.3.2 genannten.

Durch die wenigen Einschränkungen ergibt sich ein anderes Bild des Verkehrssektors im Vergleich zu den Trendszenarien. Zu den gesetzten Grenzen muss beachtet werden, dass das Wahlverhalten der Verkehrsteilnehmer bezüglich der Verkehrsmittel zwar durch die Grenzen abgebildet werden kann, deren Genauigkeit aber zweifelhaft und häufig von der Einschätzung des Benutzers abhängig ist. Daher gehen weder bei den Basis- noch bei den Reduktionsfällen (im folgenden Abschnitt) Zeit- oder Bequemlichkeitseffekte in die Überlegungen ein. Eine so starke Änderung des Verkehrssektors, wie sie durch die weit gezogenen Begrenzungen möglich ist, hat einen erheblichen Effekt auf die Industrieproduktion (Fahrzeugherstellung) und damit auf die Nachfrage der Industrie nach Energie. Diese Rückkopplung wird vom Modell nicht erfasst (s.a. Kapitel 2.3.3), so dass die Ergebnisse besonders hinsichtlich der Auswirkungen auf die gesamte Ökonomie vorsichtig interpretiert werden müssen. Trotz dieser Einschränkungen zeigen die Rechnungen zu den Basisszenarien, wie im Verkehrssektor Kosten minimiert werden können.

Allgemeine Ergebnisse

Die Basisfälle sind ohne Forderung der CO₂-Reduktion berechnet worden; dennoch ergeben sich durch Verbesserungen der Energieeffizienz in den Jahren 2005 und 2020 sinkende Primärenergieverbräuche und CO₂-Emissionen gegenüber dem Jahr 1989. Durch die gegenüber dem Trendszenario geänderte Struktur des Verkehrssektors ist der Primärenergieeinsatz im Jahr 2005 um 10 % (2020: 35 %) niedriger, die CO₂-Emissionen sind um 11 % (2020: 15 %) geringer. Relativ zum Jahr 1989 entspricht das bereits einer Verminderung dieser Emissionen um knapp 24 % (2005) bzw. 40 % (2020). Die Emissionsreduktionen beruhen vor allem auf der Änderung der Industriestruktur in den neuen Ländern und auf der Verminderung im Verkehrssektor, der sowohl gegenüber dem Jahr 1989 als auch gegenüber den Trendszenarien eine geänderte Struktur aufweist.

In den neuen Ländern werden bereits im Basisszenario gut die Hälfte der CO₂-Emissionen in Bezug auf 1989 reduziert, so dass im Folgenden für dieses Gebiet kein Reduktionsszenario berechnet wird.

Insgesamt sinkt nach den Basisrechnungen des Modells die Inlandsgewinnung von Energieträgern zwischen den Jahren 1989 und 2005 und bis 2020. Das betrifft in den alten Bundesländern die Steinkohleförderung und in den neuen Ländern die Braunkohleförderung. Als Ersatz steigt die Einfuhr von Erdgas und Steinkohle bis zum Jahr 2005 und auch bis 2020 erheblich an. Der Beitrag der regenerativen Energiequellen wird zwischen den Jahren 1989 und 2005 um 50 % und zwischen den Jahren 2005 und 2020 um 10 % gesteigert. Auch im Jahr 2020 liegt ihr Beitrag an der Primärenergie immer noch im Prozentbereich. Der Beitrag der Kernenergie an der Primärenergie sinkt auf 12 % bis zum Jahr 2005 und 4 % bis zum Jahr 2020 (1989: 11 %) (Abbildung 6.3).

Ergebnisse im Verkehrssektor

Wie schon vorher betont, sind die folgenden Ergebnisse im Verkehrssektor der Basisszenarien nicht als Prognose zu betrachten. Sie geben einen Hinweis auf mögliche Kosteneinsparungen und sind im Rahmen einer optimistischen Technikentwicklung (zum Beispiel Einsatz von Brennstoffzellen-Bussen bereits ab dem Jahr 1998 möglich) zu sehen. Ferner ist es durch die Struktur des Modell nicht möglich, zum Beispiel den geringeren Fahrzeugbedarf im Verkehrssektor mit einer zurückgehenden Nachfrage im Industriesektor zu koppeln.

Das Ergebnis für den Personennahverkehr basiert stärker als im Jahr 1989 auf dem Individualverkehr. Mit Bahnen und Bussen findet nur der Nahverkehr statt, der gebunden und daher durch Schranken auf eine Mindestmenge begrenzt ist. Die Pkw-Fahrleistung im Nahverkehr nimmt in diesem Szenario zwischen den Jahren 1989 und 2005 um etwa die Hälfte zu (Im Trendszenario: 26 %). Die Nahverkehrsstraßen haben insgesamt eine ausreichende Kapazität, um die Fahrleistung aufzunehmen. Das gilt allerdings nur, wenn man davon absieht, dass sich bereits

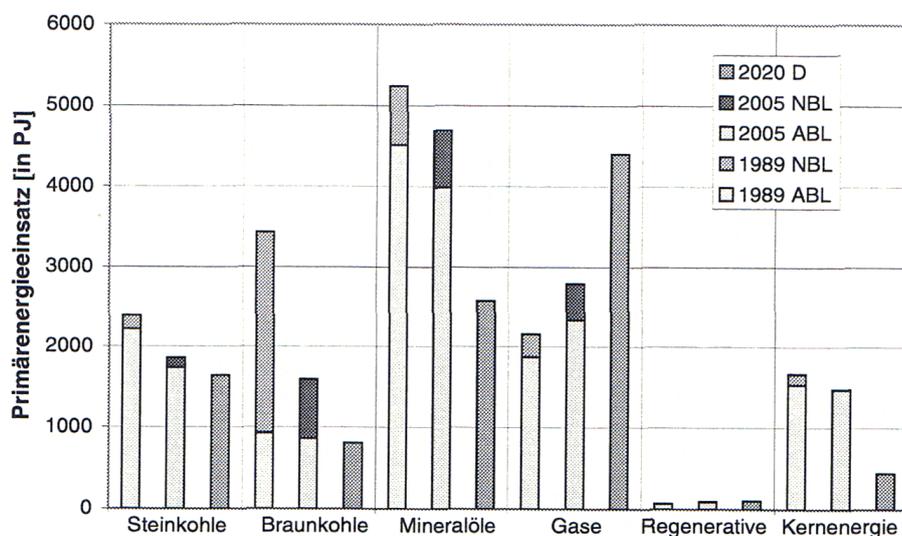


Abbildung 6.3: Optimierungsergebnis: Einsatz von Primärenergieträgern in den Basisszenarien der Jahre 1989, 2005 und 2020 für alle Bundesländer.

heute an Knotenpunkten in den Städten zur Hauptverkehrszeit häufig Staus bilden. Abbildung 6.4 zeigt die Entwicklung im Verkehrssektor; in der Abbildung wird auf eine Differenzierung zwischen alten und neuen Bundesländern verzichtet.

Im Personenfernverkehr wird im Gegensatz zum Nahverkehr die Bahn verstärkt eingesetzt. Ihr Einsatz ist lediglich durch die Infrastruktur gemeinsam mit dem Bahngüterverkehr einschränkt. Für dieses Ergebnis muss beachtet werden, dass eine hier nicht betrachtete Beschränkung durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Triebwagen entsteht. Sollte die zwischen 1989 und 2005 um das mehr als Dreifache steigende Fahrleistung im Personenfernverkehr realisiert werden, müsste die Deutsche Bahn AG unter Beachtung der Nah- und Güterverkehrsentwicklung die Anzahl der Triebwagen vervielfachen; sollte der Personenfernverkehr ausschließlich mit ICE-Zügen stattfinden, wäre eine Verzehnfachung der ICE-Triebwagen erforderlich. Mit Pkw und Bussen wird im Fernverkehr in diesem Szenario lediglich der gebundene Verkehr geleistet.

Im Güternahverkehr, für den im Modell ausschließlich Lkw vorgesehen sind, kommen alternative Antriebe zum Einsatz. Dort werden LPG-Lkw eingesetzt, bis die obere Grenze durch die maximal mögliche Erneuerung des Fahrzeugbestands erreicht ist. Obwohl die Fahrzeugkosten dieser Lkw etwas höher als bei Diesel-Lkw liegen, werden sie vom Modell bevorzugt, da der Kraftstoff LPG zu geringen modellinternen Kosten aus dem Raffineriesektor bezogen werden kann (s. Tabelle 6.1, S. 104). Der Anteil von LPG-Lkw an der Gesamtfahrleistung im Güternahverkehr liegt bei 44 %. Benzin-Lkw werden nur mit den Restbeständen im Jahr 2005 eingesetzt. Durch die Struktur des Modells kommt es zu einem geringfügigen Einsatz

von Methanol-Lkw im Nahbereich. Dieser Einsatz wird durch die Herstellung des Methanols aus Biogas bestimmt. Das Biogas wiederum ist in geringen Mengen kostengünstig verfügbar. Der weder von LPG-, noch von Methanol- oder Benzin-Lkw geleistete Güternahverkehr wird von Diesel-Fahrzeugen übernommen. Diese haben einen Fahrleistungsanteil von 40 %.

Im Güterfernverkehr wird soweit wie möglich das Binnenschiff eingesetzt. In Prognosen wird bis zum Jahr 2010 eine Verdopplung des Anteils der Binnenschifffahrt an der Leistung im Güterfernverkehr erwartet [Bundestag97b]. Die obere Grenze für die Binnenschifffahrt wird mit etwa 20 % der Güterfernverkehrsleistung ebenso großzügig wie auch die anderen Begrenzungen gesetzt. Der Einsatz der Bahn im Güterfernverkehr wird durch die Schienenkapazität, die nicht vom Personenfernverkehr benötigt wird, bestimmt. Der gesamte Bahnfernverkehr wird also durch die Infrastruktur inklusive ihrem Ausbau begrenzt. Der verbleibende Güterfernverkehr findet auf der Straße statt. Dort wird, soweit dies die entsprechende Grenze zulässt, der Diesel-Spar-Lkw eingesetzt. Diese Technik ist teurer als die konventionellen Dieselfahrzeuge, senkt aber den Verbrauch erheblich. In Abbildung 6.4 ist die Aufteilung der Verkehrsleistungen auf die Verkehrsträger dargestellt.

Der Zuwachs der Bahn ist, wie das Infrastrukturmodell zeigt, durch die Kapazität der Infrastruktur begrenzt, besonders durch den Korridor 6 von Trier / Koblenz über Frankfurt und Nürnberg in Richtung Passau und Tschechische Grenze. In diesem Korridor wird nach der hier vorgenommenen geographischen Aufteilung der Verkehr erheblich anwachsen, so dass sämtliche mögliche Ausbauoptionen in Anspruch genommen werden. Zusätzlich wurden Rechnungen durchgeführt, bei denen Anteile (10 bis 25 %) des Verkehrs aus dem Korridor 6 in die Nachbarkorridore 4 und 8 verlegt wurden. Dennoch erschöpft das Wachstum des Bahnfernverkehrs die Kapazität der Infrastruktur.

Bei der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere für das Stützjahr 2020 ist zu bedenken, dass bei der Begrenzung alternativer Techniken von einem Einsatz ab 1998 bzw. ab 2003 (siehe Seite 86) ausgegangen wird. Wenn die Rechnungen zu den Stützjahren 2005 und 2020 aufeinander aufbauen würden, müsste eine Technik, die im Jahr 2020 in hohem Maße eingesetzt wird, auch bereits im Jahr 2005 eingesetzt werden. Eine solche Interpretation ist nicht möglich, da die Rechnungen für die Stützjahre unabhängig voneinander erfolgen. Es kann dazu kommen, dass ein Ergebnis für das Jahr 2005 dem für 2020 zunächst widerspricht. Daher ist eher die Interpretation sinnvoll, dass die Lösung für 2005 als kurzfristige Zielsetzung, die für 2020 als langfristige Perspektive anzusehen ist.

Auch nach der Basisrechnung für das Jahr 2020 werden, wie im Jahr 2005, die öffentlichen Nahverkehrsmittel nur für den gebundenen Verkehr eingesetzt. Im Personenfernverkehr werden Pkw mit der geringstmöglichen Verkehrsleistung eingesetzt. Das Gros der Verkehrsleistung findet auf der Schiene und zum Teil

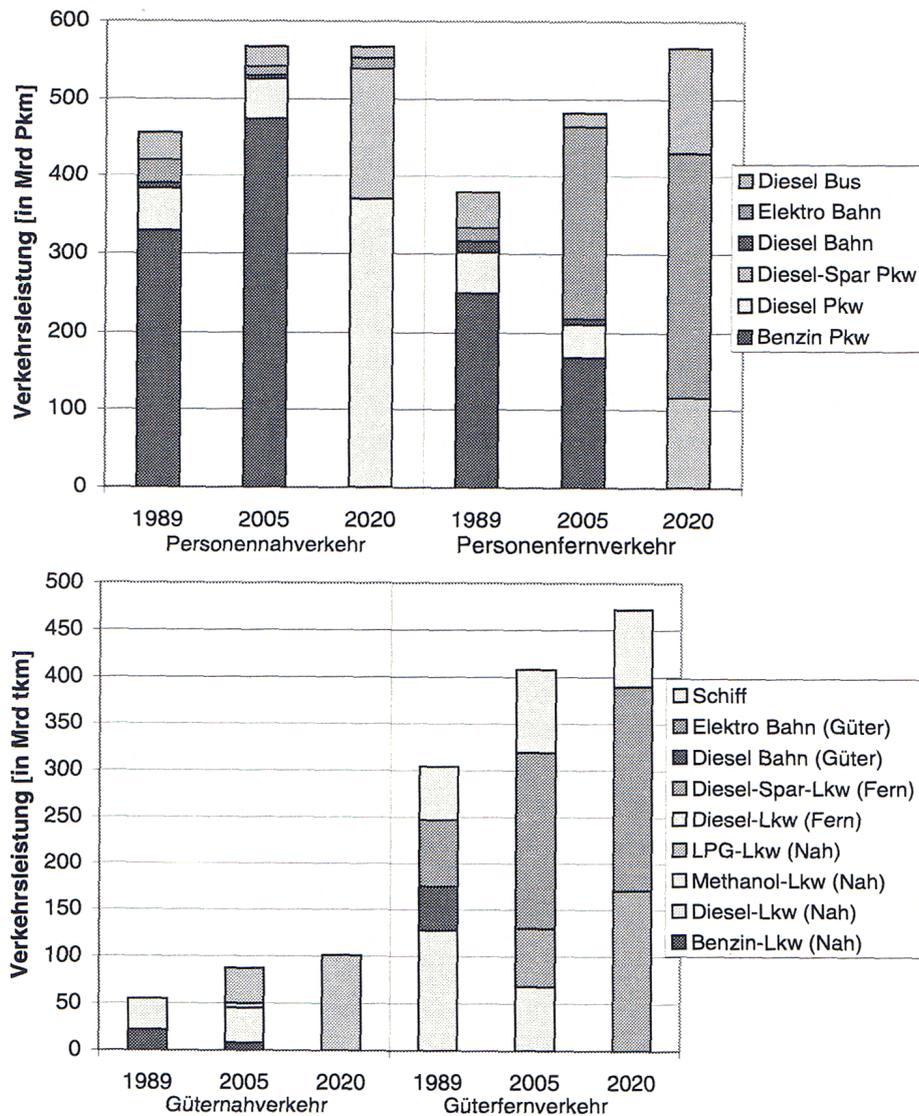


Abbildung 6.4: Optimierungsergebnis: Verkehrstechniken in den Basisszenarien. (1989, 2005 und 2020; Personennahverkehr: oben links; Personenfernverkehr: oben rechts; Güternahverkehr: unten links; Güterfernverkehr: unten rechts.)

mit Fernbussen statt.

Der Güterfernverkehr weist die gleiche Struktur wie im Jahr 2005 auf. Das heißt, bevorzugt wird der Transport durch Binnenschiff und Bahn. Die Transporte, die auf Grund der Beschränkung der Kapazität der Infrastruktur nicht auf der Schiene stattfinden können, werden per Lkw durchgeführt.

Alternative Antriebe werden im Jahr 2020 (Abbildung 6.4) häufiger als im Jahr 2005 eingesetzt. Im Personenfernverkehr wird für die Busse ausschließlich der Rapsöl-Antrieb gewählt, für die Pkw kommt das Diesel-Spar-Fahrzeug zum Einsatz. Dies wirkt sich durch die Kopplung von Nah- und Fernverkehr der Pkw (Kapitel 5.4.5, S. 82) auch auf den Pkw-Nahverkehr aus, indem dort ebenfalls Diesel-Sparfahrzeuge genutzt werden. Im Güternahverkehr wird der LPG-Lkw und im Straßengüterfernverkehr der Diesel-Spar-Lkw vom Modell eingesetzt. Der im Jahr 2020 erheblich höhere modellinterne Dieselpreis (30 % höher als im Jahr 2005) verursacht den Vorzug der Spartechnologien.

Ergebnisse Emissionen

Die gesamte Reduktion der CO₂-Emissionen um etwa 24 % im Basisszenario bis zum Jahr 2005 in Bezug auf die Emissionen des Jahres 1989 setzt sich aus folgenden Beiträgen in den Sektoren zusammen:

Durch die oben beschriebenen Änderungen sinken besonders die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor (-12 %). Auch in der Industrie und bei den Kleinverbrauchern werden vor allem in den östlichen Bundesländern durch den Strukturumbruch erhebliche Reduktionen erreicht (-33 % in der Industrie, -30 % bei den Kleinverbrauchern). Dieser Strukturumbruch, aber auch die Effizienzverbesserung und der oben genannte Brennstoffwechsel von Kohle zu Gas führen im Umwandlungsbereich zu einer Reduktion von 22 % der CO₂-Emissionen des Jahres 1989 (Abbildung 6.5).

Auch bei den anderen vom Optimierungsmodell bilanzierten klimarelevanten Gasemissionen³ werden Reduktionen von mindestens einem Drittel der Emissionen von 1989 erreicht. Dies ist vor allem durch den umstrukturierten Verkehrssektor bedingt, da der Verkehrssektor bei den Nicht-CO₂-Klimagasen einen höheren Anteil an den Emissionen hat als beim CO₂. Die Reduktion im Verkehrssektor beträgt zum Beispiel bei NO_x etwa zwei Drittel und bei SO₂ 97 % der Emissionen des Jahres 1989.

Im Vergleich zum Trendszenario übernimmt die Bahn im Fernverkehr einen großen Teil der Verkehrsleistung. Daher wird im Verkehrssektor im Basisszenario nur etwa die Hälfte der CO₂-Menge des Trendszenarios emittiert.

Im Basisfall für das Stützjahr 2020 ist die Energiewirtschaft auch ohne Re-

³NO_x, SO₂, CH₄, KWS und CO

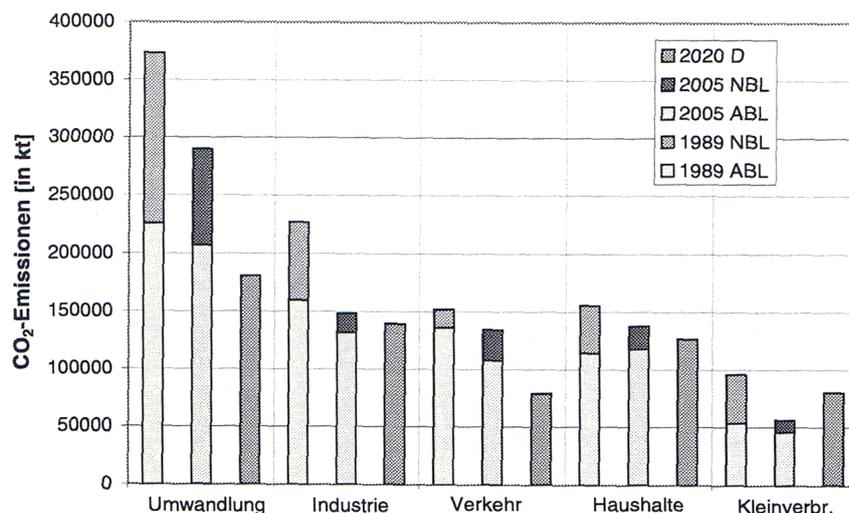


Abbildung 6.5: Optimierungsergebnis: CO₂-Emissionen der Sektoren in den Basisszenarien (1989, 2005 und 2020).

duktionsanforderung nach der Modellrechnung in der Lage, die CO₂-Emissionen bezüglich 1989 um 40 % zu vermindern. Diese Reduktion wird vor allem im Verkehrssektor erreicht, wobei die oben genannten Einschränkungen bezüglich der Realitätsnähe der Ergebnisse gelten. Durch die oben genannten (S. 94) Änderungen im Verkehrssektor des Jahres 2020 können gegenüber dem Jahr 2005 Verminderungen von einem Drittel der CO₂-Emissionen in diesem Sektor erreicht werden.

Insgesamt sind nach den Modellergebnissen also besonders im Verkehrssektor die Ziele Kostenminimierung und Reduktion der CO₂-Emissionen zunächst miteinander vereinbar. Erst eine weitere Reduktionsforderung verursacht zusätzliche Kosten, wie im folgenden Absatz gezeigt wird.

6.2.3 Ergebnisse der Reduktionsszenarien

In den Reduktionsszenarien wird zusätzlich zu den Annahmen der Basisszenarien eine Reduktion der Kohlendioxidemissionen gefordert. Für das Stützjahr 2005 werden keine Reduktionsrechnungen für die neuen Bundesländer durchgeführt, da dort schon im Basisszenario mehr als 50 % der CO₂-Emissionen des Jahres 1989 reduziert werden. Daher muss in den alten Ländern bis 2005 der Kohlendioxidausstoß nur um 14 % vermindert werden, um insgesamt die geforderte Reduktion von 25 % zu erreichen.

Für das Jahr 2020 wird für das ganze Bundesgebiet eine Reduktion von 60 %

der CO₂-Emissionen des Jahres 1989 gefordert. Eine solche Reduktion ist zwar sehr hoch, dennoch wird hier eine entsprechende Rechnung durchgeführt, da schon im Basisszenario etwa 40 % vermindert werden und die Reaktion im Verkehrssektor auf eine weitere Reduktionsforderung untersucht werden soll. Wenn der Verkehrssektor enger begrenzt ist, als es in den Rechnungen in dieser Arbeit der Fall ist, ist die Berechnung einer Reduktion von diesem Ausmaß nicht möglich, da der Datensatz für eine derartige Entwicklung alternative Techniken nicht im ausreichenden Maß berücksichtigt. Hinterfragt werden müssen in einer solchen Reduktionsrechnung vor allem die energiepolitischen Vorgaben (s. Abschnitt 5.3.3) und die Nachfragen (s. Abschnitt 5.3.2). Zusätzlich würde mit großer Wahrscheinlichkeit die Entwicklung von alternativen Techniken forciert, die im Modell nicht oder nicht zu den mit beschleunigter Entwicklung möglichen Kosten zur Verfügung stehen. Diese Rechnung wird durchgeführt, um die Reaktion des Verkehrssektors auf zusätzliche Reduktionsvorgaben im Jahr 2020 einschätzen zu können.

Der Vergleich der Reduktionsszenarien wird mit den Basisszenarien durchgeführt, da die Analyse ergeben soll, welche Maßnahmen zusätzlich zur ohnehin kostengünstigsten Entwicklung ergriffen werden müssen, um die Reduktion von CO₂-Emissionen zu erreichen.

Allgemeine Ergebnisse

Trotz fast gleichbleibender Stromproduktion sinkt der Primärenergieeinsatz im Umwandlungssektor im Reduktionsszenario im Vergleich zum Basisszenario des Jahres 2005. Erreicht wird dies durch Effizienzsteigerungen, vor allem aber durch den Ersatz der Steinkohle durch Erdgas in der Stromproduktion. Zusätzlich ersetzt Erdgas im Raumwärmesektor Mineralölprodukte und im Sektor Kleinverbraucher Steinkohle.

CO₂-Emissionen werden vor allem im Umwandlungsbereich reduziert. Sie werden in diesem Sektor in den alten Ländern von 1989 bis zum Jahr 2005 um 13 % verringert. Das entspricht einem Anteil von 36 % an der gesamten Reduktionsforderung und ist damit der größte Beitrag eines einzelnen Sektors. Im Vergleich zum Basisszenario des Jahres 2005 sinken die CO₂-Emissionen im Umwandlungs- und Haushaltssektor; der Verkehrssektor trägt nicht zu einer über das Basisszenario hinausgehenden Senkung bei (Abbildung 6.6).

Im Vergleich mit dem Basisszenario des Jahres 2005 sinken die Emissionen aller anderen Klimagase nur geringfügig (etwa 1 %). Die SO₂-Emissionen bilden dabei eine Ausnahme; durch den Wechsel von Steinkohle zu Erdgas werden sie gegenüber dem Basisszenario um 13 % vermindert.

Auf eine Interpretation der allgemeinen Ergebnisse der Reduktionsforderung zum Jahr 2020 von 60 % der CO₂-Emissionen von 1989 wird hier aus oben angeführten Gründen verzichtet. Diese Reduktionsrechnung ist mit den vorhandenen Datensätzen nur eingeschränkt gültig.

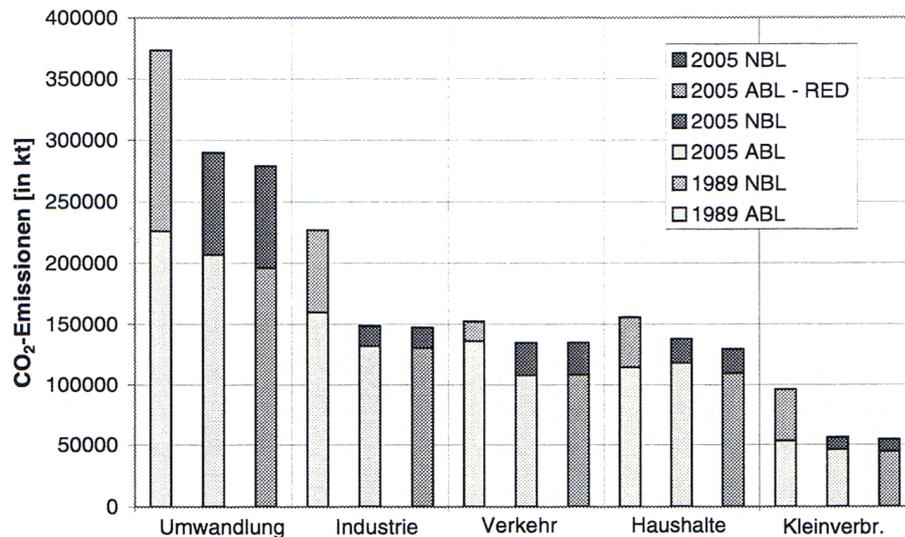


Abbildung 6.6: Optimierungsergebnis: CO₂-Emissionen der Sektoren im Reduktionsszenario für die Jahre 1989 und 2005. Reduktionen sind im Umwandlungs- und im Haushaltssektor erkennbar.

Ergebnisse im Verkehrssektor

Im Stützjahr 2005: Im Verkehrssektor ergibt die Reduktionsforderung bis zum Jahr 2005 keine Änderung gegenüber dem Basisszenario im Modal Split⁴, lediglich bei den Güternahverkehrstechniken kommt es zu einer Änderung. In diesem Bereich wird die geringe Fahrleistung der Methanol-Fahrzeuge aus dem Basisszenario von Dieselfahrzeugen im Reduktionsszenario erbracht. In der vorliegenden Datenbank ist die Herstellung von Methanol mit erheblichen Emissionen verbunden, so dass durch den Verzicht auf dieses Methanol zwar im Verkehrssektor mehr, insgesamt aber weniger Emissionen entstehen.

Im Stützjahr 2020: Die Nachfrage im Verkehrssektor steigt zwischen 1989 und 2020 um 61 % im Güterverkehr (bis zum Jahr 2005 um 40 %) und um 38 % im Personenverkehr (bis 2005: 28 %) (s. Tabelle 5.1, S. 75). Etwa 12 % der geforderten Reduktion des Jahres 2020 werden im Verkehrssektor erbracht. Da schon im Basisfall der Modal Split durch den Einsatz der Bahn sehr emissionsarm (im Vergleich zum Trendszenario) ist, kann die weitere Reduktion nur durch den Einsatz neuer Techniken erbracht werden, während der Modal Split nicht verändert wird. Neben Spartechniken im Pkw-Verkehr werden Ethanol-Antriebe eingesetzt. Diese entsprechen in der Auslegung den Methanol-Fahrzeugen, wer-

⁴Aufteilung der Verkehrsleistung auf die verschiedenen Verkehrsträger

den jedoch mit Ethanol aus nachwachsenden Rohstoffen betrieben. Daher sind die Emissionen durch die Verbrennung CO₂-neutral. Ethanol-Antriebe werden bei Nahverkehrsbussen und Nahverkehrs-Pkw eingesetzt. Fernbusse werden mit Rapsöl betrieben, welches ebenfalls CO₂-neutral verbrennt. Für den Güternahverkehr werden wie im Basisszenario LPG-Lkw eingesetzt. Bemerkenswert ist, dass durch die hohe Reduktionsforderung für Lkw im Güterfernverkehr Wasserstoffantriebe vorgeschlagen werden, die eine sehr teure Technik darstellen. Der Wasserstoff wird zu einem Preis von 50 DM/GJ (16 % der Importmenge) bzw. 69 DM/GJ (84 %) importiert⁵.

Kosten der Reduktion der CO₂-Emissionen

Die Kosten, die für die Reduktion der CO₂-Emissionen aufgewendet werden müssen, können als Kostendifferenzen der Reduktionsszenarien zu den Basisszenarien pro reduzierte CO₂-Menge dargestellt werden. Anders ausgedrückt, handelt es sich um die emissionspezifische Differenz der Zielfunktion. Dadurch erhält man die Kosten je reduzierter Menge CO₂.

Dagegen bezeichnen die Grenzkosten die Kosten, die entstehen würden, wenn weitere CO₂-Emissionen vermieden werden sollten. Sie geben also im Vergleich zu den durchschnittlichen Kosten ein Maß für die Steigerung der Reduktionskosten. Abbildung 6.8 zeigt die Kosten für die verschiedenen Stützjahre. Zum Vergleich: Die Energiemenge, die 1 t CO₂-Emission durch Pkw-Verkehr verursacht, kostet im Modell (also ohne Steuern) etwa 150 DM (im Jahr 2005).

Die Kosten der Reduzierung sind in dieser Berechnung wesentlich geringer als in vergleichbaren Literaturangaben. Für das Jahr 2005 betragen die Durchschnittskosten etwa 25 DM/t CO₂ und die Grenzkosten 50 DM/t CO₂, da nur wenige Maßnahmen zusätzlich zu denen des Basisszenarios ergriffen werden müssen. Es wird in diesen Rechnungen deutlich, dass der kostenminimale Verkehrssektor des Basisszenarios schon eine erhebliche Reduktion ermöglicht, so dass nur geringe zusätzliche Maßnahmen notwendig sind und daher auch die zusätzlichen Kosten gering sind.

Im kostenminimalen Verkehrssektor findet im Vergleich zum Trend eine umfangreiche Verlagerung zum Schienenverkehr statt. Dadurch werden zusätzlich zu den Kosten auch Emissionen reduziert, das bedeutet, im Vergleich zum Trend-szenario des Jahres 2005 können je Kilogramm verringerter CO₂-Emissionen etwa 3,14 DM/kg CO₂ eingespart werden. Letztendlich ist eine solch starke Umstrukturierung mit einem zweifachen „Gewinn“ – bei Emissionen und durch geringere Kosten – verbunden. Allerdings müssen die Folgen für die Wirtschaft bedacht werden, diese Rückkopplung ist in den Rechnungen nicht enthalten.

⁵Zum Vergleich: Der Rohölimportpreis beträgt nach der Annahme im Modell 9,37 DM/GJ

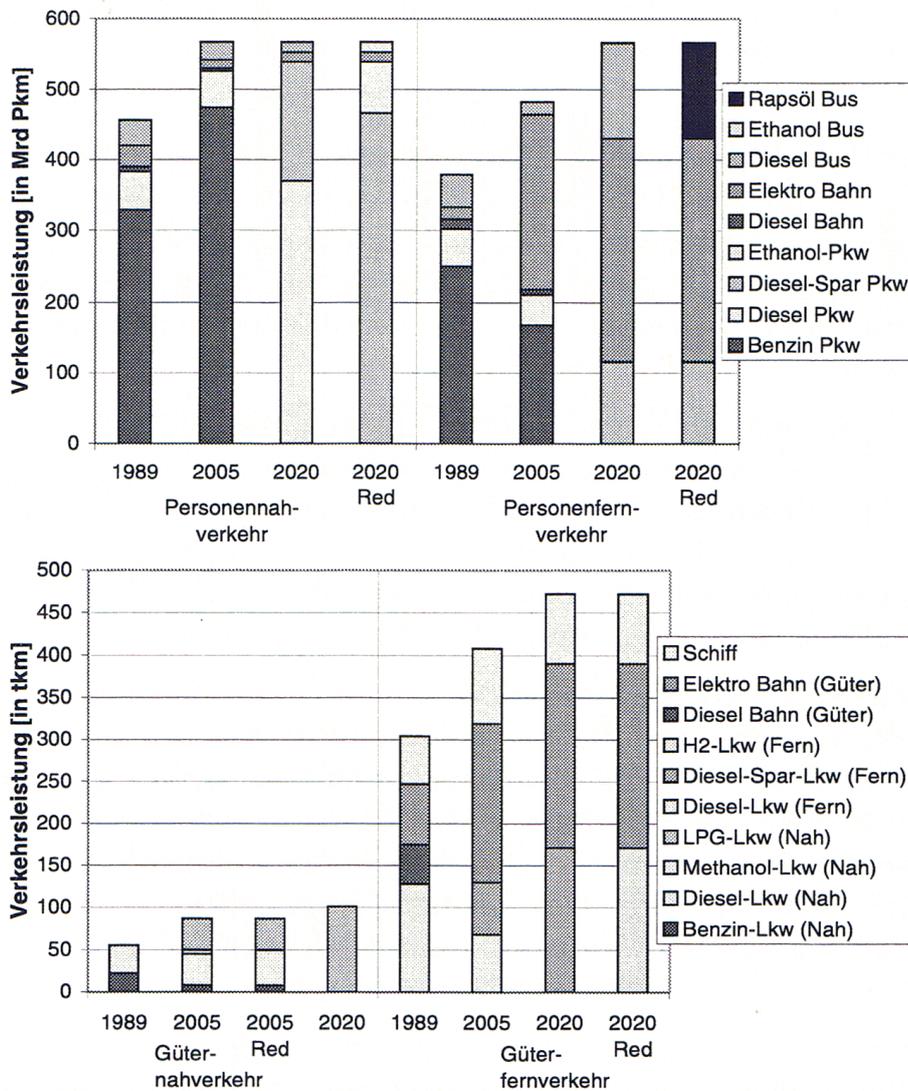


Abbildung 6.7: Optimierungsergebnis: Änderungen im Verkehrssektor durch die Reduktionsforderungen für 2005 und 2020 für alle Bundesländer. Im Vergleich zu Abbildung 6.4 sind zusätzlich die Reduktionsrechnungen enthalten; es werden nur die Reduktionsrechnungen aufgeführt („RED“), bei denen eine Veränderung zum Basisszenario feststellbar ist.

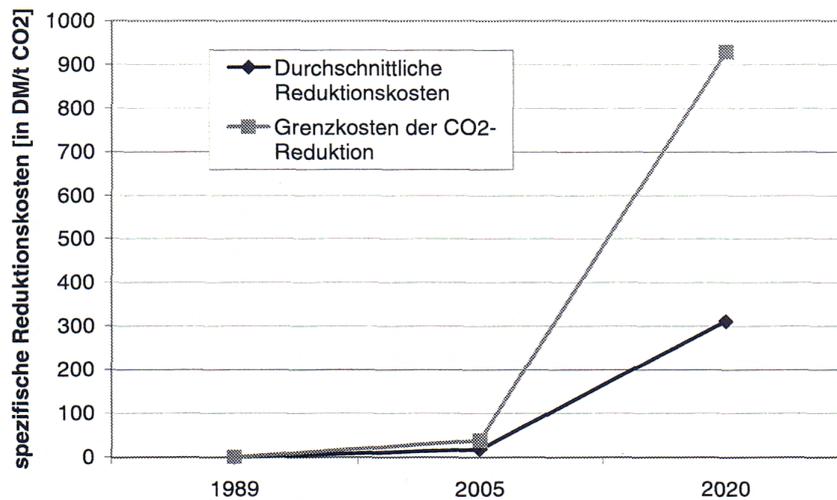


Abbildung 6.8: Optimierungsergebnis: Spezifische Kosten und Grenzkosten der CO₂-Reduktion.

6.2.4 Kostenanteile im Verkehrssektor

Durch die Minimierung der Gesamtkosten wird die Auswahl von Techniken im Modell durch ihre jeweiligen Kosten bestimmt. Neben den Kosten, die den Techniken direkt zugeordnet werden können, treten im Verkehrssektor noch Energie- und Infrastrukturkosten auf. Sie werden vom Modell nicht direkt ausgewiesen, sondern werden als sogenannte „Schattenpreise“ zugerechnet.

Die Kosten, die das Ergebnis im Verkehrssektor bestimmen, sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Dabei ist zu beachten, dass weder Steuern noch Kosten von Verwaltungen und Nebenanlagen berücksichtigt sind. Ersteres ist für die Kosten der Pkw und Lkw und letzteres für die Kosten der Bahn bedeutsam. Daher sind die hier ausgewiesenen Kosten der Bahn etwa halb so hoch wie der Fahrpreis im Fernverkehr. Bei Beachtung aller Kosten der Bahn würden sich die spezifischen Kosten der Straßen- und Schienenverkehrsträger zwar angleichen, jedoch bliebe die Bahn im Fernverkehr das kostengünstigere Verkehrsmittel.

Die spezifischen Kosten des Bahneinsatzes sind im Nahverkehr erheblich höher als im Fernverkehr. Die niedrige Auslastung im Nahverkehr der Bahn bewirkt hohe spezifische Kosten. Auch die Kosten für das nicht oder nur geringfügig genutzte Nahverkehrsnetz sind hoch und bewirken den mit über 60 % sehr hohen Anteil der Infrastrukturkosten. Wie bei einigen anderen Techniken⁶, wurden die Daten der Bahnen im Personennahverkehr überarbeitet (s. Kapitel 5.4, S. 77), so dass nicht die Standarddatenbank des Optimierungsmodells genutzt wurde.

⁶Lkw im Nahverkehr, alternative Techniken und die Bahn im Personenfernverkehr

Tabelle 6.1: Gesamtkosten der Fahrzeuge im Optimierungsergebnis für die westlichen Länder im Basisszenario des Jahres 2005 mit den Anteilen von Energie- und Infrastrukturkosten. Steuern sind nicht berücksichtigt.

	Fahrzeug	Gesamtkosten [DM/100Pkm]	Anteile		
			Energie	Infrastr.	Betriebs- und Herstellk. Fahrzeug
			[%]	[%]	[%]
Personen- nahverkehr	Benzin Pkw	35,78	6,0	8,6	85,4
	Diesel Pkw	43,07	3,7	11,8	84,5
	Dieselbus	42,19	1,6	5,3	93,1
	Bahn Elektro	85,05	1,6	61,7	36,7
	Bahn Diesel	144,36	1,2	44,0	54,8
Personen- fernverkehr	Bahn Elektro	13,43	2,0	65,5	32,4
	Bahn Diesel	46,56	0,4	85,6	14,0
	Dieselbus	28,64	1,1	4,4	94,5
	Benzin Pkw	31,52	5,6	12,0	82,4
	Diesel Pkw	32,14	4,1	11,6	84,3
	Flugzeug	130,34	4,,	n.v.	95,6
		[DM/100tkm]	[%]	[%]	[%]
Güternah- verkehr	Diesel Lkw	33,19	1,7	12,6	85,7
	Methanol-Lkw	33,42	1,4	12,6	86,0
	LPG-Lkw	33,42	1,0	12,6	86,3
	Benzin Lkw	56,29	1,0	7,1	91,9
Güterfern- verkehr	Schiff	1,18	38,5	n.v.	61,5
	Elektro Bahn	9,64	1,7	64,5	33,8
	Diesel Lkw	26,26	3,6	31,5	64,9
	Diesel-Spar Lkw	26,18	3,1	31,6	65,3

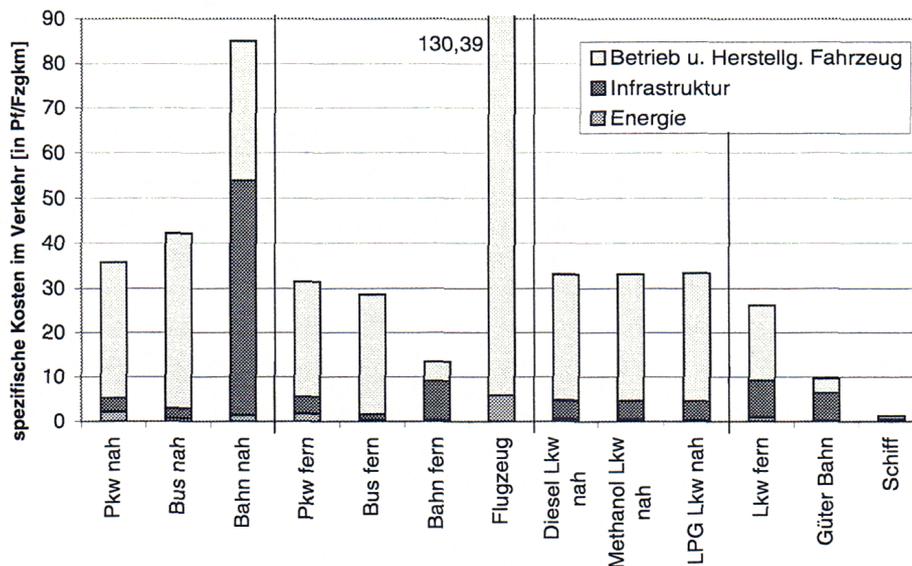


Abbildung 6.9: Optimierungsergebnis: Transportkosten mit ausgewählten Fahrzeugen für das Jahr 2005 mit den Anteilen von Energie- und Infrastrukturkosten. Steuern sind nicht berücksichtigt.

In den verwendeten Daten der Beispieltechnik für Bahnen des Nahverkehrs sind nur die Nahverkehrszüge der Deutschen Bahn AG berücksichtigt, die Ergebnisse können also nicht auf Straßen- und U-Bahnen übertragen werden. Die in diesem Abschnitt genannten Kosten erlauben daher auch lediglich Aussagen zum Nahverkehr der Bahn.

Die Pkw-Kosten sind im Nah- und Fernverkehr in etwa ähnlich (Abbildung 6.9) und werden zu einem geringfügig höheren Anteil als bei der Bahn von den Energiekosten bestimmt (ca. 5 %). Sie sind etwa doppelt so hoch wie die Kosten der Bahn im Fernverkehr. Im Nahverkehr betragen sie etwa die Hälfte der spezifischen Bahnkosten.

Auch im Güterfernverkehr sind die Kosten der Bahn sehr gering, hier macht sich unter anderem der in den Daten für diese Arbeit angesetzte, geringe direkte Personalaufwand für den Güterverkehr und die hohe Beladungszahl bemerkbar. Die Kosten für Lkw-Transporte im Güterfernverkehr sind nach dieser Rechnung etwa dreifach höher als bei der Bahn. Dennoch muss bedacht werden, dass hier die reinen Bahnkosten, also ohne Vor- und Nachlauf und Umladekosten berechnet sind. Diese Kosten und die Kosten für Zeitverluste und mangelnde Flexibilität werden vom Modell nicht berücksichtigt.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss neben der schon genannten unvollständigen Einbeziehung der Kosten beachtet werden, dass diese Rechnung *nicht*

einen Wechsel von Individual- zu öffentlichem Fernverkehr *vorhersagt*. Rechnet man nur die oft beim Pkw in Betracht gezogenen variablen Kosten und Energiekosten, so erhält man nach den hier verwendeten Daten Kosten von etwa 14 DM/100 km (inklusive Mineralölsteuer) für den Fernverkehr. Die realen durchschnittlichen Bahnpreise im Fernverkehr liegen in einem vergleichbaren Bereich⁷. Daher bleibt es für die Deutsche Bahn AG ohne Änderung zum Beispiel in der Besteuerung der Kraftstoffe schwierig, einen größeren Anteil am Personenfernverkehr zu erringen.

Der Anteil der Infrastrukturkosten ist bei den Bahnen sehr hoch, dennoch ändert er durch die Höhe der Gesamtkosten des Bahneinsatzes die Auswahl der Verkehrsmittel durch das Modell nicht. Auch im Straßengüterfernverkehr ist der Anteil der Infrastrukturkosten mit einem Drittel sehr hoch, da durch die Gewichtung (Kapitel 5.1.2, S. 70) mit Achslasten die Kosten für Straßen zu einem großen Teil den Lkw zugeschrieben werden.

6.2.5 Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse

Die Entwicklung der Energiewirtschaft ist nach den Annahmen im IKARUS-Projekt von erheblich steigenden Nachfragen nach Energiedienstleistungen gekennzeichnet. Vor diesem Hintergrund werden die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen im Folgenden zusammengefasst:

- In den **Trendszenarien** ändert sich der Primärenergieeinsatz zwischen den Jahren 1989 und 2005 und den Jahren 2005 und 2020 nicht wesentlich. Dagegen können vor allem durch den mit dem Strukturwandel in den neuen Bundesländern verbundenen Brennstoffwechsel die CO₂-Emissionen gesenkt werden. Zur Verkehrsleistung im Personennahverkehr wird der öffentliche Verkehr sowohl im Jahr 2005 als auch 2020 weniger als im Jahr 1989 beitragen. Die allgemein erheblich anwachsende Verkehrsleistung wird vor allem durch Pkw und Lkw erbracht.
- Die **Basisszenarien** sind gegenüber den Trendszenarien durch sinkende Primärenergieeinsätze und stärker sinkende CO₂-Emissionen gekennzeichnet. Wie auch im Trend sinkt der Anteil der vom öffentlichen Personennahverkehr erbrachten Verkehrsleistung zugunsten des Pkw-Nahverkehrs. Im Fernverkehr findet sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr eine Verlagerung auf die Bahn statt. Nicht-konventionelle Antriebe werden in geringem Maße eingesetzt.
- Die Verminderung der CO₂-Emission in den **Reduktionsszenarien** wird im Vergleich zu den Basisszenarien durch verstärkten Einsatz von Erdgas in

⁷Dieser beträgt durch Gruppenangebote, Rabatte und Bahncards etwa die Hälfte des Tarifpreises, also etwa 15 Pf/km

Umwandlung, Raumwärme und Kleinverbrauch erreicht. Im Verkehrssektor werden zusätzlich zur Verlagerung in den Basisszenarien vermehrt nicht-konventionelle Antriebe eingesetzt.

- Bei den **Fahrzeugkosten** spielen die Energiekosten keine wesentliche Rolle. Einen erheblichen Anteil an den spezifischen Transportkosten hat die Infrastruktur bei der Bahn und bei den Lkw im Fernverkehr, ohne jedoch das Optimierungsergebnis zu verändern.

6.3 Sensitivitätsuntersuchung

Eine Sensitivitätsanalyse untersucht Auswirkungen auf das Ergebnis einer Modellrechnung bei Änderung des Modells oder der Parameter. Da die Aufgabe dieser Arbeit in der Einbindung von neuen Technikdaten und nicht in der Änderung der Modellstruktur lag, wird die Sensitivität nur auf Parametervariationen des Verkehrssektors getestet.

Die möglichen Konsequenzen einer solchen Analyse für ein Optimierungsmodell nach der linearen Programmierung sind:

- eine unveränderte Lösung;
- eine Lösung mit den gleichen Variablen, aber geänderten Werten;
- eine neue Lösung mit anderen Variablen;
- die Unlösbarkeit des Modells.

Parameter, die im IKARUS-Optimierungsmodell Einfluss auf die Lösung innerhalb der gesetzten Grenzen haben, sind vor allem die Kosten und die mit den Kosten indirekt verbundenen Größen. Die Auswirkung der Variation der entsprechenden Parameter wird im Folgenden untersucht. Die Auswirkung einer Änderung der Grenzen wird nicht untersucht. Das Ergebnis einer solchen Änderung wäre in jedem Fall entweder ein verstärkter Einsatz der vorher begrenzten Variable oder keine Änderung der Lösung. Dabei ist letzteres der Fall, wenn die Schranke bei der Lösung keine Rolle spielt. Daher können aus einer solchen Untersuchung keine weiteren Schlüsse gezogen werden.

Wie schon in Kapitel 2.3.1 bemerkt, wählt ein Modell nach der linearen Programmierung von zwei Möglichkeiten, die dieselbe Nachfrage befriedigen, die kostengünstigere in einem Maß, das von den Beschränkungen vorgegeben wird. Das heißt, die folgende Sensitivitätsanalyse untersucht, welcher Faktor bewirkt, dass die kostengünstigste Technik teurer als eine andere Technik wird, die dann vom Modell als Lösung gewählt wird. Die Aussagen in diesem Abschnitt sind also so

zu verstehen, dass die genannte Variation die als Beispiel gewählte Technik teurer (oder günstiger) macht als diejenige, die dann gewählt (oder nicht mehr gewählt) wird.

Bei einer Rechnung ohne jede Beschränkung im Verkehrssektor würde die Lösung im Personennahverkehr aus Benzin-Pkw, im Personenfernverkehr aus Elektrischer Bahn, im Güternahverkehr aus LPG-Lkw und im Güterfernverkehr aus Binnenschiffen bestehen. Beschränkungen wirken zunächst auf die Verfügbarkeit von LPG, so dass im Güternahverkehr als weitere Technik der Diesel-Lkw gewählt wird. Durch die Begrenzung des Einsatzes des Binnenschiffes im Güterfernverkehr kommt die Bahn mit Elektroantrieb für den Güterfernverkehr zum Einsatz. Der Güter- und Personenfernverkehr der Bahn wird durch die Infrastruktur begrenzt, so dass im Personenfernverkehr zusätzlich Busse und im Güterfernverkehr Lkw eingesetzt werden. Weitere Einschränkungen erzwingen einen Mindesteinsatz (gebundener Verkehr) von Verkehrsmitteln und begrenzen die maximale Verfügbarkeit der Techniken (s. Kapitel 5.4.5).

Die Sensitivitäten im Folgenden lassen nur eine Aussage innerhalb dieser Grenzen zu. Das heißt, es wird untersucht, welche Änderung erforderlich ist, so dass die Lösung der Optimierung nicht mehr von den Grenzen wie im Basisszenario für das Jahr 2005 bestimmt wird. Da im Personennahverkehr der Pkw als nicht eingeschränkte Größe eingesetzt wird, werden die meisten Parametervariationen für diese Technik untersucht, da dann die größten Änderungen im Ergebnis zu erwarten sind. Abbildung 6.10 zeigt die Variationen der Parameter, bei denen eine Änderung der Lösung erfolgt.

Importpreise für Rohöl

Die Änderung der Rohölimportpreise hat auf die Techniken im Verkehrssektor über die Energiekosten Einfluss. Verringert man den Importpreis um 10 %, so wird der Methanol-Lkw im Güternahverkehr nicht mehr eingesetzt, sondern statt dessen der Diesel-Lkw, da der Dieselpreis ebenfalls um 10 % sinkt. Das bedeutet, dass das in der Basislösung aus kostengünstigem Biogas hergestellte Methanol bei geringfügig niedrigeren Rohölpreisen nicht mehr konkurrenzfähig ist. Bei einer weiteren Verringerung der Importpreise erfolgt keine weitere Änderung. Damit werden, wenn die Rohölimportpreise bei null liegen, im Güternahverkehr sowohl Diesel- als auch LPG-Lkw eingesetzt. Beide Energieträger werden in den Raffinerien im Umwandlungssektor aus Rohöl gewonnen und werden daher auch gleichzeitig mit dem Rohölimportpreis kostengünstiger. Daher ergibt sich keine Verschiebung zwischen den beiden Techniken.

Eine Erhöhung der Rohölimportpreise um 30 % hat einen Ersatz von konventionellen Antrieben durch den Methanol-Antrieb im Pkw-Nahverkehr zur Folge. Im Güternahverkehr ändert sich allerdings der Einsatz von Diesel-Lkw nicht.

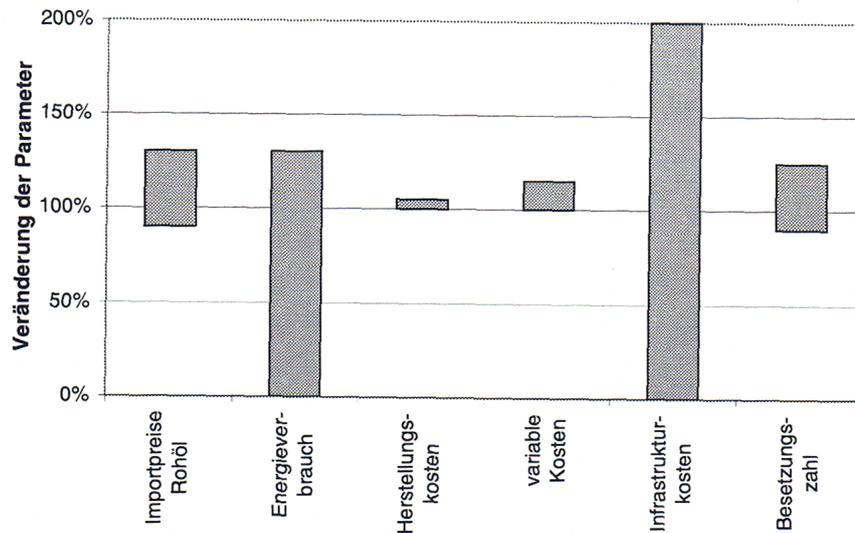


Abbildung 6.10: Sensitivität des Verkehrssektors bei Parametervariation. Die Balken zeigen den „sicheren“ Bereich der Parameter an; innerhalb dieser Variation ändert sich das Optimierungsergebnis nicht. 100 % entspricht dabei dem Ausgangswert, Werte unter 100 % entsprechen einer Verringerung des entsprechenden Parameters.

Ebenfalls sind die anderen konventionellen Techniken im Personen- und Güterfernverkehr, die nicht durch Begrenzungen bestimmt werden, erst bei weiteren Preiserhöhungen betroffen. Aus diesem Ergebnis kann zusätzlich geschlossen werden, dass im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern beim Pkw-Nahverkehr der Energiepreis den größten Anteil an den Gesamtkosten hat.

Energieverbrauch

Da das Modell die Kosten minimiert, ist eine Erhöhung des Rohölpreises für die Ermittlung des Ergebnisses gleichbedeutend mit einer Verbrauchssteigerung *aller* konventionellen Techniken. Denn sowohl eine Verbrauchssteigerung als auch eine Erhöhung der Brennstoffpreise bewirken einen Anstieg des Anteils der Energiekosten an den gesamten Transportkosten. Im Gegensatz dazu wird in diesem Absatz die Änderung des Verbrauchs einer einzelnen Technik untersucht.

Der Verbrauch eines Benzin-Pkw im Nahverkehr beträgt im Jahr 2005 im Modell etwa 6,5 l/100 km. Erst wenn dieser Wert um 30 % steigt (auf mehr als 8,4 l/100 km) kommt es zu einer Verschiebung von Benzin- zu Methanol-Pkw. Eine Senkung des Verbrauchs kann im Personennahverkehr nicht sinnvoll untersucht werden, da der Benzin-Pkw ohnehin als günstigste Technik gewählt wird. Daher wurde die entsprechende Rechnung für den Pkw im Fernverkehr durchgeführt. Dabei ist die Erwartung, dass der Benzin-Pkw unterhalb eines bestimmten Ver-

brauchs Anteile der Bahn im Personenfernverkehr übernimmt. Da die Lösung jedoch nur zu einem geringen Anteil vom Energieverbrauch bestimmt wird, ändert sie sich auch nicht, wenn der Energieverbrauch des Fernverkehr-Pkws auf null gesetzt wird. Der Parameter „Verbrauch“ ist also nicht sehr sensitiv.

Herstellungskosten

Wie in Tabelle 6.1 (S. 104) gezeigt wird, sind die Fahrzeugkosten im Verkehrssektor ein wesentlicher Faktor. Der Preis für einen durchschnittlichen Benzin-Pkw beträgt im Jahr 2005 nach den Annahmen im Modell ca. 29.000 DM (inflationbereinigt auf der Preisbasis von 1989). Schon ab einem Preis von 30.450 DM wird vom Modell zum Teil der Methanol-Pkw vorgezogen, bei knapp 32.000 DM für einen Benzin-Pkw wählt das Modell fast ausschließlich Methanol-Fahrzeuge für diesen Bereich. Die geringen Preisunterschiede der konkurrierenden Antriebssysteme führen zu einem frühen Wechsel der Techniken bei einer Änderung der Herstellungskosten. Für das Methanolfahrzeug werden im Modell Kosten von 30.000 DM geschätzt. Der Wechsel zwischen diesen Techniken ist sehr von der Differenz der Herstellungskosten abhängig. Der Wechsel im Modal Split ist dagegen nicht sensitiv. Hier kann der Öffentliche Personennahverkehr Anteile des Pkw-Verkehrs erst bei einer Verteuerung *aller* Pkw-Techniken um 30 % übernehmen.

Der Übergang vom Benzin- zum Methanol-Pkw erfolgt in diesem Beispiel in zwei Stufen, da die Methanolherstellung im Modell bis zu einer bestimmten Menge aus günstigem Biogas erfolgt. Wird mehr Methanol benötigt, wird die Herstellung entsprechend teurer.

Variable Kosten

Im Vergleich zu den Herstellungskosten wirkt sich eine Erhöhung der variablen Kosten weniger stark aus (Abbildung 6.10). Im Modell wird für die Herstellungskosten auch der Kapitaldienst berechnet, so dass ihre Erhöhung durch die Zinsen verstärkt wird. So müssen die variablen Kosten um 15 % erhöht werden, damit ein Wechsel von Benzin- zu Methanol-Pkw im Nahverkehr stattfindet. Wenn die variablen Kosten um 50 % steigen, sie liegen dann bei 9 DM/100 km für den Benzin-Pkw im Nahverkehr, erhöht sich der Anteil der Methanol-Fahrzeuge im Optimierungsergebnis.

Infrastrukturkosten

Die Sensitivität des Verkehrssektors gegenüber den Kosten der Infrastruktur wird durch eine Verringerung der Kosten bei der Bahn im Personennahverkehr unter-

sucht, da dort der Anteil der Infrastrukturkosten hoch ist und daher eine Verminderung eher als bei anderen Verkehrsträgern eine Wirkung zeigt. Dadurch, dass die Technik als Beispiel gewählt wird, bei der der untersuchte Parameter den größten Einfluss hat, ist gewährleistet, dass die maximalen Sensitivitäten gefunden werden. Dennoch müssen die Infrastrukturkosten auf null gesetzt werden, damit das Modell eine Lösung berechnet, in der die Bahn vom Pkw im Nahverkehr Anteile übernehmen kann.

Eine Erhöhung der Infrastrukturkosten wird für den Einsatz des Pkw im Nahverkehr berechnet. Jedoch hat auch eine Verdopplung der Kosten keine Änderung zur Folge. Dies ist in der Dominanz der Betriebs- und Herstellungskosten der Fahrzeuge im Verkehrssektor begründet, so dass weder Energie- noch Infrastrukturkosten großen Einfluss auf die Wahl des Verkehrsträgers haben.

Besetzungszahl

Als letzter wichtiger Parameter wurde die Besetzungszahl untersucht. Auch hier wurde als Beispiel für eine kleinere Besetzungszahl der Pkw im Nahverkehr gewählt, als Beispiel für eine größere Besetzungszahl wurde der Bus im Nahverkehr gewählt. Bei der Verkleinerung der Besetzungszahl kann das Modell auf den Öffentlichen Personennahverkehr ausweichen, bei einer Vergrößerung der Besetzungszahl sollte der Nahverkehrsbus attraktiver werden.

Die Besetzungszahl verknüpft die Nachfrage, die dem Modell extern fest vorgegeben wird, mit der Fahrleistung. Sie ist somit der Faktor, der bei gegebener Verkehrsleistung über die Menge der eingesetzten Fahrzeuge der verschiedenen Verkehrsträger entscheidet. Die Besetzungszahl für Pkw im Nahverkehr ist im Modell 1,24 Personen/Fahrzeug (2005, alte und neue Länder). Wie schon mehrfach betont, wird der Pkw in diesem Bereich bevorzugt. Erst bei einer Senkung der Besetzungszahl auf eine Person pro Fahrzeug wird statt dem Pkw der Bus bevorzugt. Wenn man allerdings die Besetzungszahl des Nahverkehrsbusses erhöht – von 16 auf 19 Personen – wird dieser als das günstigste Nahverkehrsmittel angesehen. Auf Grund der hohen Besetzungszahlen wählt das Modell im Personenfernverkehr vor allem die Bahn. Allerdings würde schon bei einer nur um 10 % geringeren Besetzungszahl im Fernverkehr der Bus vorgezogen.

Dieses Ergebnis ist umso bemerkenswerter, da die Besetzungszahl auch der unsicherste Parameter im Verkehrssektor ist. In der Verkehrsforschung ist sie umstritten. Die Fahrleistung der Fahrzeuge kann recht genau erfasst werden, die Belastung auf den Fernstraßen wird genau gemessen und der Verbrauch unterschiedlicher Treibstoffarten ist auch gut bekannt. Die Besetzungszahl bei Pkw und Bussen kann jedoch nur durch manuelle Verkehrszählungen und besonders durch die sogenannten KONTIV-Erhebungen [Hautzinger95] ermittelt werden. Wenn ein Fehlerbereich von $\pm 15\%$ bei der Besetzungszahl angenommen wird,

was durchaus als realistisch gelten kann, dann liegt die ausgeführte Sensitivität nur noch knapp außerhalb dieser Unsicherheit. Der Parameter ist also sensitiv für das gesamte Ergebnis im Verkehrssektor.

Zusammenfassung:

Insgesamt stellt sich heraus, dass das Modell sensitiv auf die Änderung der Betriebs- oder Herstellkosten der Fahrzeuge reagiert, insbesondere ist der Kostenunterschied zwischen den einzelnen Techniken wesentlich. Sowohl die Rohölimportpreise als auch die Besetzungszahl sind durch die geschätzte Unsicherheit der Daten, die innerhalb des sensitiven Bereiches liegt, kritische Parameter. Der Energieeinsatz und die Kosten der Infrastruktur sind, wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, sichere Parameter.

6.4 Einfluss der Einbindung der Infrastruktur

Die Sensitivitätsanalyse und die Analyse der Kostenanteile (Tabelle 6.1) haben gezeigt, dass die Kosten der Infrastruktur nur geringen Einfluss auf den Verkehrssektor im Optimierungsmodell haben.

Für die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen ist vor allem die Begrenzung der Kapazität der Infrastruktur wichtig. Bei den Rechnungen in dieser Arbeit gilt das besonders für die Infrastruktur des Schienenfernverkehrs. Diese Begrenzung bewirkt, dass in den Szenarien ein erheblicher Anteil des Güterfernverkehrs nicht auf der Schiene, sondern mit dem Lkw transportiert wird.

Im Einzelnen hat die Einbindung der Infrastruktur in das Optimierungsmodell folgende Auswirkungen:

- **Kapazität von Schienenwegen:** Die Kapazität der vorhandenen Schienenwege und des möglichen Ausbaus lässt zusätzlich zum Personenfernverkehr noch eine größere Menge⁸ Güterfernverkehr zu. Die restliche Gütermenge muss durch Lkw transportiert werden. Das heißt, die Kapazität der Infrastruktur begrenzt den möglichen Bahnverkehr. Aus Sicht der Kostenminimierung sollte auf der Schiene soviel Personenfernverkehr wie möglich stattfinden und die restliche Kapazität für den Güterfernverkehr genutzt werden. Durch die Begrenzung der Schienenwege für den Fernverkehr erhöhen sich also die Kosten des Verkehrssektors.

⁸148 Mrd tkm im Jahr 2005; zum Vergleich: 1995 wurden 69,8 Mrd tkm auf der Schiene transportiert.

- **Kapazität von Straßen:** Trotz der starken Erhöhung der Fahrleistung im Personennahverkehr auf der Straße ist im Optimierungsmodell eine ausreichende Kapazität vorgegeben. Diese Vorgabe entsteht auf Grund des sehr umfangreichen Netzes an nachgeordneten Straßen. Problematisch ist allerdings, dass es an bestimmten Knotenstellen in den Städten immer wieder zu Staus kommt, vor allem zu den Spitzenzeiten am Morgen und Abend. Diese Spitzenbelastungen des Nahverkehrsnetzes können im Modell nicht erfasst werden, so dass davon ausgegangen werden muss, dass die ausreichende Kapazität des Nahverkehrsstraßennetzes im Durchschnitt zwar gegeben ist, dass aber die vom Modell vorgesehene Steigerung des Pkw-Nahverkehrs um 32 % zwischen den Jahren 1989 und 2005 an vielen Stellen im Straßennetz der Städte zum Stillstand führen würde⁹. Hier hat die Einbindung der Infrastruktur keine Auswirkung, wobei zu bedenken ist, dass dies durch eine unzureichende Erfassung der Nahverkehrsstraßennetze und ihrer Spitzenbelastungen bedingt sein kann.
- **Kosten von Schienenwegen:** Wie schon in den vorhergehenden Abschnitten erwähnt, verdoppeln die Infrastrukturkosten die Transportkosten der Bahn. Dennoch ergeben sich daraus für die Auswahl der Techniken durch das Modell keine Konsequenzen. Durch die Anrechnung der Kosten der Infrastruktur werden also die Kosten des Verkehrssektors insgesamt erhöht.
- **Kosten der Straßen:** Nur für den Güterfernverkehr haben die Kosten der Infrastruktur einen nennenswerten Anteil an den Transportkosten. Bei allen anderen Straßenverkehrsmitteln liegt der Anteil der Infrastrukturkosten bei etwa 10 % oder niedriger. Wie bei den Kosten der Schienenwege ergibt sich auch durch die Kosten der Straßen keine Verschiebung bei der Auswahl der Techniken. Insgesamt werden die Kosten des Verkehrssektors durch die Infrastrukturkosten erhöht.

Für den Nahverkehr ist also die hier durchgeführte Einbeziehung der Infrastruktur zu überdenken, vor allem sollten die Spitzenbelastungen im Nahverkehr besser darstellbar sein. Für den Fernverkehr liefert die Einbindung allerdings eine gute Möglichkeit, die Kapazitätseinschränkung im Modell wirksam werden zu lassen. Durch die Begrenzung der Infrastrukturkapazität ist es möglich, die gegenseitigen Einflüsse von Personen- und Güterverkehr abzubilden. Zudem ist es in dieser Arbeit gelungen, die Kosten der Infrastruktur sowohl für den Nah- als auch den Fernverkehr in die energiewirtschaftliche Optimierungsrechnung einzu beziehen.

⁹Nach der Studie der PROGNOSE AG wird ein Anstieg der Pkw-Fahrleistung im Nahverkehr um 24 % gegenüber 1989 prognostiziert [Eckerle95].

Kapitel 7

Ergebnisse der Bilanzierung und der Berechnung des Infrastrukturausbaus

Im vorhergehenden Kapitel wurden die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen erläutert. Durch die Iteration mit dem Infrastrukturmodell sind diese Ergebnisse mit einem Ausbau der Infrastruktur verknüpft, dessen kumulierter Energieaufwand und Emissionen im Folgenden dargestellt werden. Dabei wird der Ausbau auch in seiner regionalen Gliederung berücksichtigt. Es erfolgt ein Vergleich des Energieaufwands durch Nutzung und Herstellung des Ausbaus. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird die Eignung der Methoden, die in dieser Arbeit Anwendung finden, analysiert. Die Ergebnisdaten sind mit ihren Zusammenhängen und dem Inhalt des folgenden Abschnitts schematisch in Abbildung 7.1 dargestellt.

7.1 Kumulierter Energieaufwand und Emissionen des Infrastrukturausbaus

Nachdem in Kapitel 3 die Bilanzen der einzelnen Beispielprojekte zusammengefasst wurden, werden im folgenden Abschnitt die Einzelbilanzen inklusive der Bauwerke auf den gesamten Bundesverkehrswegeplan erweitert. Anschließend werden die durch das Iterationsverfahren von Optimierungs- und Infrastrukturmodell berechneten Erweiterungen der Korridore erläutert.

Im Folgenden werden

- der durchschnittliche KEA und die durchschnittlichen Emissionen des Ausbaus der Netze dargestellt (Abschnitt 7.1.1).

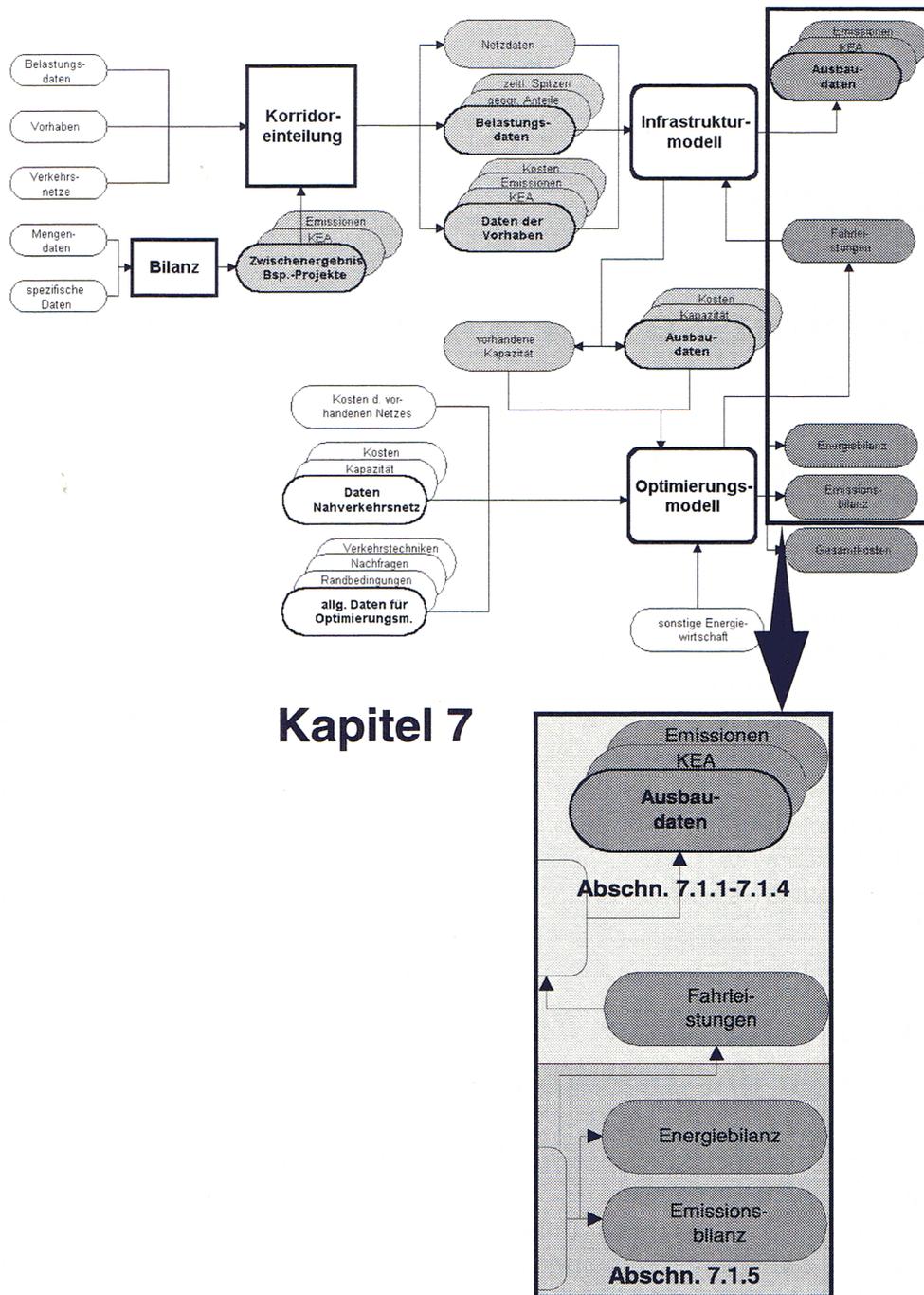


Abbildung 7.1: Einordnung der Ergebnisse der Infrastrukturberechnung in den Untersuchungsablauf

- die Ergebnisse des Infrastrukturmodells, also Kosten, Kapazität, KEA und Emissionen des vorgeschlagenen Ausbaus dargestellt (Abschnitt 7.1.3).
- die spezifischen Bilanzergebnisse von Straßen- und Schienennetzausbau miteinander verglichen (Abschnitt 7.1.4).
- die spezifischen Bilanzergebnisse für den Netzausbau in Bezug zu den Daten der Nutzung gesetzt (Abschnitt 7.1.5).

7.1.1 Mittlerer kumulierter Energieaufwand und mittlere Emissionen bei Verkehrswegebauten

Bahn

Die Aufteilung des KEA auf die einzelnen Baumaterialien und -arbeiten unterscheidet sich zwischen Straße und Schiene. Bei den Schienenwegen mit Festbett steckt der größte Energieaufwand im Polystyrol, das in der Wärmeschutzschicht eingebaut wird¹. Bei Strecken mit Schotterbett steckt der höchste kumulierte Energieaufwand im Schienenstahl. Die Aufteilung des KEA auf Materialaufwand, Transportaufwand und Arbeitsaufwand in der Baustelle ist bei Festbettbauweise 97,2 %, 1,5 % und 1,3 % und bei Schotterbettbauweise 92 %, 7,8 % und < 0,2 %. Der mittlere spezifische Energieaufwand für den Schienenwegeneubau mit Festbett beträgt etwa 36.000 GJ/km (Tabelle 7.1).

Ein Literaturwert für die Schienenwege liegt nur aus einer Arbeit von [Benz94] vor. Der dort berechnete Wert von 8.900 GJ/km entspricht etwa 60 % des hier berechneten Wertes für den Ausbau auf Schotterbett (15.300 GJ/km). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass in der vorliegenden Arbeit eine genauere Bilanz und die Einbeziehung einer größeren Anzahl an Materialien möglich war. Daher ist davon auszugehen, dass die hier ermittelten Ergebnisse genauer sind.

Für den Ausbau der Schienenwege wird vom Zubau von zwei Gleisen auf Schotterbett ausgegangen, da es sich um eine Bilanz des Hauptschienennetzes für den Personenfernverkehr handelt. Im Infrastrukturmodell sind die Vorhaben vereinfacht eingebunden. Ein nach dem Schienenwegeausbauplan [Bundestag97a] eingleisiger Ausbau wurde mit der halben Projektlänge als zweigleisiger Ausbau eingebunden. Der im Folgenden bilanzierte zweigleisige Ausbau kann daher auch einem doppelt so langen eingleisigen Ausbau entsprechen.

¹Zum einen wird viel Styroporbeton eingesetzt, zum anderen ist der KEA für Polystyrol mit 105 MJ/kg hoch. Bei der Rechnung wurde angenommen, dass Styroporbeton die gleiche Dichte wie Leichtbeton hat (0,6 g/cm³, [Schäffler80], S. 121). Auf diese Weise erhält man einen Volumenanteil von Polystyrol von 82 % und einen Gewichtsanteil von 20 %.

Tabelle 7.1: Ergebnis der Bilanzen: Mittlerer kumulierter Energieaufwand und mittlere Emissionen beim Ausbau von Autobahn- und Schienennetz.

	Einheit	Straße	
		Neubau	Ausbau
KEA	[GJ/km]	38.200 ± 2.100	15.000 ± 4.800
CO ₂	[t/km]	1.500 ± 400	800 ± 500
CO	[t/km]	1,1 ± 0,4	0,5 ± 0,2
SO ₂	[t/km]	3,3 ± 1,6	2,5 ± 1,2
NO _x	[t/km]	5,2 ± 1,1	3,0 ± 1,8
CH ₄	[t/km]	1,0 ± 1,0	0,8 ± 0,5
KWS	[t/km]	0,56 ± 0,24	0,27 ± 0,13
		Bahn	
		Neubau	Ausbau
KEA	[GJ/km]	36.300 ± 3.900	15.300 ± 2.200
CO ₂	[t/km]	2.000 ± 300	1.110 ± 140
CO	[t/km]	1,05 ± 0,18	0,71 ± 0,27
SO ₂	[t/km]	5,9 ± 1,8	2,5 ± 0,8
NO _x	[t/km]	5,6 ± 1,0	2,7 ± 0,7
CH ₄	[t/km]	2,0 ± 0,5	0,5 ± 0,2
KWS	[t/km]	0,5 ± 0,1	0,31 ± 0,15

Straße

Der höchste KEA ist beim Autobahnbau für die Herstellung des Stahlbetons der Bauwerke (Kleinbauwerke, Lärmschutz, Tunnel und Großbrücken) notwendig. Auch bituminöses Mischgut hat einen hohen KEA, da die Mischanlagen für bituminöses Mischgut einen großen Energieeinsatz erfordern. Diese Aussagen gelten allerdings nur, wenn der Heizwert von Bitumen (s. Abschnitt 3.2.3) nicht berücksichtigt wird, da dieser Wert sonst den KEA dominiert. Für die Materialien werden bei dieser Rechnung $88 \pm 5 \%$, für die Transporte $8 \pm 7 \%$ und für Bauarbeiten $4 \pm 2 \%$ benötigt. Beim Einbau von Betondecken ist der größte Teil des KEA für die Herstellung des Zements nötig.

Vergleichswerte zum Straßenbau aus Literaturquellen liegen von [Beyert85], [Benz94] und [Hoffmann93] vor: 14.600 GJ/km, 15.800 GJ/km und 48.400 GJ/km. Die ersten beiden Werte liegen an der unteren Grenze der Bilanzen in dieser Arbeit (21.400 ± 4.000 GJ/km), wenn der Heizwert von Bitumen nicht berücksichtigt wird. Der letzte Wert liegt innerhalb der Standardabweichung der bilanzierten Neubauprojekte mit Berücksichtigung des Heizwertes von Bitumen (53.500 ± 27.000 GJ/km).

Die in Tabelle 7.1 genannten Werte sind die Mittelwerte der bilanzierten Straßenprojekte. Dabei wird sowohl der Anteil sechsstreifiger Autobahnen (etwa 15 % des Autobahnnetzes) als auch der Anteil der Betonfahrbahnen (28 %) berücksichtigt. Der angegebene Fehler entspricht der Standardabweichung. Er ist bei den Nicht-Kohlendioxidemissionen besonders hoch und beträgt für Methan bei Straßenneubau fast 100 %. In Abbildung 7.2 werden die durchschnittlichen Werte von KEA und CO₂-Emissionen der Baumaßnahmen gezeigt. In Abbildung 7.3 werden die durchschnittlichen Nicht-CO₂-Emissionen gezeigt. Die sehr hohen Schwankungsbreiten sind darauf zurückzuführen, dass für diese Schadstoffemissionen hauptsächlich wenige Materialien (zum Beispiel Kunststoffe) und Bauarbeiten (Dieselfahrzeuge) verantwortlich sind, die in den Bilanzen mit geringen Mengen vorkommen. Bei der Bilanzierung dieser geringen Mengen entstand durch die geringe Genauigkeit der Erfassung und der spezifischen Emissionsdaten ein hoher Fehler. Zusätzlich ist der Anteil dieser Materialien in den Bilanzen sehr unterschiedlich, so dass eine hohe Standardabweichung des Mittelwertes die Folge ist.

Für alle im Bundesverkehrswegeplan vorgesehenen Straßenprojekte ist insgesamt ein kumulierter Energieaufwand von etwa 290 PJ nötig, bei den Bahnprojekten 123 PJ. Zusammen entspricht dies knapp 3 % des Primärenergieeinsatzes in Deutschland im Jahr 1996 und etwa 18 % des Endenergieeinsatzes im Verkehr.

Die Fehlerbreiten der Bilanzen der Beispielprojekte betragen zwischen 10 % und 30 %, bei den Emissionswerten liegen sie auch darüber. Die Standardabweichung der Mittelwerte des KEA liegen in einem ähnlichen Bereich, diejenige der Emissionswerte allerdings zum Teil über 50 %. In den folgenden Abschnitten

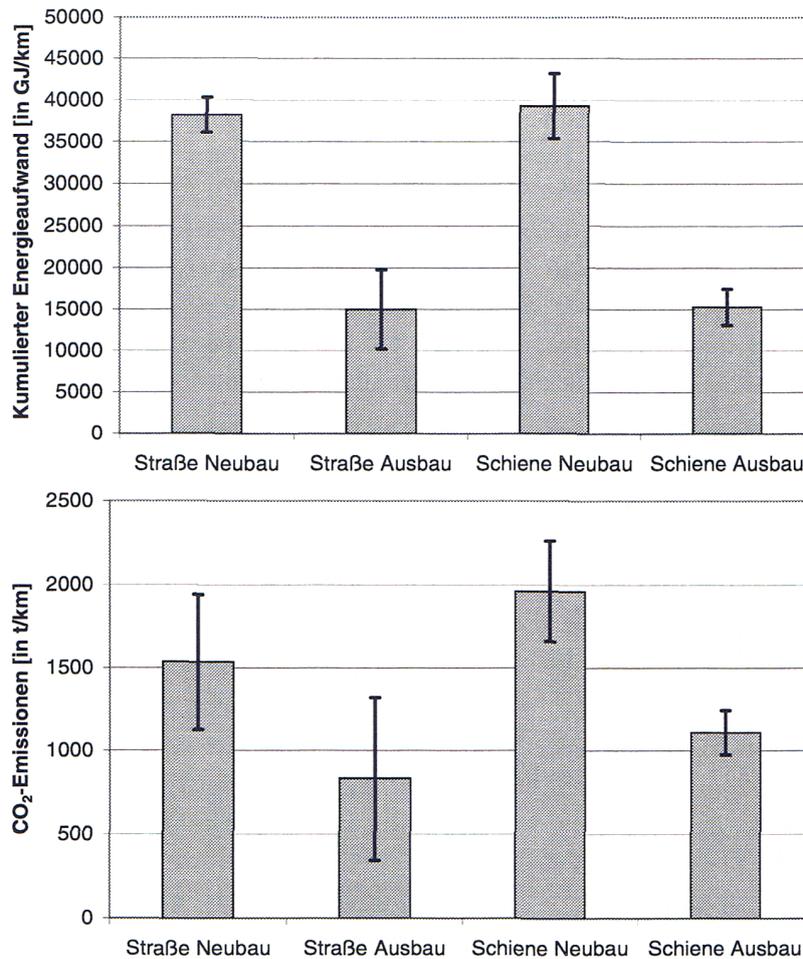


Abbildung 7.2: Bilanzergebnis: Kumulierter Energieaufwand (oben) und CO₂-Emissionen (unten) durch Bau und Ausbau von Verkehrswegen je Baukilometer.

ist eine derartige Fehlerberechnung nicht möglich, da die fehlerbehafteten Daten in Bezug zu Daten (zum Beispiel die zusätzliche Kapazität) gesetzt werden, für die kein Fehler auf statistische oder andere Weise ermittelt werden kann. Zu bedenken ist im Folgenden, dass Verhältniszahlen, die aus zwei unsicheren Einzeldaten gebildet werden, ihrerseits besonders unsicher sind. Dennoch sind die in den nächsten Abschnitten enthaltenen Aussagen besonders hinsichtlich des Vergleichs von Aufwendungen bei Straßen- und Schienenausbau ausreichend abgesichert, da die Differenzen zwischen den Werten größer sind, als die möglichen Unsicherheiten.

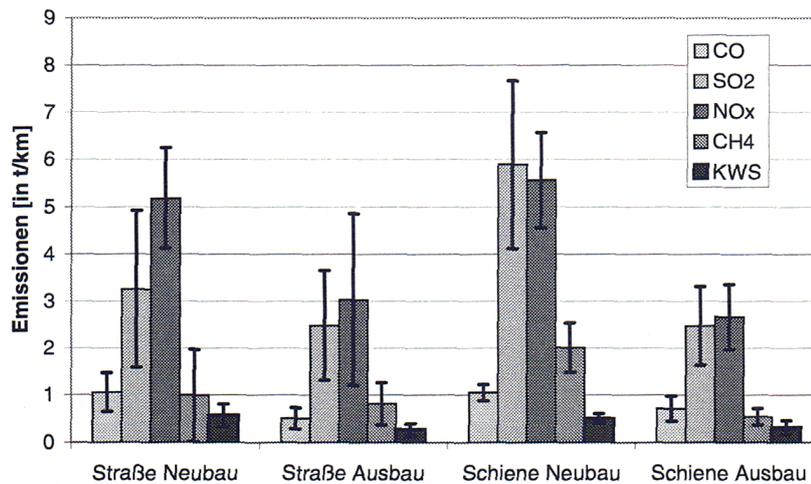


Abbildung 7.3: Bilanzergebnis: Klimagasemissionen durch Bau und Ausbau von Verkehrswegen je Baukilometer.

7.1.2 Kumulierter Energieaufwand und Emissionen in den Korridoren

Die reine Kostenminimierung ohne Berücksichtigung von Schnelligkeit, Komfort und Erreichbarkeit lässt im Personenfernverkehr des Optimierungsmodells die öffentlichen Verkehrsmittel, besonders die Bahn, dominieren. Dies ist vor allem eine Folge der im Vergleich zum Pkw höheren Auslastung. Zusätzlich sind nicht, wie bereits erwähnt, alle Kosten erfasst (Kapitel 6.2.4, S. 103). Die Bevorzugung der Bahn wirkt sich auf die Infrastruktur durch einen erheblichen Ausbaubedarf aus. Tabelle 7.2 zeigt die vom Infrastrukturmodell ermittelten Maßnahmen.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen für die beiden Stützjahre bauen nicht aufeinander auf, sondern sind jeweils separat berechnet. Daher ist zum Beispiel die Verkürzung der Blocklängen für den Korridor 1/3/5 bei der Bahn sowohl für das Jahr 2005 als für 2020 in den Maßnahmen enthalten. Im Bereich des Straßenbaus sind nur wenige Maßnahmen ausgewählt, da die steigende Nachfrage gemäß der Optimierung bis zur Grenze der Ausbaukapazität von der Bahn getragen wird. Ausbaugründe wie Netzergänzungen, Erschließung von Gebieten und Schaffung von Arbeitsplätzen werden dabei nicht berücksichtigt, da in dieser Arbeit der Ausbau aus Kapazitätsgründen betrachtet wird. Durch die Straßenneubauten im Korridor 8 und bei den Straßenprojekten für 2020 wird keine Erhöhung der Kapazität erreicht, sondern eine Verbesserung der Verkehrsqualität, also eine Erhöhung der möglichen Geschwindigkeit.

Der in Kapitel 4.2.2 erläuterten geographischen und zeitlichen Verteilung der Verkehrsleistung der Jahre 2005 und 2020 liegt die Prognose zum Bundesver-

Tabelle 7.2: Ergebnis der Berechnung des Infrastrukturmodells: Maßnahmen und die entsprechende Kapazitätserweiterung mit den entsprechenden Kosten. (zu den Korridoren vgl. Abbildung 3.4, S. 37)

Verkehrsträger	Jahr	Korridor	Projekt	zusätzliche Kapazität	Kosten
				[Mrd Fzgkm/a]	[Mrd DM]
Straße	2005	K 1/20	Neubau	3,58 (+96%)	5,533
		K 4 (Thüringen)	Neubau	1,908 (+100%)	4,044
		K 8 (Bayern)	Neubau	Geschwindigkeitserhöhung	1,229
	2020	K 1/20	Neubau	Geschw.Erhöhung	0,24
		K 4 (Thüringen)	Telematik	Geschwindigkeitserhöhung	0,112
Bahn	2005	K 1/3/5	Verkürzung der Blocklängen (VBL)	0,0523 (+30%)	1,574
		K 4	Fahren im Bremswegabstand (FBA)	0,0829 (+80%)	2,58
		K 6	FBA, Geschwindigkeitserhöhung (GE)	0,0746 (+100%)	6,031
		K 8	VBL	0,0296 (+30%)	0,79
	2020	K 1/3/5	FBA	0,1394 (+80%)	4,721
		K 7	VBL	0,0546 (+30%)	1,366
		K 11	VBL	0,0177 (+30%)	0,584
		K 9	VBL	0,0367 (+30%)	1,009
		K 2	VBL	0,0316 (+30%)	0,752
		K 4	FBA, GE, Überholgleise (ÜG), Neu-, Ausbau	0,1169 (+113%)	17,238
		K 6	FBA, GE, ÜG, Neu-, Ausbau	0,0766 (+104%)	6,731
		K 8	FBA	0,0789 (+80%)	2,369

kehrswegenplan zu Grunde. Dabei handelt es sich nicht um eine Bedarfsprognose. Eine Voraussetzung bei dieser Prognose ist, dass der im BVWP vorgesehene Ausbau der Verkehrswege bereits durchgeführt wurde. Das heißt, durch den Ausbau der Verkehrsnetze neu entstehender Verkehr („induzierter Verkehr“, [Meier89]) wird in der Prognose mitberücksichtigt. Daher ist die Prognose des Verkehrsaufkommens in manchen Bereichen zu hoch. Insgesamt werden in das Modell nur Daten übernommen, die von der absoluten Höhe des Verkehrsaufkommens unabhängig sind. Daher ist diese Vorgehensweise möglich. Dennoch kann es zu einer Überschätzung der Verkehrsentwicklung in einzelnen Korridoren kommen. Das ist besonders im Korridor 1/20 mit dem Neubau der A 20 wichtig, da ein wesentlicher Teil des prognostizierten Verkehrs auf dieser Neubaustrecke nicht dem ursprünglichen Bedarf entspricht [Kuhbier92]. Daher ist die Prognosebelastung dieses Korridores durch eine Annahme verursacht, die nicht vom eigentlichen Bedarf herrührt.

Für den Autobahnbau gilt, dass die Telematik in der Regel die kostengünstigste Kapazitätserweiterung ist, allerdings erhöht sie die Kapazität wesentlich weniger als die Neubauprojekte. Das Infrastrukturmodell ermittelt zwar die Lösung mit den geringsten Kosten je neugeschaffener Kapazität, aber nur dann, wenn diese auch ausreicht, um den Bedarf zu befriedigen. Erst wenn keine *einzelne* Lösung möglich ist, werden Kombinationen gewählt (s. Kapitel 4.5.3). Daher wird die Telematik in den Rechnungen nicht vorgeschlagen.

Die Kapazitätserhöhung bei der Bahn ist durch die Umstellung der Betriebsweise mit Hilfe verkürzter Blocklängen oder das Fahren im Bremswegabstand am kostengünstigsten möglich. Die spezifischen Kosten aller anderen Varianten (Ausbau, Ausbau mit Erhöhung der Geschwindigkeit, Einbau weiterer Überholgleise oder Neubau) sind bei den einzelnen Projekten sehr unterschiedlich, so dass hier keine generelle Reihenfolge der Maßnahmen angegeben werden kann. Für die Korridore 4, 6 und 8 reicht die Änderung der Betriebsweise nicht aus, um den vom Optimierungsmodell geforderten Anstieg der Bahnverkehrsleistung bis 2020 aufzunehmen (Tabelle 7.2). In diesen Korridoren werden erhebliche bauliche Maßnahmen vorgeschlagen, so zum Beispiel im Korridor 4 der Ausbau auf 1.100 km Strecke und der Neubau in der Länge von 250 km. Wie bereits für die Straßenprojekte gilt auch hier, dass die Projektauswahl nur aus dem Grund einer Kapazitätserhöhung erfolgt, nicht jedoch, um zum Beispiel die Attraktivität der Bahn durch Verkürzung der Reisezeit zu erhöhen. Auch die Neubaustrecke zwischen Köln und Frankfurt a.M. wird vom Modell nicht vorgeschlagen, obwohl zu erwarten ist, dass sie einen großen Teil des zur Zeit auf der überlasteten Rheinschiene ablaufenden Verkehrs übernimmt. Zusätzlich hat die Lufthansa AG angekündigt, ihre Kurzstreckenflüge zwischen den Flughäfen Köln-Bonn und Frankfurt a.M. zu streichen, wenn die Strecke fertiggestellt ist, so dass die genannte Strecke für ausreichend viele Verkehrsteilnehmer attraktiv sein dürfte [DBAG98]. Da es nicht möglich ist, auf Belastungsdaten der Deutschen Bahn AG zuzugreifen, muss für

die Belastung des Schienennetzes eine geographische Aufteilung ähnlich der des Autobahnnetzes angenommen werden (s. Kapitel 4.1). Entsprechend unsicher ist, ob die Auswahl der Maßnahmen dem realen Bedarf entsprechen wird. Im Sinne einer möglichen Substitution von Straßen- durch Schienenverkehr entspricht dieser Ansatz jedoch dem Zweck des Optimierungsmodells. In der Summe innerhalb der Korridore und über die Vielzahl der Einzelmaßnahmen sind die Kosten, die aus den Projekten entstehen, für den Einsatz im Optimierungsmodell ausreichend genau, zumal dieses gegenüber den Kostendaten der Infrastruktur nicht sensitiv ist.

Als bauliche Maßnahmen sind in der Datenbank des Infrastrukturmodells nur die Projekte des Bundesverkehrswegeplans vorgesehen. Daher kann auch nur eine Auswahl dieser Projekte zur Ergänzung der Kapazität vorgeschlagen werden. Änderungen in der Betriebsweise, das betrifft bei den Autobahnen den Einsatz von Telematikanlagen und bei der Bahn die Verkürzung der Blocklängen oder die Ermöglichung des Fahrens im Bremswegabstand, stehen dem Infrastrukturmodell in jedem Fall zur Verfügung.

7.1.3 Ergebnis der Berechnung der Ausbauprojekte

Aus den Iterationsrechnungen folgen neben den Ergebnissen aus Kapitel 6 des Optimierungsmodells auch Ergebnisse des Infrastrukturmodells. Diese setzen sich aus den berechneten Erweiterungsmaßnahmen und ihren Daten zusammen. Im folgenden Abschnitt werden diese Ergebnisse erläutert.

Es werden, wie schon in Tabelle 7.2 enthalten, sowohl Bahn- als auch Straßenprojekte vorgeschlagen.

Bahnprojekte

Beim Schienenverkehr sind die kostengünstigsten Maßnahmen je neugeschaffener Kapazität die betrieblichen Maßnahmen wie Verkürzung der Blocklängen oder Fahren im Bremswegabstand. Daher wählt das Infrastrukturmodell im Jahr 2005 für alle Korridore, in denen zusätzliche Kapazität notwendig ist (K 1, K 4, K 6 und K 8; Tabelle 7.2), betriebliche Maßnahmen aus. Sie werden ebenfalls für das Jahr 2020 in fast allen Korridoren (Ausnahme: K 1/20) vorgeschlagen. Die mit baulichen Maßnahmen verbundenen Projekte sind mit ihrem kumuliertem Energieaufwand und ihren Emissionen in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Projekte bis zum Jahr 2005 Maßnahmen für das Schienennetz im Jahr 2005 sind im Hinblick auf den KEA vernachlässigbar. Im Jahr 2005 wird nur im Korridor 6 eine bauliche Maßnahme gewählt, die mit einer Erhöhung der Geschwindig-

keit zusätzliche Kapazität schafft. Für dieses Ausbauprojekt werden 2.300 GJ/km benötigt, da – wie aus der zu Grunde liegenden Projektbeschreibung aus dem Schienenwegeausbauplan [Bundestag97a] hervorgeht – lediglich punktuelle Maßnahmen notwendig sind, zum Beispiel eine Anpassung der Oberbauparameter, der Brücken oder der Stromversorgung eines Teils der Strecke. Das bedeutet, durch die Umrechnung des KEA dieser punktuellen Maßnahmen auf die Projektlänge ist der spezifische KEA sehr gering.

Projekte bis zum Jahr 2020 In den schon im Zusammenhang mit den Optimierungsergebnissen (Seite 95) erwähnten südlichen West-Ost-Korridoren sind bis zum Jahr 2020 auch bauliche Maßnahmen notwendig. In den Korridoren 4 und 6 werden alle Möglichkeiten ausgeschöpft, die Kapazität zu erhöhen. Im Korridor 8 wird ein Ausbau von 112 km Länge vorgeschlagen.

Im Korridor 4 stehen dem Modell Geschwindigkeitserhöhungen auf 752 km zur Verfügung. Dafür sind gut 4 PJ aufzuwenden, also etwa 5.300 GJ/km. Überholgleise werden auf 305 km mit einem Aufwand von 0,2 PJ (655 GJ/km) vorgeschlagen. Ein Zubau von Gleisen ist in diesem Korridor auf 40 km und Neubaustrecken sind mit einer Länge von 252 km vorgesehen. Die Neubaustrecken benötigen einen Energieaufwand von 21,85 PJ, das sind 86.700 GJ/km. Für den Neubau ist der KEA erheblich höher als für die anderen Maßnahmen.

Wie im Jahr 2005 werden auch 2020 im Korridor 6 geschwindigkeitserhöhende Maßnahmen vorgesehen. Insgesamt sind für die Geschwindigkeitserhöhung 461 km vorgesehen (Schienenwegeausbauplan, [Bundestag97a]). Für diese Projekte müssen 0,78 PJ (1.690 GJ/km) aufgewendet werden. Ebenfalls sollen auf 84 km Überholgleise eingebaut werden. Der KEA beträgt für diese Projekte 0,054 PJ, das sind 640 GJ/km. Als Neubau sind Projekte mit einer Länge von insgesamt 128 km vorgesehen. Der KEA für die Neubauten beträgt etwa 6 PJ, also 47.000 GJ/km. Für die Ausbauprojekte im Korridor 8 mit einer Länge von 112 km wird ein KEA von etwa 1,55 PJ (13.900 GJ/km) benötigt.

Straßenprojekte

Im Straßenverkehr sinkt zum Teil die Belastung bis zum Jahr 2005 gegenüber 1989. Dadurch und durch die im Modell angenommene zeitliche Entzerrung der Spitzenbelastung wird Kapazität frei. Das Modell nützt diese zur Erhöhung der Geschwindigkeit bzw. Verkehrsqualität, benötigt aber für diese nicht nur die freie Kapazität, sondern zusätzliche. Daher kommt es auch ohne Steigerung der Fahrleistung zu Straßenneubauten. Zwar sind diese je neugeschaffener Kapazität teurer als die Einrichtung von Telematikanlagen, aber sie stellen mit einer einzelnen Maßnahme wesentlich mehr Kapazität zur Verfügung als alle anderen Möglichkeiten und werden daher bevorzugt.

Tabelle 7.3: Kumulierter Energieaufwand und Emissionen der vom Infrastrukturmodell berechneten Bahnprojekte. Die spezifischen Werte sind auf die jeweilige Baulänge bezogen.

		Einheit	Projekte				
			K 6 (2005)	K 4 (2020)			
			Geschwindigkeits- erhöhung	Geschwindigkeits- erhöhung	Überhol- gleise	Neu- bau	Aus- bau
KEA		[GJ]	667.000	4.013.000	201.000	21.854.000	364.000
		[GJ/km]	2.300	5.300	660	86.700	18.200
Emissionen	CO ₂	[kt]	47	280	14	1.260	26
		[t/km]	165	374	46	4.980	1.290
	CO	[t]	33	180	9,1	540	17
		[t/km]	0,11	0,24	0,03	2,1	0,84
	NO _x	[t]	107	568	26	4.490	60
		[t/km]	0,37	0,76	0,08	18	3,0
	SO ₂	[t]	83	450	27	3.370	28
		[t/km]	0,29	0,60	0,09	13	1,4
	CH ₄	[t]	24	160	11	800	5,8
		[t/km]	0,09	0,2	0,03	3,2	0,3
KWS	[t]	12	58	1,8	380	8,6	
	[t/km]	0,04	0,08	0,006	1,5	0,43	
			K 6 (2020)				
			Geschwindigkeits- erhöhung	Überhol- gleise	Neu- bau	Aus- bau	
KEA		[GJ]	780.000	54.000	6.016.000	80.500	
		[GJ/km]	1.700	640	47.000	8.050	
Emissionen	CO ₂	[kt]	55	3,9	330	5,9	
		[t/km]	120	47	2.600	590	
	CO	[t]	37	2,2	180	3,3	
		[t/km]	0,08	0,03	1,4	0,33	
	NO _x	[t]	120	7,9	1.030	12	
		[t/km]	0,27	0,09	8,8	1,2	
	SO ₂	[t]	91	3,7	960	5,4	
		[t/km]	0,20	0,04	7,5	0,54	
	CH ₄	[t]	26	0,67	290	1,0	
		[t/km]	0,06	0,008	2,3	0,10	
KWS	[t]	14	1,1	88	1,7		
	[t/km]	0,03	0,01	0,70	0,17		

Eine Übersicht über die straßenbaulichen Maßnahmen mit auf die Baulänge bezogenen KEA- und Emissionswerten zeigt Tabelle 7.4.

Projekte bis zum Jahr 2005 Die Prognose, die dem Infrastrukturmodell zu Grunde liegt, basiert auf der Annahme eines starken Anstiegs des West-Ost-Verkehrs. Daher wird für das Jahr 2005 vor allem die Erweiterung der Korridore 1/20 und 4 vorgeschlagen. Dabei sind die bedeutendsten Projekte der Neubau der „Ostseeautobahn“ A 20 und der A 38, die zwischen Kassel und Halle/Leipzig parallel zur A 4 verläuft.

Der Neubau der A 20 soll 413 km umfassen und mehr als 5,5 Mrd DM kosten. Er benötigt einen KEA von 31,96 PJ, also mit 77.370 GJ/km fast das 1,5-fache der durchschnittlichen bituminösen Autobahn. Dazu tragen insbesondere mehrere Großbauwerke, wie die Talbrücken Triwalk und Greese und die Mühlenbachbrücke bei Wismar und die Elbquerung bei. Das Hauptneubauprojekt im Korridor 4 ist die A 38. Sie führt zwischen Harz und Thüringer Wald von Kassel und Göttingen nach Leipzig. Insgesamt müssen für diesen Neubau 16 PJ, das sind 82.900 GJ/km, aufgewendet werden. Dieser hohe Wert entsteht vor allem durch die notwendigen Großbauwerke und die aufwendige Linienführung in einer Mittelgebirgslandschaft. Die Neubauprojekte im Korridor 8 benötigen, inklusive eines Tunnelprojekts, 12,33 PJ (89.300 GJ/km). Durch die Topologie ist ein höherer Anteil an Tunneln (im Durchschnitt ein Tunnel pro 17 km) und Brücken (eine Talbrücke pro 4,4 km) nötig, dies macht sich im höheren KEA bemerkbar.

Projekte bis zum Jahr 2020 Da sich nach der Annahme im Modell bis zum Jahr 2020 die Verkehrsspitzen auf den Autobahnen entzerren (s. Kapitel 4.2.2, S. 50), werden die Neubauten, die für das Jahr 2005 vom Modell vorgeschlagen werden, für 2020 nicht mehr vorgesehen. Das heißt, die Neubauprojekte werden aus langfristiger Perspektive nach den Modellergebnissen nicht benötigt. Im Korridor 1/20 ist nur noch ein minimaler Neubau vorgesehen, während im Korridor 4 die Einführung von Telematikanlagen zur Kapazitätserhöhung ausreicht.

Ein Vergleich von KEA und Emissionen zwischen Straße und Schiene ist durch die unterschiedlichen Fahr- und Verkehrsleistungen nur dann sinnvoll, wenn man den Herstellungsaufwand auf diese Leistungsgrößen bezieht. Dieser Vergleich wird mit den für die Korridore aggregierten Werten im nächsten Abschnitt durchgeführt.

Tabelle 7.4: Kumulierter Energieaufwand und Emissionen der vom Infrastrukturmodell berechneten Straßenprojekte. Die spezifischen Werte sind auf die jeweilige Baulänge bezogen.

		Einheit	Projekte		
			K 1/20	K 4	K 8
			Neubau	Neubau	Neubau
KEA		[PJ]	32	16	12
		[GJ/km]	77.400	83.000	89.000
Emissionen	CO ₂	[kt]	1.300	450	610
		[t/km]	3.040	2.300	4.400
	CO	[t]	780	430	360
		[t/km]	1,9	2,2	2,6
	NO _x	[t]	4.500	2.800	2.300
		[t/km]	11	14	16
	SO ₂	[t]	2.500	1.900	1.400
		[t/km]	6,2	9,7	10,2
	CH ₄	[t]	440	530	330
		[t/km]	1,1	2,8	2,4
	KWS	[t]	500	240	190
		[t/km]	1,2	1,2	1,4

7.1.4 Vergleich von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen durch den Ausbau von Straßen- und Schienennetz

Im Folgenden wird ein Vergleich des KEA und der Emissionen von verschiedenen Ausbauprojekten hinsichtlich der zusätzlichen Kapazität, Fahr- und Verkehrsleistung gezogen. Daher werden die Straßenbaumaßnahmen des Jahres 2005 im Korridor 8 und die Straßenbauprojekte des Jahres 2020, die der Verbesserung des Verkehrsflusses dienen (Tabelle 7.2), nicht betrachtet.

Aus dem Bezug auf die Baulänge wie im vorhergehenden Abschnitt kann nicht geschlossen werden, welcher KEA und welcher Emissionsaufwand für eine größere Kapazität notwendig sind. Für einen Vergleich zwischen Aufwendungen für Straße und Schiene sind drei Bezugsgrößen möglich:

- Die zusätzlich durch die Projekte bereit gestellte Kapazität,
- die zusätzliche Fahrleistung, die den Ausbau bewirkt, und
- die zusätzliche Verkehrsleistung, die letztendlich die Nachfrage ist, die in die Fahrleistung umgesetzt wird.

Die Projekte des Straßen- und Schienennetzausbaus werden in den folgenden Absätzen auf die genannten Größen bezogen und verglichen. Bei diesen Vergleichen werden der KEA und die Emissionen jeweils auf die angenommene Lebensdauer von 80 Jahren umgerechnet und auf die Fahr- oder Verkehrsleistungen eines Jahres bezogen. Die Werte für Energieeinsatz und Emissionen des Betriebs stammen dabei aus den Optimierungsrechnungen.

KEA und Emissionen der Verbesserungen im Betriebsablauf werden sowohl bei der Bahn als auch bei der Straße (Telematik) nicht betrachtet, da sie im Vergleich zum Aufwand der Bauprojekte gering sind (s. S. 27).

Vergleich von KEA und Emissionen in Bezug auf die zusätzliche Kapazität

Fasst man KEA und Emissionen der baulichen Maßnahmen für die Korridore zusammen, erhält man für die Schienenprojekte bezogen auf die Projektlängen sehr unterschiedliche Werte. Sie reichen von 660 GJ/km bis 86.700 GJ/km (Tabelle 7.3). Die Vielfalt der ausgewählten Schienenprojekte ist größer als bei den Autobahnen. Sie umfassen den Einbau von Überholgleisen, Maßnahmen zur Geschwindigkeitserhöhung und den Zu- und Neubau von Gleisen. Für den Ausbau des Straßennetzes sind nur Neubauprojekte vorgesehen (Tabelle 7.4), so dass die spezifischen KEA- und Emissionswerte der Projekte jeweils in der gleichen Größenordnung liegen. In den Korridoren sind für die Bahn eine Vielzahl von unterschiedlichen Maßnahmen vorgesehen. Bei den folgenden Rechnungen sind die mit sehr unterschiedlichem KEA verbundenen Maßnahmen für die Korridore jeweils zusammengefasst. Daher ergeben sich auch bei den spezifischen Werten für die Schienenwegeprojekte erhebliche Variationen.

Die Kapazität wird in diesem Abschnitt als mögliche Fahrleistung in Fahrzeugkilometern pro Jahr angegeben und ist mit der zusätzlichen Kapazität durch die vorgesehenen baulichen Maßnahmen identisch. Die auf die Kapazität bezogenen KEA-Werte der beiden Autobahnneubauten liegen nahe beieinander. Sie haben eine Abweichung von höchstens 7 % (Tabelle 7.5), da sowohl die neue Kapazität bei den Neubauten, als auch der KEA zu ihrer Herstellung sehr ähnlich sind.

Die auf die zusätzliche Kapazität bezogenen KEA- und Emissionswerte für den Schienenwegebau differieren wesentlich stärker als beim Straßenbau. Dies ist durch die Unterschiede der Projekte und vor allem ihrer Wirkung bedingt. Den höchsten Kapazitätswachstum bei der Bahn je eingesetztem KEA erhält man durch die Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit in Korridor 6 für das Jahr 2005. Der größte KEA entsteht im Korridor 4 für das Jahr 2020, in dem alle Möglichkeiten genutzt werden müssen, um der Spitzenbelastung genug Kapazität zu bieten.

Der KEA ist bezogen auf die zusätzliche Kapazität für den Ausbau des Schie-

Tabelle 7.5: Ergebnisdarstellung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen der für die Korridore berechneten Projekte in Bezug auf die zusätzliche Kapazität

	Einheit	Straße		Schiene		
		K 1/20 (2005)	K 4 (2005)	K 6 (2005)	K 4 (2020)	K 6 (2020)
zusätzliche Kapazität	[Mrd Fzgkm]	3,58	1,908	0,0746	0,1169	0,0766
KEA	[kJ/Fzgkm]	112	105	1.950	9.700	4.940
CO ₂	[g/Fzgkm]	4,5	3,0	140	580	280
CO	[g/Fzgkm]	0,003	0,003	0,1	0,3	0,2
NO _x	[g/Fzgkm]	0,02	0,02	0,3	1,9	0,8
SO ₂	[g/Fzgkm]	0,009	0,01	0,2	1,4	0,8
CH ₄	[g/Fzgkm]	0,002	0,003	0,07	0,4	0,2
KWS	[g/Fzgkm]	0,002	0,002	0,03	0,2	0,08

nennetzes etwa 20- bis 100-fach höher als beim Ausbau des Straßennetzes. Der kapazitive Ausbau der Netze erfolgt jedoch durch unterschiedliche Zuwächse an Fahrleistung. Das heißt, auch ein geringer Zuwachs an Fahrleistung kann eine umfangreiche Maßnahme auslösen. Daher kann es vorkommen, dass Überkapazitäten in den einzelnen Korridoren entstehen. Besonders für die Straßenneubauten gilt dies, da schon durch geringe Steigerungen der Fahrleistung Neubauten im Modell verursacht werden.

Vergleich von KEA und Emissionen in Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung

Die Größe, die den Ausbau der Netze im Infrastrukturmodell auslöst, ist die zusätzliche Fahrleistung. Sie ist die Differenz der Fahrleistung des Stützjahres (2005 oder 2020) und der Fahrleistung von 1989 im jeweiligen Korridor. Die zusätzliche Fahrleistung findet in der Realität nicht nur auf der neugebauten, sondern zum Teil auch auf der vorhandenen, noch freien Kapazität statt. Für diese Darstellung wird dennoch der Bezug so hergestellt, als ob die gesamte zusätzliche Fahrleistung auf der neugeschaffenen Kapazität stattfindet (s. Tabelle 7.6).

Durch die vorgeschlagenen Autobahnneubauten wird mehr Kapazität geschaffen, als durch die zusätzliche Fahrleistung benötigt würde. Bezieht man also den Energieaufwand und die Emissionen der Projekte auf die tatsächliche zusätzliche Fahrleistung, erhält man bei den Autobahnneubauten höhere Werte als in Bezug auf die Kapazität. Bei den Schienenwegebauten sind die Werte dagegen kleiner als in Bezug auf die Kapazität. Das bedeutet, dass die neue Kapazität

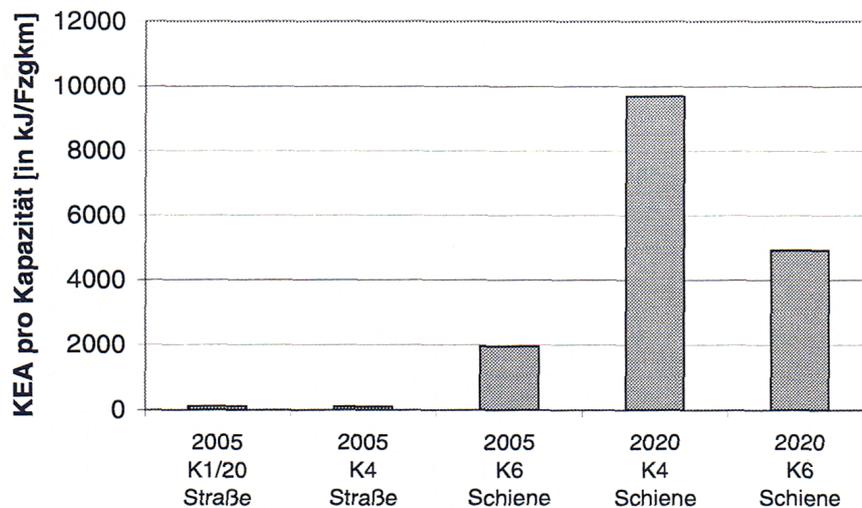


Abbildung 7.4: Ergebnisdarstellung des kumulierten Energieaufwands der Maßnahmen in Bezug auf die Kapazität. Die Schienenprojekte sind rechts eingetragen. Je Kapazität, die in zusätzlich möglicher Fahrleistung ausgedrückt ist, ist bei ihnen der Energieaufwand um das 100-fache höher.

vollständig genutzt wird und dass ein Teil des Zuwachses der Fahrleistung bei der Bahn nicht auf der neuen, sondern auf der schon vorhandenen, noch freien Kapazität stattfindet. Durch die Überkapazitäten, die im Autobahnnetz durch die ausgewählten Neubauten entstehen, ist der KEA in Bezug auf die Kapazität niedriger als im Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung. Im Bezug auf die Fahrleistung verringert sich die Differenz der spezifischen KEA-Werte von Autobahn- und Schienennetzausbau erheblich.

Die auf die zusätzliche Fahrleistung bezogenen Werte variieren bei beiden Netzen stärker als in Bezug auf die Kapazität. Das heißt, die Zuwächse an Fahrleistung verursachen beim Autobahnnetz zwar in beiden Fällen Neubauten, schöpfen die neue Kapazität aber unterschiedlich stark aus. Noch stärker als bei den Straßenprojekten differieren die Werte bei den Schienenprojekten in Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung. Der Unterschied zwischen den Korridoren, der schon für die Werte in Bezug auf die Kapazität deutlich war, tritt beim Bezug auf die Fahrleistung noch stärker hervor. Je nach Belastung eines Korridores und vorhandener freier Kapazität löst schon ein geringer Anstieg der Fahrleistung eine Fülle von Maßnahmen aus, insbesondere im Korridor 6 im Jahr 2020 und im Korridor 4. Hier ist die Infrastruktur zwischen der ehemaligen DDR und der Bundesrepublik unterbrochen gewesen und wird mit einer Fülle von Projekten erneuert. Die Fahrleistung der Bahn steigt in diesem Korridor stärker als die Kapazität, so dass der Unterschied zwischen fahrleistungs- und kapazitätsbezogenem Wert größer als bei anderen Korridoren ist.

Tabelle 7.6: Ergebnisdarstellung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen der für die Korridore berechneten Projekte in Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung

	Einheit	Straße		Schiene		
		K 1/20 (2005)	K 4 (2005)	K 6 (2005)	K 4 (2020)	K 6 (2020)
zusätzliche Fahrleistung	[Mrd Fzgkm]	2,87	1,08	0,0702	0,1867	0,0896
KEA	[kJ/Fzgkm]	140	190	119	1.800	970
CO ₂	[g/Fzgkm]	5,5	5,2	8,4	106	56
CO	[g/Fzgkm]	0,003	0,005	0,006	0,05	0,03
NO _x	[g/Fzgkm]	0,02	0,03	0,02	0,34	0,16
SO ₂	[g/Fzgkm]	0,01	0,02	0,02	0,26	0,15
CH ₄	[g/Fzgkm]	0,002	0,006	0,004	0,07	0,04
KWS	[g/Fzgkm]	0,002	0,003	0,002	0,03	0,02

Die auf die zusätzliche Fahrleistung bezogenen Werte variieren also stärker als die Werte, die auf die neue Kapazität bezogen werden. Dennoch ist die Bezugsgröße Fahrleistung vorzuziehen, da die neue Kapazität *auf Grund* dieser zusätzlichen Fahrleistung vorgeschlagen wird. Beim Vergleich von Bahn und Straße lässt sich feststellen, dass die Bahnprojekte erheblich besser ausgenutzt werden als die hier vorgeschlagenen Straßenprojekte.

Vergleich von KEA und Emissionen in Bezug auf die zusätzliche Verkehrsleistung

Die eigentliche Nachfrage- und damit Zielgröße ist allerdings die Verkehrsleistung. Der Vergleich von KEA und Emissionen für den Ausbau der Netze ist durch die Nachfrageorientierung des Optimierungsmodells in Relation zur Verkehrsleistung am aussagekräftigsten (Tabelle 7.7, Abbildung 7.5).

Durch die unterschiedlichen Besetzungszahlen ist der spezifische KEA für die Bahnprojekte geringer als für die Straßenprojekte². Die zusätzliche Verkehrsleistung wird errechnet, indem die zusätzliche Fahrleistung mit der Besetzungszahl des jeweiligen Verkehrsträgers multipliziert wird.

Durch die höhere Besetzungszahl beträgt der spezifische KEA, um die notwendige Infrastruktur für eine zusätzliche Nachfrageeinheit zu schaffen, bei der Bahn zwischen 2 und 5 % des KEA, der im Straßenbau benötigt wird. Für die Emissionen gilt das nicht, durch den Bahnbau verursachte Emissionen machen in Bezug auf die Verkehrsleistung 3 bis 13 % der Werte für den Straßenbau aus. Das

²Bahn: 400 Personen/Fahrzeug, Pkw: 1,47 Personen/Fahrzeug, jeweils Fernverkehr

Tabelle 7.7: Ergebnisdarstellung von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen der für die Korridore berechneten Projekte in Bezug auf die zusätzliche Verkehrsleistung

	Einheit	Straße		Schiene		
		K 1/20 (2005)	K 4 (2005)	K 6 (2005)	K 4 (2020)	K 6 (2020)
zusätzliche Verkehrsleistung	[Mrd Pkm]	4,20	1,58	28,096	74,688	35,832
KEA	[kJ/Pkm]	95	130	0,3	4,4	2,4
CO ₂	[mg/Pkm]	3.700	3.500	21	260	140
CO	[mg/Pkm]	2	3	0,02	0,13	0,08
NO _x	[mg/Pkm]	13	22	0,05	0,9	0,04
SO ₂	[mg/Pkm]	8	15	0,04	0,65	0,04
CH ₄	[mg/Pkm]	1	4	0,01	0,2	0,1
KWS	[mg/Pkm]	1	2	0,005	0,08	0,04

Verhältnis der spezifischen Emissionen von Bahn- zu Straßenausbau ist also etwas etwas größer als beim KEA. Das heißt, je eingesetzter Energie sind die Emissionen beim Ausbau der Bahn höher. Im Straßenbau ist ein großer Teil des KEA dem nicht-energetisch eingesetzten Energieinhalt des Bitumens zuzuschreiben. Durch ihn entstehen keine Emissionen, so dass im Straßenbau die Emissionen je Energieeinsatz geringer sind als im Schienenwegebau. Daraus folgt, dass das Verhältnis Emissionen aus dem Bahnbau zu Emissionen aus dem Straßenbau größer ist als das Verhältnis der Energieaufwendungen.

Es ist festzustellen, dass für die zusätzliche Nachfrage beim Ausbau des Bahnnetzes der KEA und die Emissionen wesentlich geringer sind als beim Ausbau des Autobahnnetzes. Allerdings muss beachtet werden, dass dieses Ergebnis nur für die in dieser Arbeit berechnete Iterationslösung gilt. Sollten sich die Besetzungszahlen oder die Kosten anders entwickeln, als im Optimierungsmodell angenommen, so ergibt sich eine andere Optimierungslösung und damit auch andere Anforderungen an die Infrastruktur, so dass besonders die hier wiedergegebenen spezifischen Ergebnisse nicht ohne weiteres verallgemeinert werden können.

Ein Vergleich des KEA der Herstellung zum Energieeinsatz der Nutzung wird in Kapitel 7.1.5 gezogen.

Zusammenfassung

- In Bezug auf die zusätzliche Kapazität sind KEA und Emissionen des Ausbaus des Straßennetzes erheblich niedriger (um den Faktor 10 bis 100) als beim Ausbau des Schienennetzes.

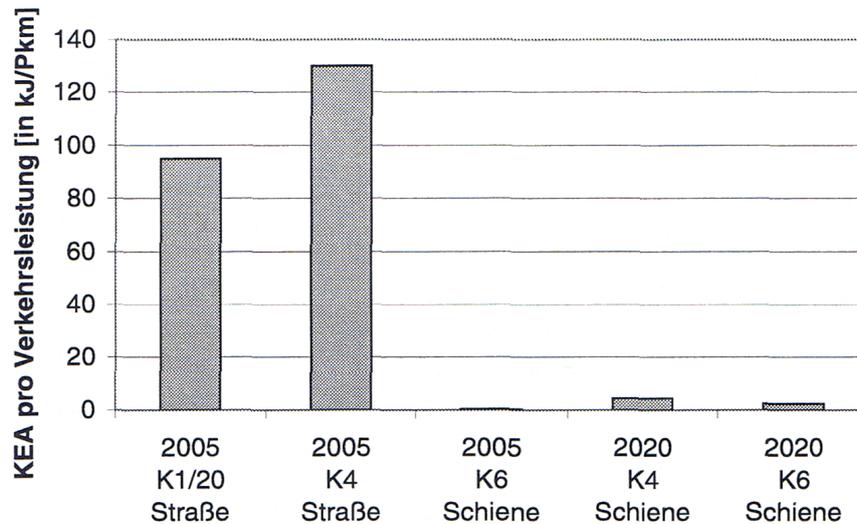


Abbildung 7.5: Ergebnisdarstellung des kumulierten Energieaufwands der Maßnahmen in Bezug auf die zusätzliche Verkehrsleistung. Die Verkehrsleistung ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen Straße und Schiene.

- In Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung sind KEA und Emissionen des Ausbaus des Straßennetzes niedriger (um den Faktor 1 bis 10) als beim Ausbau des Bahnnetzes. Die spezifischen KEA- und Emissionswerte des Schienenausbaus variieren bei dieser Bezugsgröße erheblich zwischen den einzelnen Korridoren.
- In Bezug auf die zusätzliche Verkehrsleistung sind KEA und Emissionen des Ausbaus des Straßennetzes erheblich höher (um den Faktor 20 bis 400) als der Ausbau des Schienennetzes. Dies ist auf die hohe Besetzungszahl im Schienenfernverkehr zurückzuführen.

Die spezifischen Ergebnisse können nicht verallgemeinert werden. Sie gelten im Rahmen der für diese Rechnungen definierten Bedingungen. Die Variationsbreite der Ergebnisse zeigt, in welchem Maße die Aussagen allgemeingültig sind: In Bezug auf Kapazität oder Fahrleistung sind KEA und Emissionen des Straßennetausbaus niedriger als beim Schienennetausbau, in Bezug auf die Verkehrsleistung sind KEA und Emissionen des Ausbaus des Schienennetzes geringer.

7.1.5 Emissionen und Energieeinsatz bei Ausbau und Nutzung der Infrastruktur

Aus dem Ergebnis der Rechnungen mit Optimierungsmodell und Infrastrukturmodell ist es möglich, konsistent KEA und Emissionen aus Ausbau und Nut-

zung der Infrastruktur zu berechnen. Mit dem Infrastrukturmodell werden KEA und Emissionen des Ausbaus ermittelt; mit dem Optimierungsmodell werden der Primärenergieeinsatz und die Emissionen des Verkehrs berechnet. Durch den Vergleich dieser Ergebnisse kann die Verminderung von Energieeinsatz und Emissionen abgeschätzt werden, wenn der Verkehrssektor in dem Maße umstrukturiert wird, wie es die Optimierungslösung zeigt. Zusätzlich kann die Bedeutung von KEA und Emissionen durch den Ausbau eingeschätzt werden. Das Verhältnis vom KEA des Ausbaus zum Primärenergieaufwand der Nutzung und das Verhältnis der Emissionen von Ausbau und Nutzung sind in Tabelle 7.8 und Abbildung 7.6 angegeben. Dabei werden die Brennstoffketten³ anhand des Optimierungsmodells bei Energie und Emissionen berücksichtigt.

Der Modal Split, also die Aufteilung auf die Verkehrsträger, ist in den Basis- und Reduktionsszenarien gleich. Daher ist auch der durch die Iterationen vom Infrastrukturmodell berechnete Ausbau in den Szenarien gleich. Die mit dem Modal Split verbundene Strukturänderung hat eine erhebliche Verminderung der CO₂-Emissionen zur Folge; weitere Verminderungen in den Reduktionsszenarien können nur den Änderungen der Antriebstechniken und nicht der Umstrukturierung des Verkehrssektors zugeschrieben werden.

Die Strukturänderung im Verkehrssektor ist, so wie sie im Optimierungsmodell berechnet wird, mit einem starken Ausbau des Fernschienennetzes verknüpft. Es stellt sich die Frage, ob durch diesen starken Ausbau nicht zunächst mehr CO₂ emittiert als reduziert wird. Beim bis zum Jahr 2020 stattfindenden Ausbau werden über 111.000 kt CO₂ emittiert. Dem steht im Jahr 2020 eine Verminderung im Verkehrssektor relativ zum Jahr 1989 von knapp 74.000 kt CO₂/a gegenüber. Wenn man aber die Emissionen der Herstellung auf die 80 Jahre Lebensdauer der Verkehrswege aufteilt, so erhält man pro Jahr etwa 1.420 kt CO₂/a, so dass die Reduktion im Jahr 2020 etwa das 50-fache der Bauemissionen beträgt.

Energetische Amortisationszeit

Unter der energetischen Amortisationszeit wird die Dauer verstanden, nach der der Energieausstoß einer Energiewandlungsanlage den Herstelleraufwand kompensiert hat. Eine Annäherung an diesen Begriff kann in Bezug auf Infrastrukturanlagen erreicht werden, indem man die Zeit berechnet, nach der der Energieeinsatz in der Nutzung der Infrastruktur genauso hoch ist, wie der KEA zu ihrer Herstellung. Beim Straßenbau liegt dieser Wert im Bereich von vier bis acht Jahren, bei der Schiene zwischen zwei Monaten und 1,5 Jahren. Die Grundlage zu dieser Berechnung sind oben genannte Ausbauprojekte und die entsprechenden Fahrlei-

³Die Brennstoffkette umfasst im Rahmen des IKARUS-Projektes den Weg des Energieträgers vom Primärenergieimport bis zur Nutzenergie. Speziell zählen dazu auch Verluste zum Beispiel durch die Raffinierung oder Stromerzeugung, die hier berücksichtigt werden.

Tabelle 7.8: Ergebnisdarstellung des Verhältnisses von kumuliertem Energieaufwand und Emissionen des Infrastrukturausbaus zu Energieeinsatz und Emissionen durch die zusätzliche Fahrleistung. Unter „zusätzliche Fahrleistung“ ist der KEA der Herstellung zum Energieeinsatz durch zusätzliche Fahrleistung bzw. das Emissionsverhältnis eingetragen, unter „durchschnittliche Fahrleistung“ das gleiche Verhältnis bei durchschnittlicher Nutzung. (Bei leeren Feldern sind die Emissionen der Nutzung trotz zusätzlicher Fahrleistung zurückgegangen.)

	2005				2020	
	Straße		Schiene		Schiene	
	zusätzliche Fahrleistung	durchschnittliche Fahrleistung	zusätzliche Fahrleistung	durchschnittliche Fahrleistung	zusätzliche Fahrleistung	durchschnittliche Fahrleistung
KEA	1:22	1:43	1:1.000	1:1.100	1:63	1:39
CO ₂	1:45	1:87	1:680	1:754	1:47	1:29
CO	1:237	1:464	1:200	1:219		1:33
NO _x	1:38	1:74	1:250	1:275		1:11
SO ₂	1:0,5	1:1	1:540	1:594		1:4
CH ₄	1:8	1:16	1:15	1:16	1:1	1:0,7
KWS	1:15	1:29	1:43	1:47		1:2

stungen. Wäre die Autobahn bis an die Kapazitätsgrenze belastet, so würde die Amortisationszeit bei ca. einem Jahr liegen und für die Bahn nur bei 2 Monaten.

Verhältnis von Ausbau- zu Nutzungsaufwendungen

Beim Ausbau der Fernverkehrsstraßen ist das Verhältnis zwischen Ausbaufwendungen und Nutzungsaufwendungen größer als bei der Bahn (Tabelle 7.8). Durch die bereits jetzt hohe Auslastung der Autobahnen werden schon bei einer geringen Erhöhung der Fahrleistung Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung durch das Infrastrukturmodell veranlasst. Die eingesetzten Projekte werden vom Modell vor allem nach dem Kriterium der geringsten Kosten je neugeschaffener Kapazität ermittelt. Die zusätzliche Fahrleistung und der entsprechende Energieeinsatz sind demnach gering, dagegen sind die Projekte umfangreich und der für sie aufzubringende KEA hoch. Entsprechend ist auch das Verhältnis vom KEA des Ausbaus zum Energieeinsatz der Nutzung größer als bei der Bahn. Die Bezugsgrößen für die Werte in der Tabelle 7.8 sind die zusätzlichen Fahrleistungen.

Ein weiterer Bezug wird zur durchschnittlichen Fahrleistung, die auf den Autobahnen herrscht, hergestellt. Die durchschnittliche Fahrleistung liegt in Deutschland im Jahr 1997 bei etwa 17 Mio Fztkm/km (Fahrzeugkilometer je Kilometer Autobahn). Dieser Wert ist höher als die zusätzliche Fahrleistung, somit ist das Verhältnis Herstellung zu Nutzung (Spalte „durchschnittliche Fahrleistung“) im Bereich des Straßenbaus kleiner als im Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung. Im Verhältnis Ausbaufwendungen zu Nutzungsaufwendungen ist der Anteil der Ausbaufwendungen bei Anrechnung der durchschnittlichen Fahrleistung noch marginaler als bei Bezug auf die zusätzliche Fahrleistung. Bei der Bahn ergibt sich eine leichte Erhöhung des Verhältnisses, da der Teil der zusätzlichen Fahrleistung nicht angerechnet wird, der nicht auf den neu entstandenen Kapazitäten erbracht wird.

Im Jahr 2020 ist das Verhältnis Ausbaufwand zu Nutzungsaufwand bei der Bahn größer als im Jahr 2005, da ein erheblicher Ausbau stattfinden muss, um die vom Optimierungsmodell berechnete Fahrleistung aufzunehmen. Die zusätzliche Fahrleistung bis 2005 kann noch in großen Teilen auf der schon vorhandenen freien Kapazität stattfinden, die aber bei der nochmaligen starken Erhöhung bis 2020 erschöpft ist. Daher muss im Jahr 2020 je zusätzlicher Fahrleistung ein umfangreicherer Ausbau erfolgen als im Jahr 2005, der die Aufwendungen für die Herstellung erhöht.

Das Verhältnis der Emissionen von Ausbau zu Nutzung unterscheidet sich vom Energieverhältnis. Dies ist auf die unterschiedliche Art des Energieeinsatzes und die daraus folgenden Emissionen beim Bau der Verkehrswege und bei den Fahrzeugen zurückzuführen. Das heißt, beim Ausbau werden andere Energieträger eingesetzt als bei der Nutzung und bei der Stromerzeugung für die Bahn. Da-

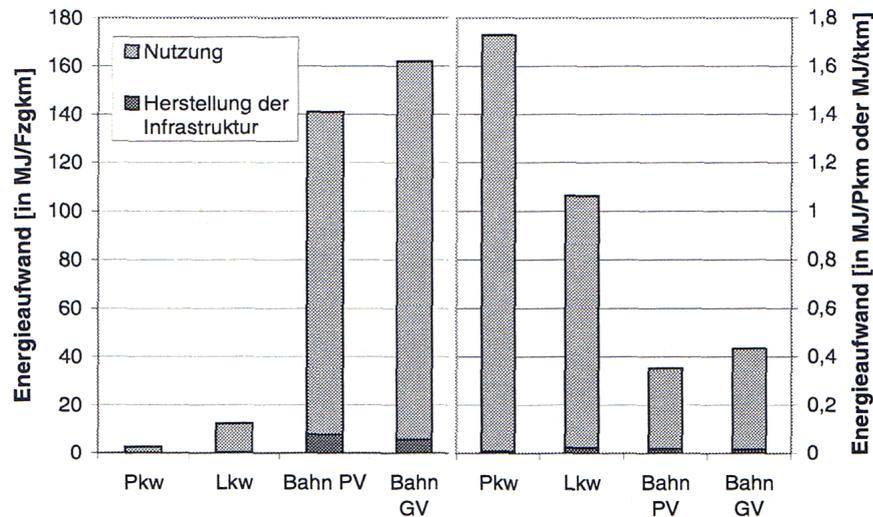


Abbildung 7.6: Ergebnisdarstellung des kumulierten Energieaufwands der Herstellung und des Energieeinsatzes der Nutzung der Infrastruktur. Im rechten Teil des Diagramms ist der Energieaufwand auf die Verkehrsleistung im Fernverkehr bezogen, im linken Teil auf die Fahrleistung.

her fallen in allen drei Bereichen je eingesetzter Energie auch unterschiedliche Emissionen an. Im Straßenverkehr fallen je eingesetzter Energie hohe und im Umwandlungssektor bei der Stromerzeugung für die Bahn geringere Emissionen an. Daher werden die Emissionsverhältnisse bei der Straße kleiner und bei der Bahn größer als das Energieverhältnis Ausbau zu Nutzung. Zu beachten ist allerdings, dass die Emissionen außer CO_2 unsichere Werte sind.

Emissionsreduktion im Verkehrssektor unter Einbeziehung des Infrastrukturausbaus

Um einschätzen zu können, welche Emissionen durch die vorgeschlagene Strukturänderung im Fernverkehr tatsächlich vermieden werden, ist es notwendig, von den Reduktionen, die vor allem durch die Verlagerung auf die Bahn und den Wechsel in der Technik erreicht werden, die Emissionen, die durch den Bau der Infrastruktur hinzukommen, abzuziehen. Rechnet man die Emissionen durch die Umwandlung von Primär- in Endenergieträger noch hinzu, so erhält man die netto erbrachte Verminderung im Fernverkehr. Diese ist in Tabelle 7.9 in Anteilen an den Emissionen von 1989 angegeben.

Für 2005 unterscheiden sich die Ergebnisse für die Emissionsverminderungen ohne und mit Reduktionsforderung nur geringfügig, mit Ausnahme der SO_2 -Emissionen (Tabelle 7.9). Dieser Effekt wird durch die Änderung der Stromerzeu-

Tabelle 7.9: Ergebnis der Strukturänderung der Jahre 2005 und 2020 im Verkehrssektor gegenüber 1989: Verminderung der CO₂-Emissionen unter Einrechnung der Emissionen aus Kraftstoff-/ Endenergieherstellung und aus dem Infrastrukturausbau. Angaben in % der Werte von 1989 für das gesamte heutige Bundesgebiet, die Bezeichnung „RED“ bezieht sich auf die Reduktionsszenarien aus Kapitel 6.

	2005	2005 (RED)	2020	2020 (RED)
	[%]	[%]	[%]	[%]
CO ₂	9	9	48	66
CO	86	86	97	98
NO _x	66	66	85	90
SO ₂	50	61	83	89
CH ₄	72	72	97	98
KWS	84	84	96	97

gung zwischen den beiden Szenarien verursacht. Bei einer Reduktionsforderung wird weniger Kohle zur Stromerzeugung eingesetzt als im Basisszenario. Durch den Strombezug der Bahn findet man den daraus folgenden Effekt in der vorgelagerten Kette des Verkehrssektors⁴.

Die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen für das Jahr 2020 sind nur durch wenige Einschränkungen für den Verkehrssektor beeinflusst. Daher kann ein erheblicher Teil des Fernverkehrs von der Straße auf die Schiene verlagert werden⁵. Dieser Änderung im Modal Split sind etwa 80 % der gesamten CO₂-Reduktion im Basisszenario 2020 zuzuschreiben, die restliche Verminderung wird durch den Wechsel von Antriebstechniken und durch die verbesserte vorgelagerte Brennstoffkette erreicht. Die CO₂-Emissionen des Infrastrukturausbaus sind gering, da sie auf die gesamte Lebensdauer der Infrastruktur umgerechnet werden. Bei den anderen betrachteten Emissionen ist der Reduktionsanteil, der durch einen Wechsel oder eine Verbesserung der Technik verursacht wird, erheblich größer und macht zum Beispiel bei SO₂ etwa die Hälfte der Verringerung aus. Alle anderen Reduktionen sind durch die Änderung des Modal Split bedingt.

Bei einem Wechsel der Verkehrsträger im Zuge von Reduktionsmaßnahmen konterkarieren KEA und Emissionen des Infrastrukturausbaus das Reduktionsergebnis nicht. Wie in Tabelle 6.1 (Seite 104) gezeigt wurde, haben die Infrastrukturkosten bei der Bahn einen erheblichen Anteil, können aber das Ergebnis nicht so beeinflussen, dass ein Wechsel zu anderen Verkehrsträgern günstiger wäre. Der entscheidende Faktor, der das Ergebnis der Modal Split-Verschiebung bestimmt, ist die vorhandene Kapazität und die Ausbaupkapazität.

⁴(siehe hierzu Abschnitt 6.2.3 auf Seite 98)

⁵Zur Realisierbarkeit dieses Ergebnisses s. S. 94.

Zusammenfassung

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Ergebnisse aus Optimierungs- und Infrastrukturmodell zusammengeführt. Aus Ersterem stammen die Ergebnisse für die Nutzung und aus Letzterem die Ergebnisse für die Herstellung des Ausbaus der Verkehrsnetze. Im Einzelnen ergab sich:

- Die energetische Amortisationszeit beträgt bei den Straßenprojekten etwa vier bis acht Jahre, bei den Schienenprojekten 2 bis 18 Monate.
- Das Verhältnis des KEA des Ausbaus zum Energieeinsatz der Nutzung beträgt bei der Straße etwa 1:22, bei der Schiene im Jahr 2005 ca. 1:1.000 und im Jahr 2020 ca. 1:63.
- Bei den Emissionsreduktionen fallen in allen Szenarien die Emissionen durch den Ausbau der Infrastruktur nicht ins Gewicht.

Aus energetischer Sicht ist der Ausbau des Schienennetzes also günstiger als der Ausbau des Straßennetzes; KEA und Emissionen des Ausbaus sind jedoch gering im Vergleich zu Energieeinsatz und Emissionen der Nutzung.

7.2 Analyse der Eignung der Methoden

Die wesentlichen Methoden, die in dieser Arbeit verwendet oder entwickelt wurden sind

- die Materialbilanzmethode zur Bilanzierung des KEA und der Emissionen der Beispielprojekte,
- das Infrastrukturmodell zur Berechnung von geographisch gegliederten Belastungsdaten und Kapazitäten sowie des kapazitiven Ausbaus der Infrastruktur und
- das IKARUS-Optimierungsmodell, in das die Infrastrukturdaten eingehen, und das innerhalb der gegebenen Grenzen die kostenminimalen Techniken zusammenstellt.

In diesem Abschnitt sollen kurz die Vor- und Nachteile und die Eignung der Methoden aufgezeigt werden.

7.2.1 Materialbilanzmethode

Die Materialbilanzmethode zur Ermittlung des KEA ist für Bauprojekte ausreichend genau, da hier wenige Materialien mit großen Mengen die Bilanzen dominieren. Daher ist, bei einer ausreichend genauen Angabe der Materialmengen, die Analyse des KEA, wie die Fehlerrechnung zeigt (Abschnitt 3.2.2, S. 25), mit Hilfe der Materialbilanz sehr gut möglich. Bei den Bilanzen liegen die gleichen spezifischen Daten zu Grunde. Daher ist gewährleistet, dass die Beispielprojekte untereinander vergleichbar bilanziert werden können. Wie der Vergleich mit Literaturdaten des Straßenausbaus zeigt, ist die Methode zur Bilanzierung des KEA sehr gut geeignet. Problematischer stellt sich die Berechnung der Emissionen auf Grund der lückenhaften Daten, besonders der spezifischen Emissionen dar.

Dennoch ist das Hauptproblem der Berechnung von KEA und Emissionen die Frage, inwieweit die untersuchten Projekte verallgemeinert werden können. Für den Straßenbau ist Art und Anzahl der untersuchten Projekte für die Verallgemeinerung ausreichend, für die Schienenwegeprojekte konnten allerdings nur wenige Beispielprojekte berechnet werden. Insbesondere gibt es im Schienenwegebau eine wesentlich größere Vielfalt an Ausbaumaßnahmen als beim Autobahnbau, die vor allem in den meisten Projekten gemeinsam auftreten. Daher besteht weiterhin der Bedarf, den KEA beim Ausbau der Schienenwege anhand von zusätzlichen Beispielprojekten zu berechnen. Für die hier verfolgten Zwecke der Zuordnung von Kapazitäten zu Ausbaumaßnahmen und der Ermittlung ihres kumulierten Energieaufwands und der Emissionen genügten die durchgeführten Berechnungen.

Für die Materialbilanz konnte eine Fehlerrechnung durchgeführt werden, so dass die Sicherheit der Berechnung des KEA und der Emissionen der Projekte bekannt ist. Für das weitere Vorgehen ist eine Fehlerrechnung nicht sinnvoll, da es sich um Szenarienrechnungen handelt, bei denen die Sicherheit der Annahmen die Güte des Ergebnisses bestimmt.

7.2.2 Infrastrukturmodell

Der Zweck des Infrastrukturmodells, Ausbauprojekte der Verkehrsnetze zu berechnen, wenn die deutschlandweiten Fahrleistungen vom Optimierungsmodell gegeben sind, wird erfüllt. Kosten, KEA und Emissionen für diese Projekte werden berechnet und auf die zusätzliche Fahrleistung bezogen.

Die dazu notwendige Aufteilung auf Korridore ist bezüglich der Datenlage pragmatisch und spiegelt im Fernverkehr das Verkehrsverhalten bei der Wahl alternativer Routen wider. Die Berechnungsgrundlagen im Infrastrukturmodell sind durch die Prognose für den Bundesverkehrswegeplan für die Fernstraßen ausreichend. Dies gilt nicht für die Schienenwege. Daten für die geographische

Aufteilung des Bahnverkehrs werden analog zum Straßenverkehr gewählt. Unter dem Aspekt der Konkurrenz der beiden Verkehrsträger im Optimierungsmodell ist dies die bestmögliche Annahme.

Die Berechnung von Spitzenlast und Kapazität führt bei den Fernstraßen zu realistischen Ergebnissen, wie durch gute Übereinstimmung mit Messwerten der Autobahnzählstellen bestätigt werden kann. Für die zukünftige Entwicklung ist jedoch fraglich, ob die Annahme über die Entzerrung der Spitzenlast korrekt ist. Allerdings kann beobachtet werden, dass die Belastung zur Spitzenzeit langsamer als im Durchschnitt wächst. Für den Bahnverkehr wird die Spitzenlast analog zum Straßenverkehr geschätzt.

Das Infrastrukturmodell stellt Angaben über den notwendigen Fernverkehrsausbau als Folge geänderter Fahrleistungen bereit. Dabei kann es lediglich den Ausbau aus Kapazitätsgründen berechnen. Die Ergebnisse können in das Optimierungsmodell eingegliedert werden. Die Vorgehensweise, zunächst die kostengünstigsten einzelnen Maßnahmen auf ausreichende Kapazität zu untersuchen und erst dann Maßnahmenkombinationen zusammenzustellen, entspricht der Überlegung, dass es im Verkehrswegebau eher pragmatisch ist, ein einzelnes als eine Vielzahl von Projekten durchzuführen.

Für eine weitere Anwendung des Infrastrukturmodells ist es wünschenswert, die Annahmen zur geographischen Aufteilung des Bahnverkehrs mit entsprechenden Mess- und Prognosedaten zu präzisieren. Das Infrastrukturmodell beinhaltet ausschließlich den Fernverkehr. Ähnliche Überlegungen für den Nahverkehr sind nur schwer möglich, da es in diesem Bereich in der Regel nicht um kapazitive Erweiterungen, sondern um Erschließungsaufgaben geht. Dennoch sollte eine Untersuchung der vorhandenen Kapazität im Straßen- und Schienennahverkehr und der Ausbaumöglichkeiten genauere Eingangsdaten für das Optimierungsmodell liefern, als es in dieser Arbeit möglich ist.

Das Infrastrukturmodell ist gut geeignet, um zu gegebenen Fahrleistungen Kapazitäten und Kosten des Ausbaus als Eingangsdaten für das Optimierungsmodell zu berechnen. Zusätzlich berechnet es KEA und Emissionen des Ausbaus. Eine allgemeine Verwendung im Zusammenhang mit dem Optimierungsmodell ist jedoch durch die zeitraubenden Iterationen und die unübersichtliche Bedienung nicht zu empfehlen. Für die allgemeine Einbindung der Infrastruktur sollten, wie in Kapitel 4.5.4 angemerkt, mehrere Techniken im Optimierungsmodell zur Verfügung stehen, die aufeinander aufbauend den Infrastrukturausbau modellieren.

7.2.3 Optimierungsmodell

Das Optimierungsmodell berechnet Szenarien, wie unter Vorgabe von Nachfragen und politischen Randbedingungen (Kapitel 5.3.3) eine kostengünstige Energieversorgung möglich ist. Das Ergebnis der Optimierungsrechnung ist von den Vorgaben abhängig. In den Rechnungen zur Einbindung der Infrastruktur wird auf die Nachfragen, die im Rahmen des IKARUS-Projektes prognostiziert wurden, zurückgegriffen. Obwohl die Nachfragen das Ergebnis der Optimierungsrechnungen bestimmen, kann die Güte der Prognosen der Nachfragen hier nicht hinterfragt werden. Für die Nachfragen im Verkehrssektor ist festzustellen, dass die Prognosen im IKARUS-Projekt in einem ähnlichen Bereich wie in anderen Studien (zum Beispiel [Eckerle95]) liegen.

Das Optimierungsmodell ist geeignet, die Restriktion eines Verkehrsträgers auf Grund der Infrastruktur und anderer Randbedingungen zu erfassen. Es kann zeigen, welche Möglichkeiten im Verkehrssektor zu einer Kostenminimierung und zu einer Reduktion der Emissionen führen können. Dabei ist der Verkehr in den kompletten Energiesektor eingebunden. Ergebnisse des Modells, die zu einer starken Verschiebung führen, müssen allerdings kritisch betrachtet werden, da Rückkopplungen mit Nachfrage- und Preisänderungen nicht enthalten sind. Aspekte, die im Verkehrssektor eine herausragende Bedeutung haben, wie „just-in-time“-Lieferung, Bequemlichkeit, Zuverlässigkeit oder Transportdauer können nur durch externe Vorgaben berücksichtigt werden.

Der Zweck des Optimierungsmodells, Hinweise auf die kostengünstigste Befriedigung der Nachfragen – auch bei Reduktion der CO₂-Emissionen – zu geben, wird für den Verkehrssektor erfüllt. Die Einbeziehung der Infrastruktur hilft dabei, die kapazitiven Grenzen der einzelnen Verkehrsträger deutlich zu machen.

Zusammenfassung

- Die Materialbilanzmethode ist für die Bilanzierung des KEA bei Projekten des Verkehrswegebbaus sehr gut geeignet, da große Mengen an Baustoffen verarbeitet werden und der Energieaufwand für den Einbau und den Transport relativ gering ist. Für die genaue Erfassung der Emissionen wäre eine Prozesskettenanalyse vorzuziehen, da die spezifischen Daten lückenhaft sind. Durch die für die Materialbilanzen durchgeführten Fehlerrechnungen kann ihre Genauigkeit sehr gut eingeschätzt werden. Die Fehlerbreite des KEA war im Allgemeinen durch die Dominanz weniger großer Materialmengen geringer als erwartet.
- Das Infrastrukturmodell ist für die Berechnung des Ausbaus der Fernverkehrswege gut geeignet, kann aber nur den Ausbau aus Kapazitätsgründen erfassen. Alle anderen Aspekte werden außer Acht gelassen. Die Bedienung

des Modells ist durch die Iteration mit dem Optimierungsmodell zeitraubend und umständlich, daher sollten verschiedene Techniken zum Ausbau der Verkehrsnetze in das Optimierungsmodell eingefügt werden.

- Das Optimierungsmodell ist für die Berechnung von Szenarien ein gut geeignetes Instrument, das die kostengünstigste Struktur des Energiesystems und des Verkehrssektors berechnet. Die Einbindung der Infrastruktur und besonders ihrer Kapazität liefert dabei wichtige Randbedingungen im Verkehrssektor.

Insgesamt führen also alle Methoden besonders durch ihre Verknüpfung dazu, dass realistische Kosten, Daten zum KEA der Herstellung und Kapazitätsgrenzen für die Infrastruktur angegeben werden können. Dadurch wird das Ziel, den Verkehrssektor im Optimierungsmodell durch die Einbindung der Infrastruktur realitätsnäher abzubilden, erreicht.

Kapitel 8

Zusammenfassung

Zielsetzung

Die Mobilität wird nach allen Prognosen in Zukunft weiter steigen und damit eine steigende Verkehrsleistung zur Folge haben. Durch diesen Anstieg wird die Kapazitätsgrenze der Infrastruktur erreicht.

Im Rahmen des IKARUS-Projektes wird mit einem energiewirtschaftlichen Optimierungsmodell ein Instrument zur Berechnung von Klimagas-Reduktionsstrategien entwickelt. Das Modell berechnet kostenminimale Szenarien unter anderem zur Reduktion von Kohlendioxid. An dieser Reduktion kann der Verkehrssektor einen großen Anteil haben. Dieser Anteil kann nur dann korrekt berechnet werden, wenn Kosten und Kapazität der Verkehrsinfrastruktur im Modell enthalten sind. Zudem muss bei der Entwicklung der Szenarien gewährleistet sein, dass ein eventuell notwendiger Ausbau der Verkehrsnetze nicht mehr Energieaufwand und mehr Emissionen verursacht, als im Verkehrssektor vermindert werden können.

Daraus ergibt sich die Zielsetzung dieser Arbeit:

Die Entwicklung einer Möglichkeit, die Infrastruktur und ihren Ausbau in das Optimierungsmodell einzubinden, die Bereitstellung der dazu notwendigen Daten und die Untersuchung, wie sich die Berücksichtigung der Infrastruktur auf die Modellergebnisse auswirkt. Ferner sind der kumulierte Energieaufwand (KEA) und die Emissionen des Ausbaus zu berechnen und mit Energieeinsatz und Emissionen der Nutzung des Ausbaus zu vergleichen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Um diese Ziele zu erreichen, wird in vier Schritten vorgegangen. Zunächst werden Beispielprojekte für den Ausbau der Fernverkehrsnetze mit der *Materialbilanzmethode* bilanziert. Die Bilanzergebnisse, die Projekte des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) und die Belastungsdaten der Fernverkehrsnetze werden *Korridoren* zu-

geschrieben, die sich aus der Aufteilung des Autobahn- und Hauptschienennetzes ergeben. Daraus ergeben sich Daten für die einzelnen Korridore, die dem *Infrastrukturmodell* als Eingangsdaten dienen. Das Infrastrukturmodell wird zur Berechnung des kapazitiv notwendigen Ausbaus der Netze entwickelt. In diesem Modell werden die deutschlandweiten Fahrleistungen der Verkehrsträger auf die Korridore umgerechnet, mit der Kapazität verglichen und, wenn die Kapazität zu gering ist, der Ausbau in den Korridoren berechnet. Die Fahrleistungen werden vom *Optimierungsmodell* berechnet. Für dieses Modell sind Kosten und Kapazitäten des Ausbaus, die vom Infrastrukturmodell berechnet werden, Eingangsdaten. Die Optimierungsrechnung ergibt neue Fahrleistungen, die wiederum im Infrastrukturmodell neue Anforderungen an den Ausbau darstellen. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit mehrerer Iterationen.

Ergebnisse der Materialbilanzen

Die Materialbilanz untersucht, welche Materialien bei Produkten, in diesem Fall Autobahnen und Schienenwege, in welchen Mengen verwendet werden und bilanziert den mit ihnen verbundenen KEA und die Emissionen. In dieser Arbeit werden CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , CH_4 und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (KWS) bilanziert. Dazu müssen KEA und Emissionen der Materialien bekannt sein. Neben den Mengendaten der Materialien werden zusätzlich Daten für ihren Einbau und Transport berücksichtigt. Für die Berechnung von KEA und Emissionen der Fernstraßenprojekte werden mehrere Beispielprojekte bilanziert. Im Bereich der Bahn werden als Beispielprojekte Maßnahmen mit allgemeinem Charakter (zum Beispiel die Ertüchtigung der Oberleitung) bilanziert. Die Angaben zu den Maßnahmen sind dem Schienenwegeausbaubericht und allgemeiner Literatur zum Eisenbahnbau entnommen.

Obwohl in Bezug auf KEA und Emissionen die Nutzung die Herstellung um mindestens das 20-fache beim Autobahnbau und um mindestens das 40-fache beim Schienenwegebau überwiegt, sind die Herstellungsaufwendungen erheblich. Für den Neubau einer vierstreifigen Autobahn werden im Durchschnitt etwa 38.000 GJ/km (inklusive des Heizwertes von Bitumen) benötigt. Der KEA des Schienenwegebaus für eine zweigleisige Strecke liegt mit ca. 36.000 GJ/km in der gleichen Größenordnung. Die CO_2 -Emissionen und die anderen bilanzierten Emissionen liegen beim Bau der Gleise (2.000 kt CO_2 /km) allerdings höher als im Straßenbau (1.500 kt CO_2 /km). Obwohl der KEA bei beiden Ausbauten ähnlich ist, sind die CO_2 -Emissionen des Schienenausbaus höher. Der Unterschied beruht auf der Einbeziehung des Bitumen-Heizwertes, der den KEA für den Straßenbau, aber nicht die entsprechenden Emissionen erhöht.

Der höchste KEA entsteht beim Bau der Großbauwerke, wenn diese berücksichtigt werden. Beim reinen Verkehrswegebau dominieren im Straßenbau die Anteile der Deckschichten den KEA, sowohl im Fall bituminöser, als auch bei

Betonfahrbahnen. Für den Schienenwegebau dominiert bei fester Fahrbahn der KEA des Polystyrols in der Leichtbetondämmschicht, bei klassischer Fahrbahn mit Schotterbett hat die Herstellung des Schienenstahls den größten Anteil am KEA.

Ergebnisse des Infrastrukturmodells

Die Projekte aus dem Bundesverkehrswegeplan sind in geographischer Gliederung vorgegeben. Einen Bezug zwischen ihnen und den deutschlandweit gegebenen Fahrleistungen wird erreicht, indem die Verkehrsnetze in Korridore eingeteilt werden und die Fahrleistung auf diese Korridore verteilt wird. Die Projekte werden diesen Korridoren zugeordnet und mit ihnen ihre Kosten, KEA und Emissionen. Diese gehen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell ein.

Das in dieser Arbeit entwickelte Infrastrukturmodell berechnet für die deutschlandweit vorgegebenen Fahrleistungen der Verkehrsträger den notwendigen Infrastrukturausbau. Dazu werden Spitzenbelastungen und Kapazitäten für die Korridore berechnet, nach einem Vergleich zwischen beiden Größen wird ein Ausbau ermittelt. Das Modell ist lediglich in der Lage, einen Ausbau der Fernverkehrsnetze aus Kapazitätsgründen zu berechnen. Andere Gründe, zum Beispiel die Erschließung von Regionen, Schließung von Netzlücken oder Schaffung von Arbeitsplätzen können nicht berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den baulichen Projekten des BVWP sind im Infrastrukturmodell Änderungen in der Betriebsweise von Autobahnen und Schienenwegen möglich; das sind Telematikanlagen beziehungsweise die Verkürzung von Blocklängen oder das Fahren im Bremswegabstand (Kapitel 4.3).

Das Infrastrukturmodell berechnet sowohl für die Bahn als auch für den Straßenverkehr einen verstärkten Ausbau der Ost-West-Verbindungen. Für diese Verbindungen wird ein hohes Verkehrswachstum nach der Prognose zum BVWP angenommen. Das betrifft beim Straßenverkehr vor allem den Korridor 4 zwischen Ruhrgebiet und Rheinland und Thüringen und Sachsen und den West-Ost-Korridor 1/20 vom Emsland bis nach Rügen. Im Bahnverkehr muss vor allem der Korridor 4 und der Korridor 6 vom Saarland über das Rhein-Main-Gebiet bis zur tschechischen Grenze ausgebaut werden. Da nach den Optimierungsrechnungen der Bahnfernverkehr stark zunehmen wird, werden in fast allen Korridoren (außer Korridor 1/20) bis 2020 zumindest Maßnahmen zum Betriebsablauf notwendig. Im Korridor 4 werden alle Möglichkeiten des Ausbaus des Schienennetzes ausgeschöpft.

Ergebnisse des Optimierungsmodells

Das Optimierungsmodell berechnet die kostenminimale Zusammenstellung von Techniken zur Befriedigung der Energienachfrage. Dabei wird es durch technische und politische Randbedingungen eingeschränkt. Technische Randbedingungen im

Verkehrssektor sind die Kapazitäten der Infrastruktur. Die Nachfragen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft, liegen aber im Bereich vergleichbarer Prognosen. Die Kapazitäten und die Kosten des Ausbaus der Netze, die durch das Infrastrukturmodell berechnet werden, sind Eingangsdaten für das Optimierungsmodell. Zusätzlich werden die Kosten der bestehenden Infrastruktur und ihre Kapazitätsbegrenzung einbezogen. Unter anderem mit diesen Daten berechnet das Optimierungsmodell neue Fahrleistungen für die einzelnen Verkehrsträger. Die Iterationen mit dem Infrastrukturmodell enden, nachdem nach wenigen Iterationen entweder die Ausbauoptionen durch das Infrastrukturmodell erschöpft sind, oder die Optimierungslösung auf Grund eines anderen Parameters (zum Beispiel durch die maximale Verfügbarkeit einer Technik) eingeschränkt wird.

Das Optimierungsmodell berechnet neben den Fahrleistungen im Verkehrssektor auch den daraus folgenden Energieeinsatz und die klimarelevanten Emissionen. Zusätzlich zur Beschränkung durch die Infrastruktur sind im Verkehrssektor in den Rechnungen dieser Arbeit der Modal Split durch die gebundenen Verkehre und die Fahrzeugtechniken durch den maximal möglichen Austausch des Fahrzeugbestandes eingeschränkt.

Im Personennahverkehr ist der öffentliche Schienenpersonenverkehr durch seine niedrige Auslastung der teuerste Verkehrsträger. Nach dem Optimierungsergebnis werden im Jahr 2005 etwa 3 % der Personennahverkehrsleistung mit der Bahn geleistet, 4 % mit dem Bus und 93 % mit dem Pkw (1989 lag der Pkw-Anteil bei 84 %). Im Personenfernverkehr wird eine erhebliche Verkehrsleistung von der Bahn erbracht (52 %), Busse tragen 4 % und Pkw 44 % bei (1989 betrug der Anteil der Bahn 8 %). Im Güterfernverkehr findet nach dem Optimierungsergebnis ein Wechsel vom Lkw (2005: 32 %) zur Bahn (2005: 46 %; 1989: 39 %) statt. Der LPG-Lkw im Güternahverkehr ist im Basisszenario der einzige nicht-konventionelle Antrieb (Kapitel 6). Die Ausweitung des Schienenfernverkehrs wird durch die Infrastruktur und ihren maximalen Ausbau vor allem im Korridor 4 begrenzt.

Die Kosten der Infrastruktur haben auf die Verkehrsträgerzusammenstellung im kostenminimalen Ergebnis keinen Einfluss. Bei den Straßenverkehrsträgern haben sie nur geringen Anteil an den Gesamtkosten, die von Herstellungs- und Betriebskosten der Fahrzeuge dominiert werden. Eine Ausnahme bildet der Straßengüterfernverkehr, bei dem die Infrastrukturkosten etwa ein Drittel der Gesamtkosten ausmachen (Kapitel 6.2.4), da ihre Fahrleistung gegenüber der Pkw-Fahrleistung mit dem Faktor 30 gewichtet wurde. Im Schienenverkehr beträgt der Anteil der Infrastrukturkosten zwar etwa der Hälfte der Transportkosten, ändert aber die Verlagerung zum Schienenverkehr nicht. Trotz der Anrechnung der Infrastrukturkosten bleibt die Bahn in diesen Rechnungen das günstigste Verkehrsmittel im Fernverkehr.

Durch die Verlagerung zur Bahn im Personen- und Güterfernverkehr können unter Einbeziehung vorgelagerter Ketten und des Infrastrukturausbaus bis zum

Jahr 2005 etwa 9 % der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor von 1989 reduziert werden; bis zum Jahr 2020 werden 48 % im Basisszenario und 66 % im Falle weiterer Reduktionsforderungen vermindert. Letztere werden vor allem durch den Einsatz von alternativen Techniken, wie zum Beispiel besonders sparsame Antriebe oder CO₂-neutrale Kraftstoffe (zum Beispiel Rapsöl) erreicht.

Diskussion der Ergebnisse

- **Kosten der Infrastruktur:** Die Infrastrukturkosten sind vor allem im Schienenverkehr erheblich, ihr Anteil beträgt dort etwa 50 % der gesamten Transportkosten. Die Kosten für den Netzausbau variieren erheblich: Im Autobahnneubau von 13 Mio DM/km bis 25 Mio DM/km, für den Autobahnausbau von 13 Mio DM/km bis 24 Mio DM/km; der Neubau von Schienenwegen kostet zwischen 18 Mio DM/km und 57 Mio DM/km. Die Projekte zum Ausbau der Schienenwege sind sehr unterschiedlich, ihre Kosten variieren zwischen 1 Mio DM/km und 44 Mio DM/km. Dabei sind die Kosten der einzelnen Projekte keine Modellergebnisse, sondern dem Bundesverkehrswegeplan entnommen.

Durch die große Schwankungsbreite bei den Kosten kann eine generelle Aussage, welcher Ausbau in Bezug auf die Verkehrsleistung kostengünstiger ist, nicht getroffen werden.

- **KEA und Emissionen des Infrastrukturausbaus:** KEA und Emissionen beim Ausbau der Fernverkehrsnetze sind erheblich. Werden alle Projekte des BVWP realisiert, wird ein KEA von 413 PJ benötigt, das entspricht etwa 3 % des Primärenergieeinsatzes in Deutschland im Jahr 1996. Auf die Lebensdauer umgerechnet ist der KEA des Infrastrukturbaus bei Autobahnen etwa 20-fach und bei der Bahn etwa 40-fach niedriger als der Energieeinsatz bei der Nutzung. Ähnliche Ergebnisse erhält man für die Emissionen. Somit kann der KEA des Infrastrukturbaus bei Betrachtungen des Energieeinsatzes im Verkehrssektor vernachlässigt werden.

In Bezug auf die Verkehrsleistung ist der KEA des Schienenwegeausbaus erheblich günstiger als beim Ausbau des Autobahnnetzes. Daher ist der Schienenfernverkehr aus energetischer Sicht sowohl bezüglich der Nutzung als auch des Infrastrukturbaus vorzuziehen.

- **Ergebnisse des Optimierungsmodells:** Der Schienenfernverkehr dominiert das Ergebnis der Optimierungsrechnungen im Verkehrssektor. Sowohl im Personen- als auch im Güterfernverkehr wird die Bahn bis zur Kapazitätsgrenze der Infrastruktur und ihres Ausbaus eingesetzt. Im Personennahverkehr dominiert dagegen der Pkw. Alternative Antriebe werden

ohne Reduktionsforderungen nur im Güternahverkehr eingesetzt, mit Reduktionsforderungen auch in anderen Straßenverkehrsbereichen. Diese Antriebe sind teurer als konventionelle Techniken; dies wird nur im Fall des Güternahverkehrs durch kostengünstigen Kraftstoffbezug ausgeglichen. Daher werden ohne Einschränkungen die konventionellen Antriebe bevorzugt.

Das Ergebnis zeigt, dass der Schienenfernverkehr nicht nur aus energetischer Sicht, sondern auch aus Sicht der Kostenminimierung vorzuziehen ist. Bei dieser Berechnung konnten allerdings nicht die Kosten der Bahnverwaltung, verschiedener Anlagen¹ und des vor- und nachgeschalteten Verkehrs berücksichtigt werden. Eine Einbeziehung dieser Kosten würde das Ergebnis nicht umkehren, aber die Transportkosten der Bahn den Transportkosten des Pkw annähern.

- **Anwendung des Infrastrukturmodells:** Das Infrastrukturmodell erweist sich als geeignetes Instrument, um den Infrastrukturausbau gemäß den Fahrleistungen des Optimierungsmodells zu berechnen. Dabei berechnet es Kapazität, Kosten, KEA und Emissionen des Ausbaus. Die dabei notwendige iterative Vorgehensweise ist allerdings für eine dauerhafte Einbeziehung in das IKARUS-Instrumentarium ungeeignet, daher sollten entsprechende Ausbautechniken für die Infrastruktur im Optimierungsmodell definiert werden.

Für ein weiteres Vorgehen wäre insbesondere eine genauere Untersuchung der Nahverkehrsinfrastruktur wünschenswert. Dieser wichtige Bereich konnte in dieser Arbeit nur pauschal, besonders bezüglich der Belastungsdaten, behandelt werden. Durch die lückenhaften Daten zur Bahninfrastruktur musste auf stark vereinfachte Pläne und Berechnungen zurückgegriffen werden. Eine Verbesserung des Infrastrukturmodells würde durch eine genauere Untersuchung von KEA und Emissionen beim Ausbau der Schienenwege erreicht werden. Zusätzlich wären die Erfassung der jetzigen und der erwarteten Belastung der Bahnstrecken und ein Rechenalgorithmus für die Kapazität der Strecken hilfreich. Durch die Abbildung des Ausbaus in mehreren begrenzten Technikstufen mit steigenden Kosten könnte die aufwendige Iteration von Optimierungsmodell und Infrastrukturmodell vermieden werden.

Es ist trotz der weiterführenden Vorschläge mit der hier entwickelten Methodik möglich, die Infrastruktur mit ihrem Ausbau in Kosten und Kapazitäten im Optimierungsmodell abzubilden und zusätzlich KEA und Emissionen des Ausbaus der Netze zu bilanzieren.

¹Rangierbahnhöfe, Pflege- und Reparaturanlagen und andere große Bahnanlagen

Literaturverzeichnis

- [Adam97] T. Adam, B. Schieferdecker. Methodik im Rahmen produktorientierter Betrachtungen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 47(11):678–682, 1997.
- [Andrä95] H.P. Andrä, R. Schneider, W. Henning, C. Forster. *Einsparung von Ressourcen im Hochbau: Reduzierung des Material- und Energieverbrauchs – Planungs- und Entscheidungsgrundlagen in: Umweltforschung in Baden-Württemberg*. ecomed, Landsberg, 1995.
- [Benz94] M. Benz. *Energetischer Vergleich der Verkehrsträger Bahn und Pkw für die Verbindung Hannover-Würzburg. Studienarbeit*. Fachgebiet Energie- und Rohstoffwirtschaft des Fachbereichs 14 der Technischen Universität Berlin, Berlin, 1994.
- [Beyert85] J. Beyert. *Ermittlung des Energieaufwands bei Bauprozessen – Erläutert am Beispiel der Erstellung eines Straßenbaus*, Band D 82; G. Pohle, Hrsg. Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH Aachen, Aachen, 1985.
- [BfS87] Bundesanstalt für Straßenverkehrswesen, Hrsg. *Straßenverkehrszählungen Jahresauswertung 1987 Langzeitzählstellen*, Bergisch Gladbach.
- [BfS95] Bundesanstalt für Straßenverkehrswesen, Hrsg. *Straßenverkehrszählung 1995 Ergebnisse für die Bundesfernstraßen*. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, Bergisch Gladbach, 1997.
- [BMV74] Projektgruppe „Korridoruntersuchungen“ im Bundesverkehrsministerium, Hrsg. *Untersuchung über Verkehrswegeinvestitionen in ausgewählten Korridoren der Bundesrepublik Deutschland*. Bundesverkehrsministerium Bonn-Bad Godesberg, 1974.
- [BMV92] Der Bundesminister für Verkehr, Hrsg. *Bundesverkehrswegeplan 1992*, Bonn, 1992.
- [BMV95] Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Ref. StB 14, Hrsg. *Straßen in Deutschland*, Bonn, 1995.

- [BMV96a] Bundesministerium für Verkehr, Hrsg. *Straßenbaubericht 1996*, Bonn, 1996.
- [BMV96b] Bundesministerium für Verkehr, Hrsg. *Verkehr in Zahlen 1996*, Band 25. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, 1996.
- [Bonnot86] J. Bonnot et al. *Straßenbau und Energie, Verwendung energiesparender Bindemittel – Bericht einer OECD-Forschungsgruppe in: Schriftenreihe „Straßenforschung“*; Bundesministerium für Bauten und Technik, Hrsg., Wien, 1986.
- [Boustead95] L. Boustead. *Eco-profiles of the European plastics industry*; Association of Plastics Manufactures in Europe, Hrsg., Brüssel, 1993-95.
- [Breiter83] B. Breiter. *Energieverbrauch im Straßenbau – Exemplarischer Vergleich der Auswirkungen bautechnischer und entwurfstechnischer Parameter in: Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen*; A. Schmuck, Hrsg., Hochschule der Bundeswehr München, München, 1983.
- [Brög92] W. Brög. Entwicklung der Mobilität unter veränderten Bedingungen der Bevölkerungs-, Siedlungs- und Verkehrsstruktur – Teil II. *Verkehr und Technik*, (2): 57-62, 1992.
- [Brosthaus95] J. Brosthaus, R. Kober, W.-R. Müller, H. Waldeyer. *Klimarelevante Energie- und Kostenstrukturen im Straßen-, Schienen- und Luftverkehr. Monographien des Forschungszentrum Jülich Band 20/1995*. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 1995.
- [Bundestag91] Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Hrsg. *Schutz der Erde – Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik; Teilband I*. Economica Verlag, Bonn, 1991.
- [Bundestag97a] Deutscher Bundestag, Hrsg. *Unterrichtung durch die Bundesregierung – Bericht zum Ausbau der Schienenwege 1996, Drucksache 13/6929 des Deutschen Bundestages*, Bonn, 1997.
- [Bundestag97b] Deutscher Bundestag, Hrsg. Anteil der Binnenschifffahrt an Transporten erhöhen. *heute im Bundestag vom 30.01.97*.
- [DBAG96] Deutsche Bahn AG. Geschäftsbericht der Deutschen Bahn AG 1995. *Veröffentlichung im Internet*, 1996.
- [DBAG97] Deutsche Bahn AG. Baubeginn für Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln-Rhein/Main in Nordrhein-Westfalen. *Pressemitteilung der Deutschen Bahn AG vom 13.05.1997*.

- [DBAG98] Deutsche Bahn AG. Deutsche Bahn und Lufthansa vereinbaren Kooperation. *Pressemitteilung der Deutschen Bahn AG vom 13.07.1998.*
- [Donaueschingen91] Straßenbauamt Donaueschingen. *B 294, B 462 Südumgehung Schiltach mit Kirchberg- und Schloßbergtunnel.* WEKA-Verlag, Kissing, 1991.
- [Dürr92] W. Dürr, K. Kleibohm. *Operations Research – Lineare Modelle und ihre Anwendungen.* Carl Hanser Verlag, München, 1992.
- [Duwe79] B. Duwe. *Ersatz der elastischen Lagerung des Querschwellengleises im Schotterbett durch andere Gleiskonstruktionen in: Bettungsloser Oberbau bei Schienenbahnen (Schriftenreihe für Verkehr und Technik).* E. Schmidt, Bielefeld, 1979.
- [Eckerle95] K. Eckerle, P. Hofer, K. P. Masuhr, G. Oczioka, T. Schmid. *Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa – Perspektiven bis zum Jahr 2020; Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Hrsg., Basel, 1995.*
- [Enderlein94] H. Enderlein, U. Kunert, H. Link. *Berechnung und Bewertung der Verkehrsinfrastruktur in den neuen Bundesländern in: Beiträge zur Strukturforchung; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Hrsg. Duncker & Humblot, Berlin, 1994.*
- [Eyerer93] P. Eyerer. *Ganzheitliche Bilanzierung am Beispiel von Kraftfahrzeugkomponenten in: Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen – Ihre Bedeutung für Ökobilanzen; VDI-Gesellschaft für Energietechnik, Hrsg. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.*
- [FgSV96] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. *Richtlinie für die Anlage von Straßen RAS-Q 96.* Köln, 1996.
- [Frank93] D. Frank. BMW's kooperatives Verkehrsmanagement am Beispiel der Stadt München. *Verkehrspolitischer Kongress in Nürnberg, 8./9. Juni 1993.*
- [Gaidzik95] M. Gaidzik (HaCon), W.-R. Runge (HaCon), J. Siegmann (IVE), B. Seidel (IVE). *Kapazitätsreserven im Schienengüterverkehr.* HaCon Ingenieurgesellschaft mbH, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (Universität Hannover), Hrsg., Hannover, 1995.
- [Gürzenich97] D. Gürzenich. *Entwicklung einer Datenbank zur Berechnung von Energieaufwendungen und Emissionen bei der Herstellung von Energieanlagen (Studienarbeit); Fachgebiet Ökologisch Verträgliche Energiewirtschaft, Fachbereich Maschinenwesen, Universität Gesamthochschule Essen, Essen, 1997.*

- [Hautzinger95] H. Hautzinger et al. *Verkehrsmobilität in Deutschland zu Beginn der 90er Jahre, Bde. 1-4*, Bundesanstalt für Straßenwesen, Hrsg. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bergisch Gladbach, 1995.
- [Hautzinger96] H. Hautzinger, D. Heidemann, B. Krämer. *Inländerfahrleistung 1993*, Bundesanstalt für Straßenwesen, Hrsg. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bergisch Gladbach, 1996.
- [Hoffmann93] C. Hoffmann. *Einfluß und Problematik der Bilanzierung indirekter Energieaufwendungen am Beispiel des Pkw in: Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen – Ihre Bedeutung für Ökobilanzen*; VDI-Gesellschaft für Energietechnik, Hrsg. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [IEV98] TU Braunschweig, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, Abt. Nachrichtentechnik. Steigerung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken (Internetveröffentlichung).
http://www.tu-bs.de/forschung/projekte/CAMPUS/6-CAMPUS/N6_10_1/6_10_1T.HTM, 1998.
- [infras95] infras AG Schweiz. *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs*; Umweltbundesamt, Hrsg., Berlin, 1995.
- [IVV95] Ingenieurgruppe IVV-Aachen, Hrsg. *Belastung der Bundesfernstraßen durch den Kfz-Verkehr an Werktagen 2010; Bedarfsplanprognose; Ergebnisbericht*. Aachen, 1995.
- [IVW98] Institut für Verkehrswegebau der Technischen Universität Dresden. Dimensionierung einer festen Fahrbahn (Internetveröffentlichung).
<http://www.tu-dresden.de/vkivwb/projekte/ff/obb6.htm>, 1998.
- [Jänsch93] E. Jänsch. Energieverbrauch und klimarelevante Emissionen: Der ICE im ökologischen Wettbewerb. *Die Deutsche Bahn*, 9-10: 661-666, 1993.
- [Jagodzinski95] P. Jagodzinski, W. Krüger, D. Martinsen, M. Walbeck. *IKARUS – Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien. Dokumentation des Optimierungsmodells, Anhang 1: Strukturbilder; Teil 1: Primäre Energieträger und Umwandlungssektoren; Teil 2: Endverbrauchersektoren; Teil 3: Oberstruktur (Logistik)*. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, KFA-STE-IB 6/95, 1995.
- [Jopp96] K. Jopp. *Umweltbericht 1996*. Vorstand der Deutschen Bahn AG – Zentralressort Forschung und Technologie – Bahn-Umwelt-Zentrum, Hrsg. Deutsche Bahn AG, Berlin, 1996.

- [Kaufmann96] U. Kaufmann. *Analyse methodischer Ansätze zur Bilanzierung verfahrenstechnischer Prozesse – Prozeßkettenanalyse der Herstellung kleinformatiger Wandbaustoffe – Dissertation*. Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 1996.
- [Kiefer95] J. Kiefer, F. Reißner. *Ein strukturiertes Konzept für die Streckendisposition in: Jahrbuch 1995 VDI-Fahrzeug- und Verkehrstechnik; VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik*, Hrsg. VDI Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [Kindler80] H. Kindler, A. Nikles. Energieaufwand zur Herstellung von Werkstoffen – Berechnungsgrundsätze und Energieäquivalenzwerte von Kunststoffen. *Kunststoffe*, 70(12); 802-807, 1980.
- [Klößner96] R. Klößner. *Fehlerabschätzungen in Sachbilanzen in: Ganzheitliche Betrachtungen im Automobilbau; Verein Deutscher Ingenieure*, Hrsg. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [Knoll97] E. Knoll, Hrsg. *Der Elsner – Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen 1997*. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg, 1997.
- [Kuhbier92] J. Kuhbier. *Ostseeautobahn A 20 – Ergebnisse der Erörterung des Berichts der Arbeitsgruppe der Landesregierung von Schleswig-Holstein zur Verkehrsführung der A 20 im Raum Lübeck*. Hamburg, 1992.
- [Link97] H. Link. Trassenpreise der Deutschen Bahn AG – diskriminierungsfrei und kostendeckend? *Wochenbericht 26/97 des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung*, (27), 1997.
- [Markewitz98] P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen, M. Walbeck, J.-Fr. Hake. *Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien*. Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Jülich, 1998.
- [Meier89] E. Meier. *Neuverkehr infolge Ausbau und Veränderung des Verkehrssystems (Dissertation ETH-Nr. 8842)*. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, 1989.
- [Oberweiler79] G. Oberweiler. *Der Oberbau auf fester Fahrbahn – Entwicklungen und Versuche bei der Deutschen Bundesbahn in: Bettungsloser Oberbau bei Schienenbahnen (Schriftenreihe für Verkehr und Technik)*. E. Schmidt, Bielefeld, 1979.
- [Schäffler80] H. Schäffler. *Baustoffkunde*. Vogel-Verlag, Würzburg, 1980.

- [Shell93] Deutsche Shell AG, Hrsg. *Motorisierung in Deutschland: Mehr Senioren fahren länger Auto – Shell Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen bis zum Jahr 2010 mit einem Ausblick auf 2020*. Deutsche Shell AG, Abt. Information und Presse, Hamburg, 1993.
- [Scholzen91] F. Scholzen. *Oekobilanzen von Windenergie am Beispiel einer 30kW-Anlage auf dem Simplon (Semesterarbeit)*; Labor für Energiesysteme ETH Zürich, Hrsg., Zürich, 1991.
- [Schulz96] J. Schulz, J. Kesten, M. Vrtic, T. Krumme (Prognos AG). *Bewertung des Güterfernverkehrs auf Straße und Schiene – Vergleich von Transportqualität und Energieverbrauch bei ausgewählten Transportketten auf Straße, Schiene und im kombinierten Verkehr –*; Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Hrsg., Frankfurt a.M., 1996.
- [Stat. Bundesamt98] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Statistisches Jahrbuch 1998 für die Bundesrepublik Deutschland*. Mezler-Poeschel, Stuttgart, 1998.
- [Trinkaus86] H. Trinkhaus. Die Oberleitung Re 250 für die Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn. *Eisenbahningenieur*, 37(10): 441-451, 1986.
- [Vallée95] D. Vallée. *Umdruck Linienführung*; W. Schwanhäuser, Hrsg. Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen, 1995.
- [VDI97] Verein Deutscher Ingenieure, Hrsg. *VDI Richtlinien, VDI 4600, Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden*. Beuth Verlag Berlin, Düsseldorf, 1997.
- [Wagner97] H.-J. Wagner, P. Wenzel. Vorgehen und Material-Anhaltswerte. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 47(11): 685-688, 1997.
- [Walbeck88] M. Walbeck, H.-J. Wagner, D. Martinsen, V. Bundschuh. *Energie und Umwelt als Optimierungsaufgabe: Das MARNES-Modell*. Springer, Berlin, 1988.

Anhang A

Merkmale der Verkehrswege

Wenn keine Volumen- oder Gewichtsangaben zu den eingesetzten Baustoffen vorlagen, wurden sie aus den Angaben der Schichtdicke oder den folgenden Querschnitten berechnet. Aus diesem Grund und um einen Überblick über die in dieser Arbeit betrachteten Bauweisen zu verschaffen, sind im Folgenden die Merkmale der Verkehrswege dargestellt.

A.1 Aufbau des Straßenoberbaus

Die Stärke und die Schichtung des Straßenoberbaus richtet sich nach der Bauklasse, die aus erwartetem Schwerverkehr, Steigung und Gefälle, Untergrundeigenschaften und klimatischen Bedingungen errechnet wird. In der Regel wird auf den verdichteten Untergrund die Frostschuttschicht, darauf die Tragschicht und als oberste Schicht die Deckschicht aufgebracht ([Knoll97], S. 912 ff). Autobahnen werden entweder mit Betondecken (1989: 28 % der Gesamtlänge der Autobahnen) oder bituminösen Decken (72 %, davon 46 % Gussasphalt und 26 % Asphaltbeton) ausgeführt ([Knoll97], S. 191). Bei der Wahl einer Deckenart spielen neben den Kosten auch die erwartete Beanspruchung und die Neigung zur Rissbildung eine Rolle. Je härter ein Belag ist, desto haltbarer ist er gegenüber der Verkehrsbeanspruchung, aber desto eher neigt er zur Rissbildung.

Die Standardausführung für eine vierstreifige Autobahn ist der Regelquerschnitt RQ 29,5 (Abbildung A.1). Die beiden Fahrbahnen sind durch einen drei Meter breiten unbefestigten Mittelstreifen getrennt, daran schließt sich auf jeder Seite ein 1 m breiter Randstreifen, zwei Fahrstreifen von je 3,75 m Breite, ein Randstreifen von 0,5 m und der Seitenstreifen von 2,5 m Breite an. Bis zur Böschung reicht noch ein 1,50 m breiter unbefestigter Streifen. Damit ist die befestigte Breite je Fahrbahn 11,5 m. Bei einer sechsstreifigen Autobahn ist der Regelquerschnitt RQ 35,5 Standard. Dabei sind der unbefestigte Mittelstreifen

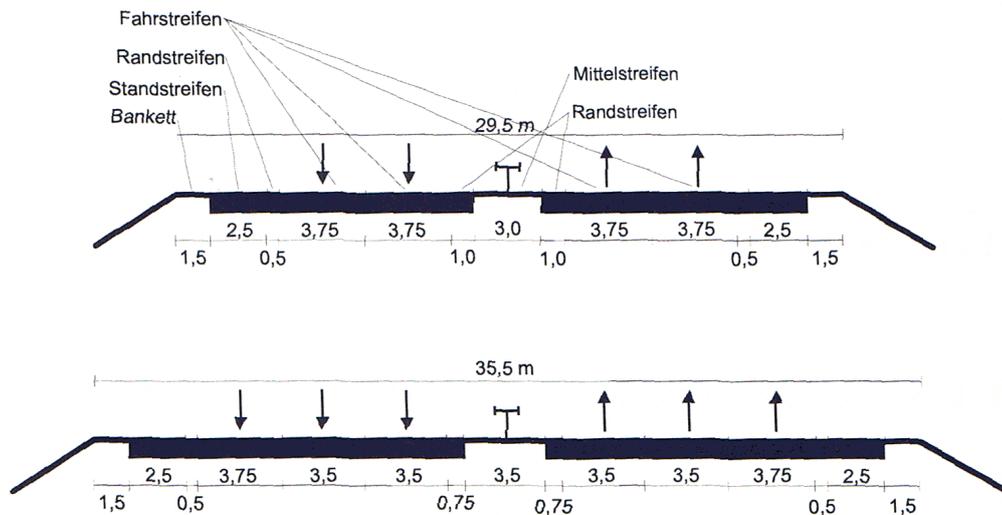


Abbildung A.1: Regelquerschnitte RQ 29,5 und RQ 35,5 einer vierstreifigen (oben) und einer sechstreifigen (unten) Autobahn. (nach [Knoll97])

3,5 m, die inneren Randstreifen 0,75 m und die inneren Fahrstreifen 3,5 m breit. Die anderen Maße entsprechen dem RQ 29,5. Eine dreistreifige Fahrbahn hat damit eine befestigte Breite von 14,5 m. ([Knoll97], S. 616)

A.1.1 Betonfahrbahn

Betonfahrbahnen können sowohl auf hydraulisch gebundener Tragschicht als auch auf einer Asphalttragschicht aufgebracht werden. Dabei ist die Betondecke mit Quer- und Längsfugen auszustatten, um einer unkontrollierten Rissbildung entgegenzuwirken ([Knoll97], S. 986). Die Frostschuttschicht besteht gewöhnlich aus Sand und Kies, zum Teil aus Brechsand und Recyclingmaterial. In seltenen Fällen ist sie hydraulisch verfestigt. Ihre Dicke reicht für die hier untersuchten Autobahnen von 38 bis 44 cm. Eine hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) ist zirka 15 cm dick, während eine bituminöse Tragschicht 8 bis 10 cm dick ist (Abbildung A.2). Bei der HGT muss der Bindemittelanteil mindestens 3 Gew.-% betragen. Bituminöse Tragschichten werden im Heißeinbau hergestellt, der Bitumenanteil beträgt knapp 4 % ([Schäffler80], S. 168). Die Betondecke ist bis zu 26 cm dick. Die durch die Fugen entstehenden Platten sind in Längsrichtung durch Dübel (mind. 50 cm lang), in Querrichtung durch Anker (60 bis 80 cm lang) verbunden, die Fugenfüllung wird gewöhnlich mit Dichtungsbändern oder Fugenvergussmassen vorgenommen. In Deutschland ist keine durchgehende Bewehrung vorgesehen. Stahleinlagen werden in Sonderfällen und bei Endfeldern, etwa beim Übergang zu einer Bitumenfahrbahn, eingesetzt.

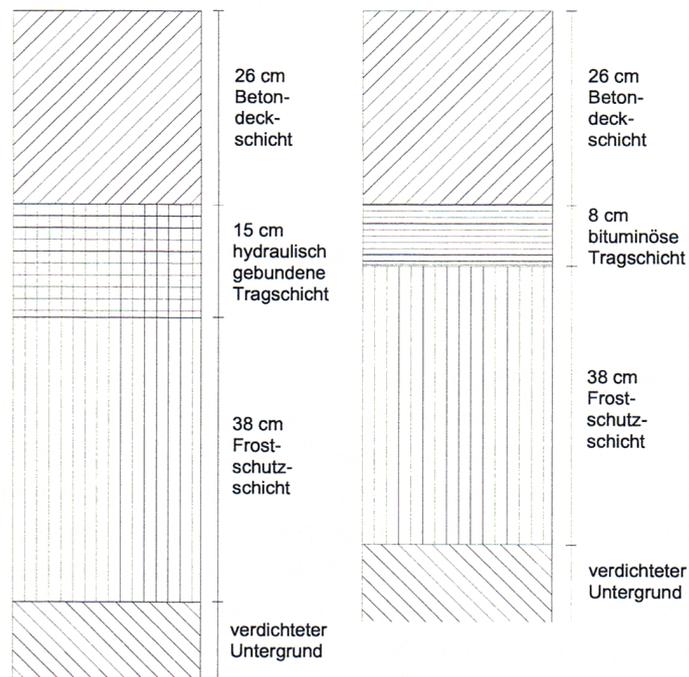


Abbildung A.2: Schichten von Betonfahrbahnen; links mit hydraulisch gebundener Tragschicht, rechts mit bituminöser Tragschicht. Die Schichtdicken variieren je nach Belastung, Frostsicherheit, Steigung/Gefälle etc. (nach [BMV95])

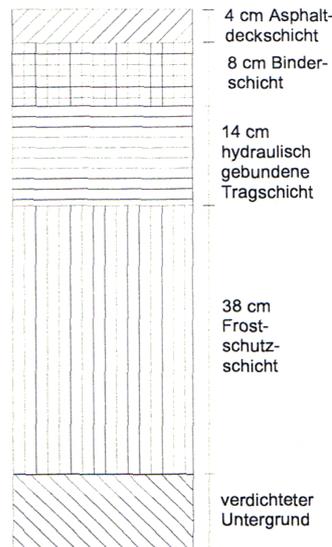


Abbildung A.3: Schichten einer bituminösen Fahrbahn. Auch hier variieren die Schichtdicken je nach Belastung, Frostsicherheit, Steigung/Gefälle etc. (nach [BMV95])

A.1.2 Bitumenfahrbahn

Über die Frostschutzschicht, deren Dicke wie bei den Betonfahrbahnen variiert, wird im Fall einer Bitumenfahrbahn eine bituminöse Tragschicht aufgebracht, deren Dicke bei Autobahnen 14 bis 22 cm beträgt (Abbildung A.3). Die darüber liegende Asphaltbinderschicht ist in der Regel 8 cm dick. Die Binderschicht hat einen Bitumenanteil von knapp 5 Gew.-%. Über ihr wird die Deckschicht mit einer Dicke von 4 cm aufgebracht. Sie besteht bei einer bituminösen Decke aus Asphaltbeton oder Gussasphalt. Die Zusammensetzung von Asphaltbeton besteht aus 6 bis 10 Gew.-% Füller (Körnung < 0,09 mm), zwischen 5,9 und 7,2 % Bindemittel und Splitt und Sand größerer Körnung. Bei Gussasphalt liegt der Anteil des Füllers mit 20 bis 30 Gew.-% wesentlich höher, ebenfalls höher liegt der Bindemittelanteil mit 6,5 bis 8 Gew.-%. ([Knoll97], S. 956 ff)

A.2 Aufbau des Schienenoberbaus

Für den Bau von Schienenwegen gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen können Schienen auf die bekannte Weise mit Querschwellen im Schotterbett gelagert werden und zum anderen auf ein Festbett. Die Vorteile beim Schotterbett sind – relativ zur Bauweise mit fester Fahrbahn – geringe Kosten und geringere Geräuschentwicklung. Ein großer Nachteil ist insbesondere die häufig notwendige Korrektur

der Gleislage, die sich bei höherer Beanspruchung und durch größere Geschwindigkeiten verschlechtert. Ein weiteres Problem ist die notwendige Unkrautvernichtung, um das Schotterbett elastisch zu halten. Dagegen sind mit dem Oberbau auf fester Fahrbahn höhere Investitionen, aber langfristig ein geringerer Unterhalt notwendig. Problematisch sind insbesondere die höheren Lärmemissionen, die Mehrinvestitionen in Schutzwände o.ä. notwendig machen. In beiden Fällen liegt die Breite des zweigleisigen Fahrbahnquerschnittes inklusive der Masten bei etwa 14 m (Abbildung A.5). [Vallée95]

Die Masten der Oberleitungen sind in Abständen von 50 bis 65 m aufgestellt. Die wesentlichen Bauteile sind Fundament, Mast, Schwenkausleger und Kettenwerk. Die Bauart des Fundaments richtet sich nach dem Untergrund. Die übliche Gründung ist die Rammrohrgründung, bei der ein Betonmast aufgesetzt wird, bei den Neubaustrecken wird häufig als Fundament eine Spundbohle mit einer Tiefe von 4 bis 7 m eingesetzt. Je nach Art des Untergrundes werden auch Betonfundamente eingesetzt. Als Masten kommen zum Teil Stahlgittermasten oder, vor allem bei den Neubaustrecken, Schleuderbetonmasten zum Einsatz. Sie sind in der Regel etwa acht Meter hoch. Der Schwenkausleger, an den das Kettenwerk montiert wird, besteht im Normalfall aus feuerverzinktem Stahl (St 52) mit einer Beschichtung auf PVC-Basis. Für den Einsatz bei Hochgeschwindigkeitsstrecken (Oberleitung Re 250) wurden Schwenkausleger aus Aluminium entwickelt. Sie haben ein geringes Gewicht, höhere Korrosionsbeständigkeit und elektrische und thermische Leitfähigkeit als Stahlschwenkausleger. Die Länge der Schwenkausleger liegt im Mittel bei etwa vier Metern. Die Schwenkausleger sind mit dem Mast durch Isolatoren aus Keramik verbunden. Auch hier wurden für die Hochgeschwindigkeitsstrecken neue Isolatoren entwickelt. Das Kettenwerk besteht normalerweise aus Bronze mit einem Kupferfahrdraht, während bei der Oberleitung Re 250 stärkere Tragseile aus Bronze und ein Fahrdraht aus einer Kupfer-Silber-Legierung verwendet wird. [Trinkaus86]

A.2.1 Aufbau einer festen Fahrbahn

Die feste Fahrbahn kommt bei Hochgeschwindigkeitsstrecken wie zum Beispiel Köln–Frankfurt zum Einsatz. Bereits seit 1967 ([Oberweiler79], S. 77 ff) experimentierte die Deutsche Bundesbahn mit festen Fahrbahnen. Die unterste Schicht des Festbettes besteht aus einem 15 cm tief mit Zement verfestigtem Untergrund, darauf liegen 20 cm Styroporbeton (Abbildung A.4). Auf dieser Wärmedämm- und Tragschicht liegt eine 14 cm dicke durchgehend bewehrte Betonplatte. Darauf werden die Spannbetonschwellen montiert, die mit Hilfe von Bügeln in Verbindung mit einer durchgehenden, durch die Schwellen verlegten Längsbewehrung fixiert werden. Die Spannbetonschwellen werden ebenfalls beim Gleisrost im Schotterbett verwendet. Zwischen und zum Teil unter den Schwellen wird Füllbeton eingegossen. Auf den Schwellen wird unter den Schienen eine 15 mm dicke

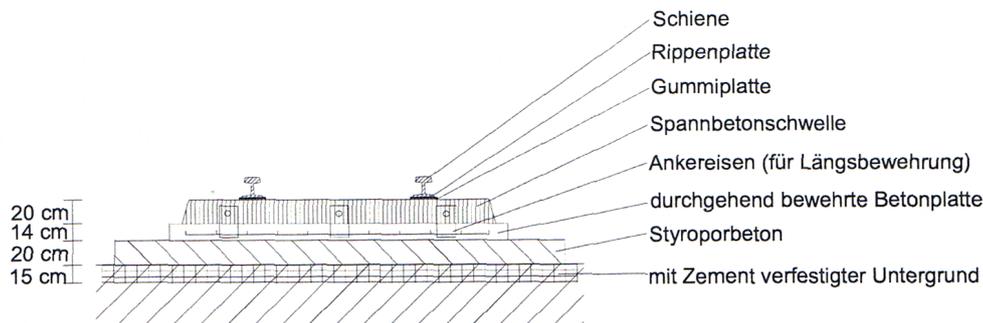


Abbildung A.4: Schichten einer Festbettfahrbahn für Schienenwege. Es handelt sich um einen „Rheda-Oberbau“. (nach [Duwe79])

Gummiplatte mit darüber liegender Rippenplatte montiert. Diese Konstruktion gilt nach Testreihen für Hochgeschwindigkeitsverkehr als besonders geeignet. ([Duwe79], S. 13 ff)

A.2.2 Aufbau eines Schotterbettes

Das „klassische“ Bett besteht aus dem – je nach Gegebenheit mit Zement – verfestigten Untergrund und dem darüberliegenden Schotter. Die Dicke des Schotterbettes unter den Schwellen muss mindestens 35 cm betragen. Darauf werden die Spannbetonschwellen gelegt, auf denen die Schienen liegen [Vallée95]. Gleisbaumaschinen verlegen den Gleisrost mit bis zu 800 m/h. Nach einer Überschlagsrechnung wird der Energieaufwand für das Verschweißen der Schienen als nicht relevant eingestuft ($\ll 1\%$ des Gesamt-KEA).

A.3 Kunstbauwerke

Sowohl im Hinblick auf die Kosten als auch auf den KEA spielen die Kunstbauwerke, damit sind im Wesentlichen Großbrücken und Tunnel gemeint (Trogbauwerke werden hier nicht betrachtet), eine wichtige Rolle. Die Bauweise für Großbrücken lässt sich nur schwer standardisieren. Bei Tunneln, die bergmännisch aufgeföhren werden (im Gegensatz zur offenen Bauweise), ist die Bauweise immer recht ähnlich.

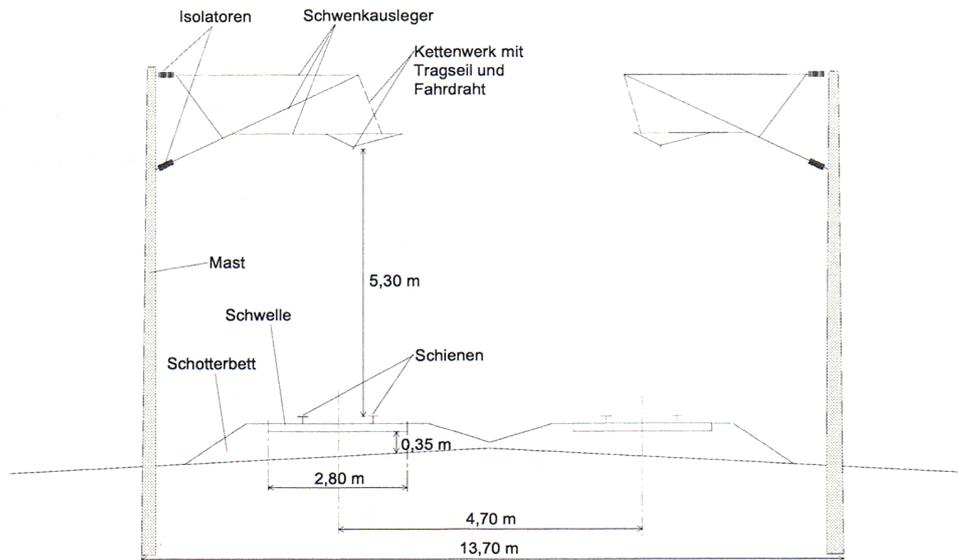


Abbildung A.5: Querschnitt einer zweispurigen Bahnstrecke mit Schotteroberbau. (nach [Vallée95])

A.3.1 Tunnelaufbau

Tunnel werden gewöhnlich nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise aufgeföhren. Dabei wird durch präzise Sprengungen zunächst der obere Teil, die Kalotte, ein Stück weit vorangetrieben und mit Ankern und Spritzbeton gesichert. Anschließend wird der untere Teil, die Strosse ausgebrochen und ebenfalls gesichert. Das Bauwerk wird mit einer PVC-Folie gegen Bergwasser abgedichtet. Nachdem die Bewehrung angebracht wurde, wird mittels Schalwagen die Innenschale betoniert (Abbildung A.6). Es folgt der weitere Ausbau und die betriebstechnische Ausstattung. Je nach Geologie kann es auch vorkommen, dass ein Tunnel mittels Fräsmaschine und nicht im Sprengvortrieb aufgeföhren wird. Beim Vortrieb der Kalotte kann eine Leistung von rund einem Dutzend Meter pro Tag erreicht werden, beim Strossenausbruch bis zu 40 m/Tag. Die Betonierung der Innenschale erfolgt mit etwa 40 m/Woche. [Donaueschingen91]

Gewöhnlich ist ein Straßentunnel auf zwei Fahrstreifen ausgelegt, so dass sich ein Durchmesser von rund 11 m ergibt. Bei zwei Fahrbahnen werden zwei, unter Umständen miteinander verbundene Tunnel aufgeföhren. Der Durchmesser von zweigleisigen Bahntunneln liegt bei etwa 14 m [Vallée95].

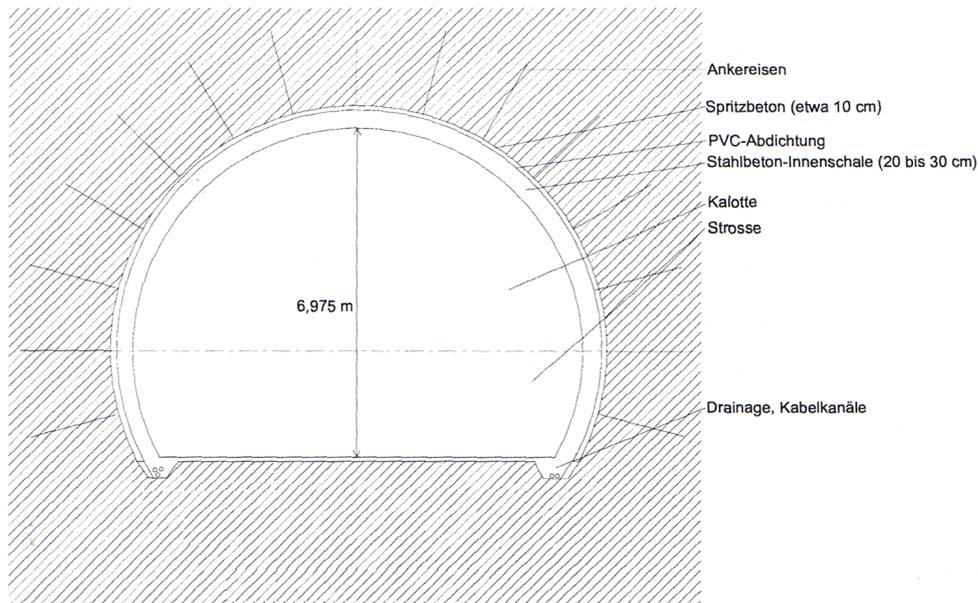


Abbildung A.6: Querschnitt eines Straßentunnels, bergmännisch aufgeföhren nach „Neuer Österreicherischer Tunnelbauweise“. (nach [Donaueschingen91])

A.3.2 Großbrücken

Bei Großbrücken an Bundesfernstraßen gibt es drei Arten: Aus Spannbeton, aus Stahlverbund und aus Stahl. Bei weitem am häufigsten sind die Spannbetonbrücken ([BMV95], S. 55). Großbrücken werden in getrennten Überbauten für jede Fahrbahn als einzelliger Hohlkastenquerschnitt gebaut (Abbildung A.7). Dabei liegen die Stützweiten bei Spannbetonbrücken bei 40 m und bei Stahlverbundbrücken bis ca. 145 m. Stahlbrücken werden meist einteilig mit Stützweiten bis 230 m gebaut. Für eine zweistreifige Fahrbahn wird ein 15 m breiter Überbau benötigt.

Bei den Neubaustrecken der Bahn werden fast ausschließlich Spannbetonbrücken gebaut. Sie weisen für zweigleisigen Betrieb eine Breite von etwa 14 bis 15 m auf.

Zusammenfassung

Die Standardisierung in der Bauweise der Verkehrswege und der Bauwerke macht es möglich, aus Übersichtsplänen und Skizzen das eingebaute Volumen der Materialien zu berechnen. Mit diesen Volumenangaben können die Bilanzen durchgeführt werden. Die Bilanzen, die mit Bauplänen und Standardbauweisen berechnet wurden, gelten allerdings eher für typisierte Projekte als für den tatsächlichen Bauaufwand. Für die Mehrzahl der Projekte lagen allerdings Volumen- oder Ge-

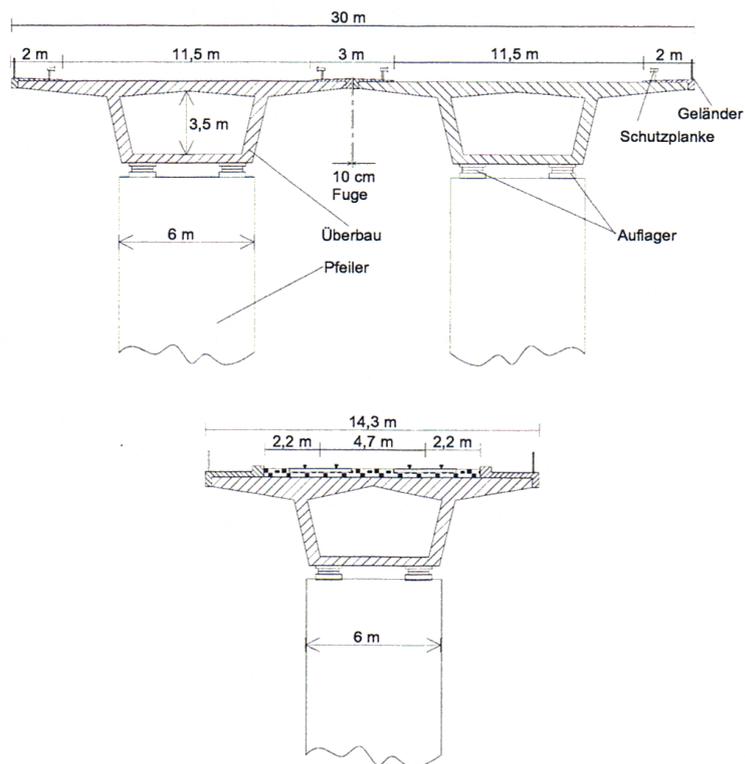


Abbildung A.7: Querschnitt eines Straßenbrückenüberbaus und eines Bahnbrückenüberbaus. Beide sind in der gezeigten Version Spannbetonüberbauten. In der Bilanz sind die Fahrwege selber nicht enthalten, da sie schon in der Bilanz des jeweiligen gesamten Fahrweges mitberechnet wurden. (nach [BMV95] und [Vallée95])

wichtsdaten vor und mussten nicht berechnet werden.

Anhang B

Spezifische Daten zur Bilanzierung der Beispielprojekte

Im Folgenden sind die spezifischen Emissionen, die mit der Herstellung der Materialien verbunden sind, in einer Tabelle dargestellt. Die Quellen für die Angaben sind identisch mit den KEA-Werten in Tabelle 3.1 oder beruhen auf eigener Berechnung. In einer weiteren Tabelle sind die beim Einbau der Materialien notwendigen Arbeiten mit ihrem Energieaufwand und ihren Emissionen aufgeführt (Die Werte der Arbeitsleistungen sind aus [Beyert85] und [infras95] berechnet).

Material	CO2	Fehler CO2	CO	Fehler CO	NOx	Fehler NOx	SO2	Fehler SO2	CH4	Fehler CH4	KWS	Fehler KWS	Einheit
Acrylat	1638	90	2.184	0,18	39,13	3,225	127,4	10,5	20,02	1,65	0	0	t/t
Aluminium	6261,3	2101,1	13,9392	7,016	22,04078	11,09435	59,79424	30,09777	34,2332	17,2315	0	0	t/t
Aluminium (primär)	14300	4799	31,887	16,0244	50,3407	25,3381	136,5623	68,7394	78,1842	39,3545	0	0	t/t
Basaltsteine	2,2742	0,1895	0,00042	0,000035	0,00593	0,000494	0,0048	0,0004	0,00002	0,0000017	0,00003	0,0000025	t/t
Bitumen	13,691	0,327	0,00255	0,000091	0,03568	0,00128	0,02891	0,00104	0,00014	0,000005	0,00021	0,0000075	t/t
Epoxidharz	1800	360	2,4	0,72	43	12,9	140	42	22	6,6	0	0	t/t
Faserstoffleim	238,81	98,56	0,04458	0,0276	0,622226	0,3852	0,503984	0,312	0,00243	0,0015	0,003625	0,00224411	t/m³
Füller	7,4107	1,1763	0,00138	0,000219	0,01931	0,00307	0,01565	0,00248	0,00008	0,000013	0,00011	0,000017	t/t
gebrochener Naturstein	2,2742	0,1895	0,00042	0,000035	0,00593	0,000494	0,0048	0,0004	0,00002	0,0000017	0,00003	0,0000025	t/t
Glasfaser	3480	348	3,16089	0,47412	3,207695	0,48115	2,75973	0,41396	0,04507	0,0067755	0,05201	0,0078015	t/t
HDPE_Rohr	1137	341,1	1,06618	0,479781	1,62393	0,7307685	1,14588	0,515646	0,95737	0,43082	0,51935	0,23371	t/t
Keramik	833	117,3	0	0	2,4	0,507	3	0,634	0	0	0	0	t/t
Kies	2,4833	0,74499	0,00046	0,000207	0,00647	0,002912	0,00524	0,00236	0,00003	0,0000135	0,00004	0,000018	t/t
Kies/Brechsand	4,4699	1,341	0,00083	0,0003735	0,01165	0,0052425	0,00944	0,004248	0,00005	0,0000225	0,00007	0,0000315	t/t
Klinker	833	117,3	0	0	2,4	0,507	3	0,634	0	0	0	0	t/t
Kupferdraht	3991	468,58	7	1,233	14,5	2,55	7,9	1,39	2,8	0,49	0	0	t/t
Lock	1638	491,4	2,184	0,9828	39,13	17,6085	127,4	57,33	20,02	9,009	0	0	t/t
LDPE (Form)	1089,7	326,9	1,02176	0,459792	1,556255	0,7	1,098128	0,4942	0,91748	0,4129	0,497711	0,22397	t/t
Mörtel	135,83	40,749	0,11085	0,04988	0,18579	0,0836	0,18501	0,0833	0,27869	0,12541	0,00007	0,0000315	t/m³
Polyester	3629,7	2722,3	3,40349	2,5526	5,183917	3,8879	3,657886	2,7434	3,05613	2,2921	1,657885	1,24342	t/t
Polypropylen	2614,1	784,23	1,82513	0,82131	4,72203	2,1249	3,56769	1,60545	1,50151	0,67568	0,83045	0,3737	t/t
Polystyrol	1396	419	1,3086	0,6096	1,9932	0,8965	1,4065	0,633	1,1751	0,5288	0,6375	0,2869	t/t
PVC_Form	1944	97,2	2,7	0,2025	16	1,2	13	0,975	20	1,5	0	0	t/t
Silber	8588	1008	15,06	2,6534	31,2034	5,4875	17	2,99	6,025	1,0545	0	0	t/t
Siloxan & Silikonartige	1800	1350	2,4	1,8	43	32,25	140	105	22	16,5	0	0	t/t
Sprengstoff	2739	821,7	25,6492	11,5121	15,4774	6,96483	11,5849	5,2132	0	0	7,9613	3,5826	t/t
Stahl	401,9	98,02	0,07491	0,01827	1,04728	0,2554	0,84861	0,20698	0,00409	0,000998	0,00609	0,00149	t/t
Stahl (verzinkt)	1900	223	0,0837	0,0204	1,1699	0,2853	0,948	0,2312	0,00457	0,00111	0,0068	0,0017	t/t
Stahlbeton	180,3	54,09	0	0	0,643	0,2894	0,4355	0,196	0	0	0	0	t/t
Steingut	221	66,3	0	0	0,753	0,339	1,187	0,5342	0	0	0	0	t/t
Teer	113,87	5,69	0,02122	0,0015915	0,296713	0,022253	0,2404	0,018	0,00116	0,000087	0,001725	0,00013	t/t
Zement	897	90,55	0,351	0,05315	2,47	0,374	2,929	0,4435	1,876	0,2841	0,19	0,0288	t/t

Spezifische Emissionen bei der Herstellung von verschiedenen Materialien, bei Einträgen „0“ sind keine Daten verfügbar.

Leistung	spez. Energie-einsatz	Fehler spez. Energie-einsatz	Einheit spez. Energie-einsatz	CO2	Fehler CO2	CO	Fehler CO	NOx	Fehler NOx	SO2	Fehler SO2	CH4	Fehler CH4	KWS	Fehler KWS
Abbrucharbeiten	13,7	1,2	MJ/m ³	1,1282	0,05641	0,0069	0,00069	0,012841	0,0012841	0,00071	0,000071	0,00021	0,000021	0,004278	0,0004278
Abbrucharbeiten	18,5	10	MJ/t	1,5235	0,076175	0,00931	0,000931	0,01734	0,001734	0,000959	0,0000959	0,00029	0,000029	0,005777	0,0005777
Baggerarbeiten	242	100	MJ/h	31,629	13,0698	0,0059	0,003657	0,08242	0,051087	0,066785	0,041396	0,00032	0,000198	0,000479	0,000297
Betonstraßenbau	3,8	1,9	MJ/m ²	0,3134	0,0627	0,0019	0,00038	0,003566	0,0007156	0,000197	0,000039	0,000059	0,000118	0,00118	0,00024
Bohren	400	160	MJ/h	32,94	1,647	0,20132	0,020132	0,37492	0,037492	0,020726	0,0020726	0,000625	0,000625	0,124899	0,0124899
Brechen Stein	11,05	6	MJ/t	1,4455	0,072275	0,0027	0,00027	0,003767	0,0003767	0,003052	0,0003052	0,000015	0,0000015	0,0000219	0,00000219
Erdarbeiten	5,2	0,8	MJ/m ³	0,4282	0,02141	0,00262	0,000262	0,004874	0,0004874	0,000269	0,0000269	0,000081	0,0000081	0,001624	0,0001624
Fräsen	21,2	15	MJ/t	1,7458	0,08729	0,01067	0,01067	0,019871	0,0019871	0,001098	0,0001098	0,00033	0,000033	0,00662	0,000662
Grader	793	350	MJ/h	65,304	32,65	0,39912	0,29934	0,743279	0,55745925	0,04109	0,0308175	0,0124	0,0093	0,247612	0,185709
Heißeinbau	3	1	MJ/t	0,2471	0,012355	0,00151	0,000151	0,002812	0,0002812	0,000155	0,0000155	0,000047	0,0000047	0,000937	0,0000937
Kompressor	1,5	0,3	MJ/m ³	0,1235	0,006175	0,00075	0,000075	0,001406	0,0001406	0,000077	0,0000077	0,000023	0,0000023	0,000468	0,0000468
Kran	276	150	MJ/h	22,7288	11,3637	0,1389	0,1042	0,2587	0,194	0,0143	0,01073	0,004316	0,00324	0,06618	0,06464
Pumpen	1600	400	MJ/m ³	209,12	52,28	0,03898	0,019	0,544928	0,27246	0,441552	0,22038	0,00213	0,001065	0,003168	0,001584
Rammen	549	300	MJ/h	45,21	13,563	0,27631	0,165786	0,514578	0,3087468	0,028447	0,0170682	0,00858	0,005148	0,171424	0,1028544
Schneiden	0,25	0,02	MJ/m	0,0206	0,00206	0,00013	0,000026	0,000234	0,0000468	0,000013	0,0000026	0,0000039	0,00000078	0,0000781	0,00001805
Schwarzdeckenfertiger	0,77	0,4	MJ/m ²	0,06348	0,0127	0,000385	0,000077	0,0007226	0,000145	0,00004	0,000008	0,000012	0,000024	0,000048	0,0000048
Vakuumbehandeln	1,5	0,3	MJ/m ³	0,1235	0,0247	0,00075	0,00015	0,0002812	0,0002812	0,000077	0,00001554	0,000023	0,0000046	0,000468	0,0000936
Verlichten	0,5	0,1	MJ/m ²	0,0412	0,00824	0,00025	0,00005	0,000469	0,0000938	0,0000289	0,00000518	0,0000078	0,00000156	0,000156	0,0000312
Wurzelstöcke entfernen	11,8	3,1	MJ/m ³	0,9717	0,29151	0,00594	0,001782	0,01106	0,0003318	0,000611	0,0001833	0,00018	0,000054	0,003685	0,0011055

Spezifische Emissionen bei der Herstellung von verschiedenen Materialien, bei Einträgen „0“ sind keine Daten verfügbar.

Anhang C

Bilanzen der Beispielprojekte

In diesem Anhang ist die Lage der Beispielprojekte auf Karten eingezeichnet, ferner sind in folgenden Tabellen die Projektspezifikationen und die berechneten KEA-Werte enthalten.

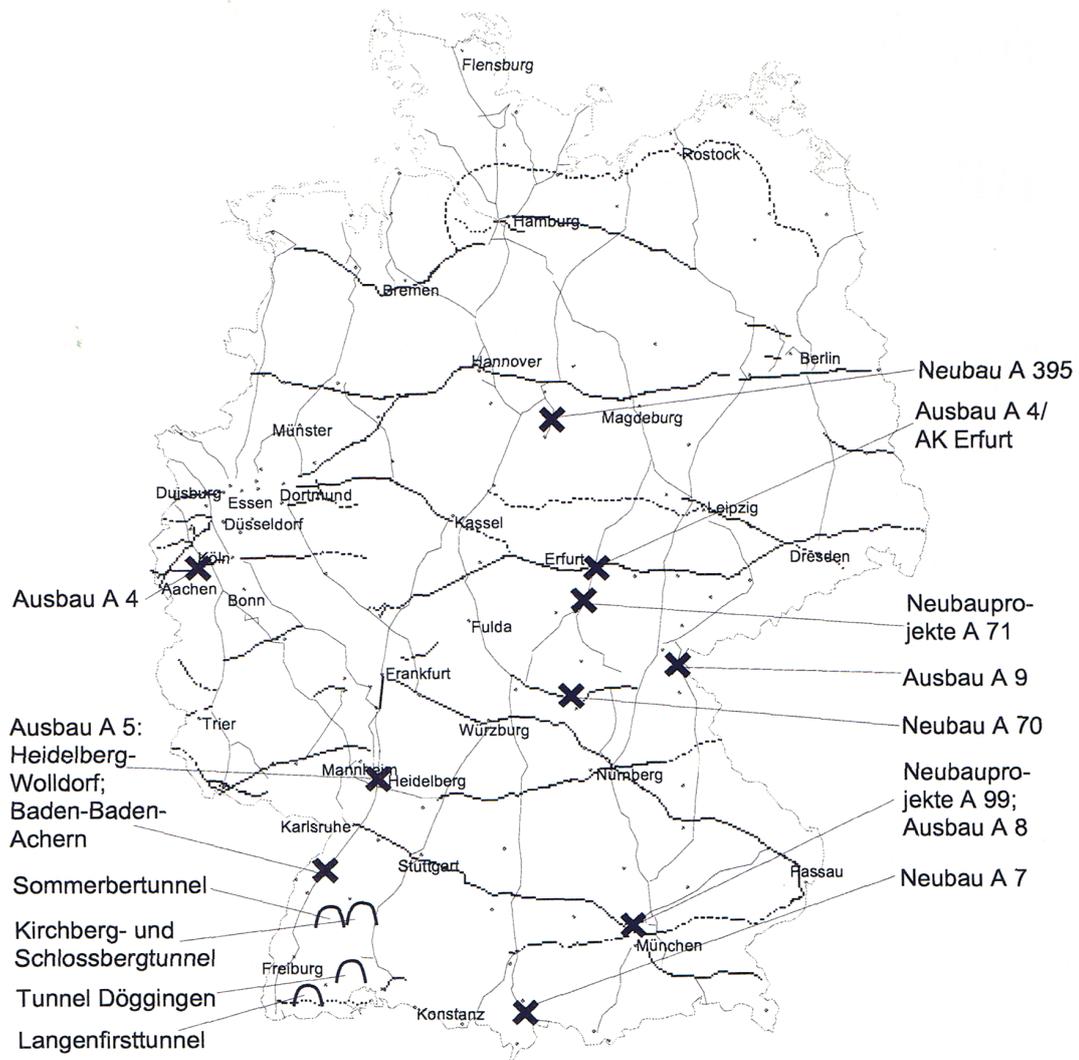


Abbildung C.1: Lage der Straßen-Beispielprojekte (Karte mit dem in dieser Arbeit berücksichtigten Autobahnnetz).

Projektname	Projektlänge		Fehler Projektlänge	Korridor	Art	Fehler KEA			Fehler spez. KEA	Fehler Herstellung	Anteil	
	km	km				GJ	GJ	GJ/km			%	Einbau
A395	6,9	0,1	K7	Neubau	280.000	33.000	40.000	4.800	4.800	95,0	1,6	3,5
A7	15,23	0,01	K7	Neubau	770.000	110.000	50.400	7.000	7.000	95,1	1,8	3,1
A71 (5311)	7,5	0,1	K7	Neubau	131.500	24.500	17.500	3.300	3.300	96,9	0,0	3,1
A71 (5312)	7,66	0,1	K7	Neubau	146.700	25.100	19.200	3.300	3.300	96,8	0,1	3,1
A71 (5321)	10,284	0,3	K7	Neubau	477.500	62.000	46.400	6.030	6.030	98,8	0,1	1,2
A99	10,855	0,001	K8	Neubau	681.000	93.700	63.000	8.600	8.600	94,0	0,2	5,8
A99 (Spangelschenried)	5,47	0,01	K8	Neubau	272.500	37.000	50.000	6.800	6.800	93,9	0,3	5,8
A70	44,22	0,1	K6	Neubau	1.531.000	163.000	34.600	3.700	3.700	91,5	0,2	8,3
B255 (Boden)	1,56	0,001		Ortsumgehung	82.600	8.500	53.000	5.500	5.500	91,3	5,4	3,4
B41 (Weierbach)	1,56	0,01		Ortsumgehung	47.500	4.800	30.500	3.100	3.100	84,3	1,8	13,9
A4 (Köln)	17	1	K4	Ausbau	219.500	33.800	12.910	1.990	1.990	97,0	0,6	2,3
A4 (Erfurt)	6,659	0,001	K4	Ausbau	304.000	32.300	45.600	4.850	4.850	97,8	0,5	1,7
A5 (Heidelberg-Walldorf)	15,429	0,002	K135	Ausbau	337.000	91.700	21.840	5.940	5.940	94,1	0,6	5,2
A5 (Baden-Baden - Bühl)	9,41	0,01	K135	Ausbau	62.000	7.400	6.590	790	790	99,1	0,0	0,9
A5 (Bühl - Achern)	9	1	K135	Ausbau	81.300	12.200	9.030	1.350	1.350	97,8	1,5	0,7
A8	4,501	0,001	K8	Ausbau	203.000	25.240	45.100	5.600	5.600	96,0	0,6	3,4
A9	11,6	0,1	K9	Ausbau	215.000	29.400	18.500	2.500	2.500	95,6	1,0	3,4
ArnstadtfNord (A71)	0,6	0,05	K7	Anschlussstelle	55.500	14.300				99,1	0,4	0,5
ArnstadtfSüd (A71)	0,15	0,05	K7	Anschlussstelle	20.000	5.000				97,5	1,1	1,3
Zellmehlis (A71)	0,28	0,1	K7	Anschlussstelle	34.600	9.800				98,9	0,1	1,0
Eichelborn (A4)	1,175	0,1	K4	Anschlussstelle	24.900	2.300				96,6	0,0	3,3
ErfurtOst (A4)	1	0,2	K4	Anschlussstelle	26.000	2.200				98,3	0,1	1,6
Autobahnkreuz Erfurt	6,6	0,2	K4/K9	Autobahnkreuz	176.000	37.200				94,0	4,5	1,5
Geratalbrücke (A71)	0,204	0,001	K7	Großbrücke	56.800	12.100	9,8	2,0	2,0	99,4	0,0	0,6
Wipralbrücke (A71)	0,176	0,001	K7	Großbrücke	61.600	14.400	12,3	2,9	2,9	99,0	0,0	1,0
Steinatalbrücke (A71)	0,34	0,001	K7	Großbrücke	163.400	35.200	16,9	3,6	3,6	98,9	0,2	0,8
Dickelsbach (B41)	0,128	0,001		Großbrücke	12.100	1.600	8,2	1,1	1,1	91,9	6,9	1,3
Kirchbergtunnel	1,829	0,001		Tunnel	272.800	53.300	149	29	29	95,9	2,9	1,2
Schlossbergtunnel	0,83	0,001		Tunnel	79.700	17.300	96	21	21	94,9	3,9	1,2
Langenfristunnel	0,228	0,1		Tunnel	38.200	9.300	168	41	41	96,2	2,4	1,4
Döggingen	0,952	0,001		Tunnel	203.200	49.500	112	29	29	70,0	29,2	0,8
Sommerbergtunnel	1,085	0,001		Tunnel	122.800	62.800	113	58	58	94,6	4,0	1,5
Tunnel Behringen (A 71)	0,93	0,001	K7	Tunnel	159.600	44.900	172	48	48	94,8	2,7	2,4

Tabelle der Straßen-Beispielprojekte mit KEA-Werten und Anteilen von Material, Arbeitsleistungen und Transporten.

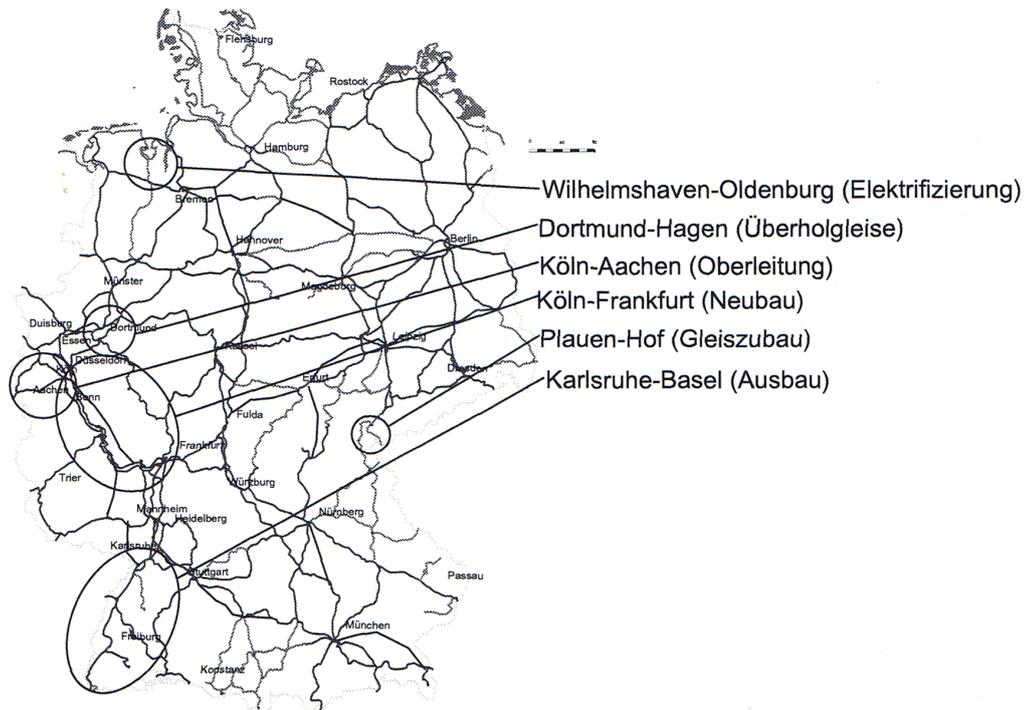


Abbildung C.2: Lage der Schienen-Beispielprojekte (Karte mit den in dieser Arbeit berücksichtigten Hauptstrecken der Deutschen Bahn).

Projektname	Projektlänge km	Fehler Projekt- länge km	Korridor	Art	KEA		Fehler spez. KEA		Fehler spez. KEA GJ/km	Anteil Herstel- lung %	Anteil Einbau %	Anteil Transport %
					GJ	GJ	GJ/km	GJ/km				
Köln-Aachen	70	1	K4	Erneuerung Oberleitung	58.500	29.500	835	420	420	99,6	0	0,4
Karlsruhe-Basel	193	10	K1	Zubau 2 Gleise	2.950.000	400.000	15.300	2.200	2.200	91,9	0,1	7,9
Plauen-Hof	36	1	K9	Zubau 1 Gleis	230.000	34.000	6.340	950	950	82,7	0,7	16,6
Dorfmund-Hagen	19	1	K1	Überholgleise	61.700	19.900	3.250	1.050	1.050	95,3	0,1	4,5
Wilhelmshaven-Oldenburg	52	1	K1	Elektrifizierung	69.000	20.000	1.300	380	380	97,7	1,5	0,8
Köln-Frankfurt	135	10	K1	Neubau	4.900.000	500.000	36.300	3.900	3.900	97,2	1,3	1,5

Tabelle der Beispielprojekte Bahn mit KEA-Werten und Anteilen von Material, Arbeitsleistungen und Transporten.

Anhang D

Materialtabellen der Beispielprojekte

Die folgenden Tabellen enthalten die Mengendaten der Beispielprojekte. Verschiedene Materialien sind in den Tabellen mehrfach aufgeführt. In diesen Fällen stammen sie aus unterschiedlichen Quellen. Ist zum Beispiel mehrfach das Material „Stahl“ genannt, so kann bei Bahnprojekten Schienenstahl, Stahl für Masten, Schwenkausleger oder Signalanlagen gemeint sein. Die Transportentfernung ist in Kilometern angegeben.

Neubau A 395

Material Neubau der A 395

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	14467,92	4225,540717	t	15	8
Beton B25	2277	345	m ³	15	8
Binderschicht (grob)	27048	7728,675632	t	15	8
Bitumen	1795,461696	502,0708251	t	0	0
Bitumen	1257,732	426,631139	t	0	0
Bitumen	940,4148	284,0267837	t	0	0
Erdarbeiten	790000	330000	m ³	15	10
Füller	2834,93952	2015,253584	t	0	0
Füller	1622,88	934,5970313	t	0	0
Füller	1446,792	605,7562065	t	0	0
gebrochener Naturstein	53820	7233,925908	t	15	8
Heißeinbau	27048	7728	t	0	0
Heißeinbau	14468	4226	t	0	0
Kies	125580	10539,37632	t	15	8
Kies	1639,44	260,8713342	t	0	0
Kies/Brechsand	33074,2944	9429,939533	t	0	0
Kies/Brechsand	18933,6	6048,539682	t	0	0
Kies/Brechsand	10633,9212	3426,226709	t	0	0
Stahl	167,5872	39,80635949	t	15	8
Stahl	115,92	38,40334591	t	15	8
Stahlbeton	1991,2365	183,7306453	t	15	8
Stahlbeton	12068,1	1830,767002	t	15	8
Stahlbeton	484,95	323,3207163	t	15	8
Tragschicht	47248,992	11658,32339	t	15	8
Verdichten	138000	2430	m ²	0	0
Zement	188,991	36,58464329	t	0	0

Das untersuchte Teilstück ist 6,9 km lang und liegt südlich von Braunschweig zum Teil im Oderwald. Die zwei bituminös befestigten Fahrbahnen haben je zwei Fahrstreifen und eine Breite von je 10 m. Die Frostschuttschicht wurde mit einer Dicke von 35 cm Kies und 15 cm Brechkorn eingebaut. Die bituminöse Tragschicht hat eine Dicke von 14 cm, die Asphaltbinderschicht ist 8 cm dick. Die Deckschicht wurde mit 4 cm Stärke Splittmastixasphalt eingebaut. Diese Angaben stammen aus [BMV96a].

Neubau A 7

Material Neubau der A 7

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	27543,3027	10071,57046	t	15	10
Binderschicht (grob)	77238,7	21589,20652	t	15	10
Bitumen	5859,598906	1614,82631	t	0	0
Bitumen	3591,59955	1199,517263	t	0	0
Bitumen	1790,314676	668,9807054	t	0	0
Erdarbeiten	2500000	250000	m ³	15	10
Füller	9251,998272	6562,265301	t	0	0
Füller	4634,322	2654,651186	t	0	0
Füller	2754,33027	1302,741527	t	0	0
Heißeinbau	77239	21598	t	0	0
Heißeinbau	27543	10072	t	0	0
Kies	455377	36409,82649	t	15	10
Kies/Brechsand	107939,9798	30346,89077	t	0	0
Kies/Brechsand	54067,09	16971,86343	t	0	0
Kies/Brechsand	20244,32748	7898,410317	t	0	0
Stahlbeton	10985	5000	m ³	15	10
Stahlbeton	9197	5000	m ³	15	10
Tragschicht	154199,9712	37338,97313	t	15	10
Verdichten	350290	3046	m ²	0	0

Der 15,23 km lange Neubau verknüpft den Grenzübergang nach Österreich bei Pfronten und das Endstück der A 7 bei Nesselwang. Die Angaben in der Tabelle stammen direkt von der Autobahndirektion Südbayern. Kleinbauwerke sind in der Bilanz enthalten, der geplante Grenztunnel bei Füssen dagegen nicht.

Neubau A 71

Material Neubau der A 71, Abschnitt 5311

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Beton B25	750	375	m ³	10	5
Beton B35	40500	1645	m ³	10	5
Bitumen	0,043524	0,070136965	t	0	0
Bitumen	0,0489645	0,079801458	t	0	0
Erdarbeiten	9900	1000	m ³	5	3
Fasermaterial	144,93492	223,809968	m ³	0	0
Fasermaterial	163,051785	254,9030345	m ³	0	0
Füller	6559	4792	t	10	5
Kies	148200	12299,68413	t	10	5
Kies	50681	6916	t	10	5
Kies	28269	1671,709067	t	0	0
Kies	540	271,2730405	t	0	0
Polypropylen	104	17	t	50	30
Rammen	12,5	7,291335971	h	0	0
Stahl	212,08	98,67561705	t	30	20
Stahl	90,48	48,89308296	t	30	20
Stahl	182,16	43,25996682	t	8,5	5
Stahl	126	41,70974736	t	22	10
Stahlbeton	655,875	60,46396134	t	10	5
Stahlbeton	19875	6361,768622	t	10	5
Stahlbeton	312,17	156,1822711	t	10	5
Zement	1969	700	t	10	5
Zement	2385	619	t	10	5
Zement	4212	439,6514146	t	0	0
Zement	62,25	32,01586521	t	0	0

Material Neubau der A 71, Abschnitt 5321

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	21562,967	6321,991516	t	15	7
Beton B25	2057	1030	m ³	10	5
Binderschicht (grob)	40312,3	11562,86999	t	15	7
Bitumen	3440,558122	953,6063507	t	0	0
Bitumen	1874,52195	637,5773556	t	0	0
Bitumen	1401,592855	424,8376753	t	0	0
Füller	5432,460192	3856,48247	t	0	0
Füller	2418,738	1394,23572	t	0	0
Füller	2156,2967	904,511558	t	0	0
Heißeinbau	40313	11564	t	0	0
Heißeinbau	21563	6323	t	0	0
Kies	374388	31480	t	10	5
Kies	1481,04	745,0864648	t	0	0
Kies/Brechsand	63378,70224	17916,81668	t	0	0
Kies/Brechsand	28218,61	9042,333598	t	0	0
Kies/Brechsand	15848,78075	5122,606719	t	0	0
Rammen	17,14	9,778087116	h	0	0
Stahl	249,76	59,36215363	t	22	10
Stahl	172,768	57,41662867	t	22	10
Stahlbeton	1799,35	172,7844869	t	10	5
Stahlbeton	27252,6	8760,664776	t	10	5
Stahlbeton	2676,5	540,9772638	t	10	5
Tragschicht	90541,0032	22086,82252	t	15	7
Verdichten	205680	6343	m ²	0	0
Zement	2700	962	t	10	5
Zement	170,731	87,92988684	t	0	0

Material Neubau der A 71, Abschnitt 5312

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	8,502524	5,839219064	t	10	5
Asphaltbeton	892,92228	272,2626499	t	10	5
Beton B25	766	383,13	m³	10	5
Beton B25	196,4	40	m³	10	5
Beton B35	41364	1676	m³	10	5
Beton B45	47	10	m³	10	5
Binderschicht (grob)	23,8385	14,68423417	t	10	5
Binderschicht (grob)	834,666	307,9747291	t	10	5
Bitumen	0,04445028	0,071646957	t	0	0
Bitumen	0,05000796	0,081502039	t	0	0
Bitumen	1,10849025	0,712247644	t	0	0
Bitumen	0,55266406	0,381922699	t	0	0
Bitumen	110,8112121	32,46311247	t	0	0
Bitumen	38,811969	15,98187225	t	0	0
Bitumen	58,0399482	18,25155119	t	0	0
Erdarbeiten	33000	15000	m³	5	3
Fasermaterial	148,0194324	228,6333356	m³	0	0
Fasermaterial	166,5265068	260,3350454	m³	0	0
Füller	6699	4894	t	10	5
Füller	1,43031	1,134769983	t	0	0
Füller	0,8502524	0,637203591	t	0	0
Füller	174,9650717	125,3116706	t	0	0
Füller	50,07996	31,120009	t	0	0
Füller	89,292228	38,19487771	t	0	0
Heißeinbau	23,85	14,68	t	0	0
Heißeinbau	8,5	5,84	t	0	0
Heißeinbau	834,67	307,97	t	0	0
Heißeinbau	892,92	272,25	t	0	0
Kies	151361,6	12555,36497	t	10	5
Kies	51763	7062	t	10	5
Kies	10629,216	1270,465996	t	10	5
Kies	28872,072	1705,411032	t	0	0
Kies	551,52	277,1533596	t	0	0
Kies	141,408	29,60898303	t	0	0
Kies	31,866	6,91564668	t	0	0
Kies/Brechsand	16,68695	10,55176953	t	0	0
Kies/Brechsand	6,24935514	4,375237098	t	0	0
Kies/Brechsand	2041,25917	608,692272	t	0	0
Kies/Brechsand	584,2662	231,176136	t	0	0
Kies/Brechsand	656,2978758	219,1308601	t	0	0
Polypropylen	106	17,7	t	50	30
Rammen	12,76666667	7,432572993	h	0	0
Stahl	216,56	100,8363419	t	30	20
Stahl	92,4	49,93335984	t	30	20
Stahl	186,08	44,22121523	t	30	20
Stahl	128,72	42,59040363	t	30	20
Stahl	19,64	4,46	t	10	5
Stahl	7,05	1,66	t	10	5
Stahl	0,392	0,088136315	t	10	5
Stahl	0,248	0,056085738	t	10	5
Stahl	0,112	0,03203061	t	10	5
Stahlbeton	669,867	61,74033674	t	10	5
Stahlbeton	20299	6502,255027	t	10	5
Stahlbeton	318,848	159,4951544	t	10	5
Tragschicht	2916,084528	763,2780972	t	10	5
Verdichten	108,15	7,35	m²	0	0
Verdichten	8517	758,8	m²	0	0
Zement	2011	715	t	10	5
Zement	2436	632	t	10	5
Zement	4301,856	448,8651624	t	0	0
Zement	63,578	32,70936019	t	0	0
Zement	16,3012	3,8574209	t	0	0
Zement	6,016	1,363561513	t	0	0

Die hier betrachteten Teilstücke der A 71 führen von Norden vom Autobahnkreuz Erfurt A 4 / A 71 durch den Thüringer Wald. Die Linienführung ist von außergewöhnlich vielen Großbauwerken dominiert. Von 129 km liegen 11 % im Tunnel, 9 % der Strecke sind Brücken mit einer Länge über 500 m. Zum Teil wird die Strecke als Bünde-

lungsstrecke zusammen mit der ICE-Linie von Erfurt in Richtung München angelegt. Die hier bilanzierten Aufwendungen folgen der Aufteilung der Bauleistungen zwischen Deutscher Bahn AG und der DEGES (Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH), von der auch detaillierte Pläne zur Verfügung gestellt wurden, die der Bilanz zu Grunde liegen.

Die Abschnitte 5311 und 5312 sind als Betondecke auf hydraulisch gebundener Tragschicht geplant. Der Regelquerschnitt ist der RQ26 mit zwei 10 m breiten befestigten Fahrbahnen. Der Untergrund wird 15 cm tief mit Zement verfestigt, darauf folgt die Frostschuttschicht mit 38 cm gebrochenem Naturstein und die 15 cm dicke hydraulisch gebundene Tragschicht. Zwischen der 27 cm dicken Betondecke und der Tragschicht wird ein Geotextil auf Polypropylenbasis eingebaut.

Der Abschnitt 5321 der A 71 soll mit bituminöser Deckschicht gebaut werden. Der Regelquerschnitt ist etwas schmaler (25,5 m), wobei die Innenrandstreifen von 75 auf 50 cm verkleinert sind. Wie bei den Abschnitten 5311 und 5312 wurde der Untergrund 15 cm tief hydraulisch verfestigt. Dann folgt eine 55 cm dicke Frostschuttschicht, eine 15 cm dicke Schottertragschicht und eine 18 cm dicke bituminöse Tragschicht. Darauf wird die 8 cm dicke Binderschicht und 4 cm Deckschicht aufgebracht.

Neubau A 99

Material Neubau der A 99

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	41253,88475	10319,71123	†	91	50
Binderschicht (grob)	61699,82	17600,72987	†	10	5
Bitumen	6436,051771	1761,395399	†	0	0
Bitumen	2869,04163	972,0495409	†	0	0
Bitumen	2681,502509	701,7795479	†	0	0
Erdarbeiten	200000	100000	m ³	2	1,5
Füller	10162,18701	7200,325007	†	0	0
Füller	3701,9892	2131,058305	†	0	0
Füller	4125,388475	1611,415249	†	0	0
Heißeinbau	45400	10040	†	0	0
Heißeinbau	25440	8105	†	0	0
Kies	376494,82	30207,27778	†	5	2
Kies/Brechsand	118558,8484	33110,3915	†	0	0
Kies/Brechsand	43189,874	13779,10254	†	0	0
Kies/Brechsand	30321,60529	8634,284529	†	0	0
Tragschicht	169369,7834	40643,71804	†	73	50
Verdichten	314795	3271	m ²	0	0

Die A 99 bildet den Münchener Nordring, diese Bilanz bezieht sich auf die Verbindung Autobahndreieck Feldmoching bis zum Tunnel Allach und vom Tunnel Allach bis zur Lochhausener Straße, insgesamt 10,9 km. Die A 99 wird stark belastet sein und daher von vorneherein sechsstreifig gebaut. Dank der Angaben der Autobahndirektion Südbayern ist diese Bilanz ausführlich möglich gewesen. Der Oberbau besteht aus

46 cm Frostschuttschicht, 22 cm Asphalttragschicht, 8 cm Asphaltbinder und 5 cm Asphaltdeckschicht.

Material Neubau der A 99, Spange Eschenried

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	16488,711	4124,79884	t	91	30
Binderschicht (grob)	24659,25	7035,443609	t	10	5
Bitumen	2572,212625	704,0852995	t	0	0
Bitumen	1146,655125	388,5351685	t	0	0
Bitumen	1071,766215	280,5012368	t	0	0
Erdarbeiten	130000	50000	m ³	2	1
Füller	4061,388355	2877,739881	t	0	0
Füller	1479,555	851,7403536	t	0	0
Füller	1648,8711	644,0725783	t	0	0
Heißeinbau	30200	4031	t	0	0
Heißeinbau	16920	3056	t	0	0
Kies	150468,76	12098,87905	t	5	2
Kies/Brechsand	47382,86414	13235,16982	t	0	0
Kies/Brechsand	17261,475	5507,68053	t	0	0
Kies/Brechsand	12119,20259	3451,107851	t	0	0
Tragschicht	67689,80592	16247,48784	t	73	30
Verdichten	125810	1094	m ²	0	0

Die Spange Eschenried bildet mit der A 99 und der A 8 ein Dreieck. Sie dient einer direkten Verknüpfung des Münchener Nordrings nach Westen. Der Bau erfolgt gleichzeitig mit dem Neubau der A 99 (siehe oben). Diese Autobahn wird vierstreifig mit einem Oberbau wie bei der A 99 gebaut. Die Mengenangaben stammen ebenfalls von der Autobahndirektion Südbayern.

Neubau A 70

Der Bau der A 70 ist im Grunde kein Neubau, sondern Sanierung und Ausbau der B 505 von Bamberg nach Kulmbach. Die bestehende Fahrbahn hat eine Breite von 8,5 m bis 11,5 m. Die 8,5 m breiten Fahrbahnabschnitte werden auf 10 m ergänzt, und es wird eine neue, 10 m breite Fahrbahn daneben gebaut. Zur Sanierung wird die bestehende Fahrbahn abgefräst und mit einer neuen Deckschicht versehen. Bei den Bauwerken wird in der Regel der komplette Überbau neu gebaut. Es müssen insgesamt etwa 70.000 ± 9.400 t Deckschicht gefräst werden. Die Daten in der Tabelle stammen zum größten Teil direkt von der Autobahndirektion Nordbayern, einige Daten wurden anhand von zusätzlichen Angaben berechnet.

Material Neubau der A 70

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	2565,8992	670,7466892	t	56	10
Asphaltbeton	3473,5178	966,3448919	t	56	10
Asphaltbeton	19721,938	5412,453064	t	56	10
Asphaltbeton	4094,52	971,7429168	t	50	25
Asphaltbeton	3019,392	1166,264975	t	50	25
Asphaltbeton	60342,9885	14044,75592	t	50	25
Binderschicht (grob)	3687,25	1197,294709	t	56	10
Binderschicht (grob)	4988,2	1688,29638	t	56	10
Binderschicht (grob)	28322	9498,346104	t	56	10
Binderschicht (grob)	5880	1797,790822	t	50	25
Binderschicht (grob)	5644,8	2475,810036	t	50	25
Binderschicht (grob)	86656,5	32215,75949	t	50	25
Bitumen	171,457125	63,88986182	t	0	0
Bitumen	171,9152464	46,735448	t	0	0
Bitumen	231,9513	89,22383268	t	0	0
Bitumen	232,7256926	67,03403707	t	0	0
Bitumen	1477,166856	486,3611177	t	0	0
Bitumen	1316,973	503,0203027	t	0	0
Bitumen	1321,369846	375,8025367	t	0	0
Bitumen	613,35648	174,6176663	t	0	0
Bitumen	273,42	97,39868834	t	0	0
Bitumen	274,33284	68,2496884	t	0	0
Bitumen	588,8222208	264,9721357	t	0	0
Bitumen	262,4832	124,723539	t	0	0
Bitumen	196,26048	77,29588162	t	0	0
Bitumen	9039,480523	2878,278586	t	0	0
Bitumen	4029,52725	1669,327045	t	0	0
Bitumen	4042,98023	988,1853871	t	0	0
Erdarbeiten	354000	10000	m³	20	10
Fräsen	68255,2	9437,429489	t	50	25
Füller	221,235	131,8972476	t	0	0
Füller	256,58992	102,1002745	t	0	0
Füller	299,292	180,7074047	t	0	0
Füller	347,35178	142,1162124	t	0	0
Füller	2332,36872	1706,839381	t	0	0
Füller	1699,32	1023,087972	t	0	0
Füller	1972,1938	801,8764471	t	0	0
Füller	968,4576	690,3825404	t	0	0
Füller	352,8	206,7664059	t	0	0
Füller	409,452	156,625118	t	0	0
Füller	929,719296	737,7278327	t	0	0
Füller	338,688	225,2644613	t	0	0
Füller	301,9392	147,6712401	t	0	0
Füller	14272,86398	10376,26014	t	0	0
Füller	5199,39	3239,551306	t	0	0
Füller	6034,29885	2291,222452	t	0	0
Kies	35880	8273,910804	t	50	25
Kies	34444,8	12364,23508	t	50	25
Kies	528788	104532,2648	t	50	25
Kies/Brechsand	2581,075	915,631088	t	0	0
Kies/Brechsand	1282,9496	422,27203	t	0	0
Kies/Brechsand	3491,74	1282,76665	t	0	0
Kies/Brechsand	1736,7589	595,0704762	t	0	0
Kies/Brechsand	27210,9484	9086,28217	t	0	0
Kies/Brechsand	19825,4	7226,926069	t	0	0
Kies/Brechsand	9860,969	3348,61321	t	0	0
Kies/Brechsand	11298,672	3277,484826	t	0	0
Kies/Brechsand	4116	1389,04622	t	0	0
Kies/Brechsand	2047,26	635,3912294	t	0	0
Kies/Brechsand	10846,72512	4918,226317	t	0	0
Kies/Brechsand	3951,36	1822,679068	t	0	0
Kies/Brechsand	2219,25312	908,8274177	t	0	0
Kies/Brechsand	166516,7465	53824,15547	t	0	0
Kies/Brechsand	60659,55	24158,69446	t	0	0
Kies/Brechsand	30171,49425	9258,863581	t	0	0
Stahl	247,52	70,78764889	t	50	25
Stahlbeton	55,1	25	m³	0	0
Stahlbeton	55,1	25	m³	0	0
Stahlbeton	183,7	90	m³	0	0
Stahlbeton	367,3	180	m³	0	0
Stahlbeton	330,6	110	m³	0	0
Stahlbeton	186,5	90	m³	0	0
Stahlbeton	7749	3200	m³	0	0
Stahlbeton	918,32	450	m³	0	0
Stahlbeton	8610	3568	m³	0	0
Tragschicht	38872,812	11732,52661	t	56	10
Tragschicht	16140,96	4074,961095	t	50	25
Tragschicht	15495,3216	6668,215835	t	50	25
Tragschicht	237881,0664	68974,49535	t	50	25

Neubau B 255

Material Neubau der Ortsumgebung Boden B 255

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiten	7436	1232,740037	t	0	0
Abbrucharbeiten	1100	100	m³	6	1
Acrylat	0,0555	0,0094	t	22	10
Asphaltbeton	3763,756	1097,498756	t	30	20
Asphaltbeton	27,5	0,5	t	30	20
Asphaltbeton	218,3744	67,31244615	t	30	20
Asphaltbeton	15	1	t	30	20
Asphaltbeton	264,43775	69,75623547	t	30	20
Asphaltbeton	10	1	t	30	20
Asphaltbeton	6,14178	1,218172935	t	30	20
Basaltsteine	430	10	t	200	50
Basaltsteine	17,1	5,981809706	t	200	50
Basaltsteine	114,4	8,63	t	200	50
Basaltsteine	47,17	2,673805528	t	200	50
Beton B25	76,8	6,41	m³	22	10
Beton B25	3,5	1,82	m³	22	10
Beton B25	43,5	3,265	m³	22	10
Beton B25	30	2	m³	22	10
Beton B25	0,324	0,006	m³	22	10
Beton B45	230	5	m³	22	10
Binderschicht (grob)	7036,4	2006,648668	t	30	20
Binderschicht (grob)	50	10	t	30	20
Bitumen	19,5	6,51	t	22	10
Bitumen	0,152	0,022	t	22	10
Bitumen	1,34415	0,230527768	t	22	10
Bitumen	501,83712	139,2415045	t	0	0
Bitumen	70,2571968	19,65103997	t	0	0
Bitumen	13,93992	4,116056317	t	0	0
Bitumen	23,7907968	7,113483168	t	0	0
Bitumen	3,42	0,588982173	t	0	0
Bitumen	327,1926	110,8321444	t	0	0
Bitumen	2,325	0,629960316	t	0	0
Bitumen	244,64414	73,7778683	t	0	0
Bitumen	1,7875	0,141288712	t	0	0
Bitumen	14,6310848	4,640225013	t	0	0
Bitumen	1,005	0,100568385	t	0	0
Bitumen	17,71732925	4,85709312	t	0	0
Bitumen	0,67	0,083600239	t	0	0
Bitumen	0,0026226	0,004071218	t	0	0
Bitumen	0,0032643	0,007098975	t	0	0
Bitumen	0,47905884	0,124109831	t	0	0
Epoxidharz	0,144	0,018	t	22	10
Erdarbeiten	135290	1000	m³	6	1
Erdarbeiten	2500	100	m³	6	1
Fasermaterial	8,733258	12,94650018	m³	0	0
Fasermaterial	10,870119	23,10316932	m³	0	0
Fräsen	1560	316,2	t	0	0
Fräsen	195	121	t	0	0
Fräsen	41,6	26,5	t	0	0
Füller	792,3744	562,5955566	t	0	0
Füller	110,932416	78,86072456	t	0	0
Füller	22,0104	15,78494802	t	0	0
Füller	37,564416	26,9976402	t	0	0
Füller	5,4	3,649657518	t	0	0
Füller	422,184	243,0138523	t	0	0
Füller	3	1,615549442	t	0	0
Füller	376,3756	157,4620859	t	0	0
Füller	2,75	0,826513763	t	0	0
Füller	21,83744	9,392991791	t	0	0
Füller	1,5	0,460977223	t	0	0
Füller	26,443775	10,56380212	t	0	0
Füller	1	0,316227766	t	0	0
Füller	1,535445	0,432493046	t	0	0
gebrochener Naturstein	208	27,29468813	t	44	15

Fortsetzung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Kies	49140	3788,931248	t	6	1
Kies	85	5	t	6	1
Kies	55,296	5,340918932	t	0	0
Kies	2,52	1,316113373	t	0	0
Kies	31,32	2,800761841	t	0	0
Kies	21,6	1,782161609	t	0	0
Kies	155,94	7,482045175	t	0	0
Kies	0,23328	0,012134991	t	0	0
Kies/Brechsand	9244,368	2616,028103	t	0	0
Kies/Brechsand	1294,21152	369,0841803	t	0	0
Kies/Brechsand	256,788	77,15622699	t	0	0
Kies/Brechsand	438,25152	133,2868504	t	0	0
Kies/Brechsand	63	11,40175425	t	0	0
Kies/Brechsand	4925,48	1571,038605	t	0	0
Kies/Brechsand	35	8,602325267	t	0	0
Kies/Brechsand	2766,36066	890,1469015	t	0	0
Kies/Brechsand	20,2125	2,774447017	t	0	0
Kies/Brechsand	109,1872	40,12000919	t	0	0
Kies/Brechsand	7,5	1,58113883	t	0	0
Kies/Brechsand	132,218875	43,76935381	t	0	0
Kies/Brechsand	5	1,118033989	t	0	0
Kies/Brechsand	2,9173455	0,739593388	t	0	0
Klinker	1,4136	0,982030549	t	22	10
Klinker	2,7348	1,989891454	t	22	10
LDPE (Form)	0,21666	0,073637667	t	22	10
Polypropylen	3,6	0,92	t	22	10
Pumpen	2200	451	m³	0	0
PVC_Form	0,9867	0,100383762	t	22	10
PVC_Form	1,58562	0,111415622	t	22	10
PVC_Form	0,43332	0,048706554	t	22	10
Rammen	0,021111111	0,011937065	h	0	0
Schneiden	60	40,1	m	0	0
Schneiden	480	10	m	0	0
Stahl	2,688	0,792712407	t	22	10
Stahl	44	1	t	22	10
Stahl	42	1	t	22	10
Stahl	0,0032	0,0004	t	22	10
Stahl	0,66	0,008	t	22	10
Stahl	1,168	0,392271794	t	22	10
Stahl	0,448	0,128122441	t	22	10
Stahlbeton	17,56155	0,9657878	t	22	10
Stahlbeton	13,170765	8,901904997	t	22	10
Stahlbeton	8,1302	3,835040906	t	22	10
Stahlbeton	421,46395	17,18278534	t	22	10
Stahlbeton	53,2809	2,170819213	t	22	10
Stahlbeton	2,6023	1,301298218	t	22	10
Stahlbeton	59,10825	30,16029931	t	22	10
Stahlbeton	3,33105	1,841921573	t	22	10
Stahlbeton	190,8	11,74858289	t	22	10
Stahlbeton	116,6	29,69304296	t	22	10
Stahlbeton	12,72	1,659029856	t	22	10
Stahlbeton	1404,5	28,54137348	t	22	10
Steingut	0,9328	0,227090202	t	22	10
Tragschicht	13206,24	3226,027849	t	30	20
Tragschicht	1848,8736	456,3381227	t	30	20
Tragschicht	366,84	96,9679887	t	30	20
Tragschicht	626,0736	168,0968075	t	30	20
Tragschicht	90	10	t	30	20
Verdichten	9000	1000	m²	0	0
Wurzelstöcke entfernen	400	447	m³	6	1
Zement	6,3744	0,934280429	t	0	0
Zement	0,2905	0,155061677	t	0	0
Zement	3,6105	0,512506868	t	0	0
Zement	2,49	0,342864405	t	0	0
Zement	29,44	2,387383505	t	0	0
Zement	0,026892	0,003278049	t	0	0

Für beide Ortsumgehungen (B 41 s.u.) lagen die sehr detaillierten Aufforderungen zur Angebotsabgabe vor, so dass jede Bauleistung bilanziert werden konnte. Anhand

dieser Aufstellung ist erkennbar, dass die nicht bilanzierten Komponenten der weniger genau bekannten Materialbilanzen einen geringen KEA haben.

Die Umgehung von Boden durch die B 255 wurde vierstreifig mit zwei 7,5 m breiten Fahrbahnen ausgeführt. Der Oberbau besteht aus 50 cm Frostschutzschicht, 18 cm Tragschicht, 8 cm Binderschicht und 4 cm Deckschicht.

Neubau B 41

Material Neubau der Ortsumgebung Weierbach B 41

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiten	80,6	10,66	t	6,25	1
Abbrucharbeiten	31	2	m³	0	0
Asphaltbeton	2096,8	620,4318321	t	30	20
Asphaltbeton	20	1	t	30	20
Asphaltbeton	163,7808	51,2717248	t	30	20
Asphaltbeton	20	1	t	30	20
Beton B25	33	6,27	m³	200	100
Beton B25	1250	5	m³	22	10
Beton B25	88	56,72	m³	22	10
Beton B25	135	50	m³	22	10
Beton B25	30,48	3,18	m³	22	10
Beton B25	4,5	0,48	m³	22	10
Beton B25	15,3	1,17	m³	22	10
Beton B25	18	5	m³	22	10
Binderschicht (fein)	2744	782,5370851	t	30	20
Binderschicht (fein)	441	157,9021979	t	30	20
Binderschicht (fein)	30	5	t	30	20
Bitumen	9	1	t	22	10
Bitumen	19,35	9,097	t	22	10
Bitumen	279,727728	78,33775451	t	0	0
Bitumen	6,505296	1,985908437	t	0	0
Bitumen	137,2	47,78979309	t	0	0
Bitumen	22,05	9,043277075	t	0	0
Bitumen	1,5	0,390512484	t	0	0
Bitumen	136,292	41,66854224	t	0	0
Bitumen	1,3	0,119268604	t	0	0
Bitumen	10,9733136	3,531464429	t	0	0
Bitumen	1,34	0,120370262	t	0	0
Bitumen	0,0040176	0,007349888	t	0	0
Epoxidharz	0,3055	0,1247	t	22	10
Epoxidharz	0,048	0,0216	t	22	10
Erdarbeiten	133581	1000	m³	6,25	1
Fasermaterial	13,378608	23,6865028	m³	0	0
Fräsen	124,8	35,9	t	0	0
Fräsen	975	346	t	0	0
Fräsen	4550	1059	t	0	0
Fräsen	455	95	t	0	0
Fräsen	130	30	t	0	0
Fräsen	50	10	t	0	0
Fräsen	4,51	2,31	t	0	0
Füller	36	18,168	t	44	15
Füller	441,67536	314,0431191	t	0	0
Füller	10,27152	7,409210173	t	0	0
Füller	192,08	77,53966352	t	0	0
Füller	30,87	14,14088435	t	0	0
Füller	2,1	0,694622199	t	0	0
Füller	209,68	88,35309728	t	0	0
Füller	2	0,608276253	t	0	0
Füller	16,37808	7,101382474	t	0	0
Füller	2	0,608276253	t	0	0
gebrochener Naturstein	1118	131,5940728	t	6,25	1
gebrochener Naturstein	52000	6539,11309	t	44	15

Fortsetzung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Grader	5	0,5	h	0	0
Kies	3268,2	361,6655361	t	6,25	1
Kies	2366	672,4959182	t	6,25	1
Kies	20,8	5,814473321	t	6,25	1
Kies	1820	191,0497317	t	6,25	1
Kies	31460	2433,926868	t	6,25	1
Kies	213,75	58,122	t	44	15
Kies	23,76	4,659810335	t	0	0
Kies	900	43,89786441	t	0	0
Kies	63,36	40,9543809	t	0	0
Kies	97,2	36,30875411	t	0	0
Kies	21,9456	2,525931591	t	0	0
Kies	3,24	0,379796801	t	0	0
Kies	11,016	0,99819738	t	0	0
Kies	12,96	3,654709291	t	0	0
Kies/Brechsand	5152,8792	1471,263465	t	0	0
Kies/Brechsand	119,8344	37,18505336	t	0	0
Kies/Brechsand	2387,28	734,0258107	t	0	0
Kies/Brechsand	383,67	144,2798548	t	0	0
Kies/Brechsand	26,1	5,284174486	t	0	0
Kies/Brechsand	1541,148	501,9139053	t	0	0
Kies/Brechsand	14,7	2,130780373	t	0	0
Kies/Brechsand	81,8904	30,42102802	t	0	0
Kies/Brechsand	10	2,061552813	t	0	0
Kompressor	3000	1000	m³	0	0
Polypropylen	2,75	0,28	t	22	10
PVC_Form	1,219368	0,086690348	t	22	10
Schneiden	1220	10	m	0	0
Stahlbeton	93,651	4,926960751	t	22	10
Stahlbeton	103,032	5,855362842	t	22	10
Stahlbeton	183,168	9,61341313	t	22	10
Stahlbeton	5,194	1,299091563	t	22	10
Stahlbeton	168,9905	45,9157168	t	22	10
Stahlbeton	73,2725	19,61779572	t	22	10
Stahlbeton	20,988	5,408320124	t	22	10
Stahlbeton	44,891	11,50598916	t	22	10
Stahlbeton	49,6875	4,996093374	t	22	10
Stahlbeton	71,55	7,175348424	t	22	10
Stahlbeton	13,992	1,757475419	t	22	10
Stahlbeton	23,32	3,502424874	t	22	10
Stahlbeton	7,95	0,995559673	t	22	10
Stahlbeton	14,31	2,871981372	t	22	10
Tragschicht	7361,256	1819,808963	t	30	20
Tragschicht	171,192	47,15716633	t	30	20
Verdichten	14000	1000	m²	0	0
Wurzelstöcke entfernen	750	376	m³	6,25	1
Zement	2,739	0,616219578	t	0	0
Zement	103,75	12,5068871	t	0	0
Zement	7,304	4,789301016	t	0	0
Zement	11,205	4,364057745	t	0	0
Zement	2,52984	0,403196433	t	0	0
Zement	0,3735	0,060101794	t	0	0
Zement	1,2699	0,181216313	t	0	0
Zement	1,494	0,452354949	t	0	0

Die Ortsumgehung von Weierbach gehört zur Umgehung von Idar-Oberstein durch die B 41. Sie ist zweistreifig mit einer Schichtung von 4 cm Deckschicht und 14 cm Tragschicht ausgeführt.

Ausbau A 4

Material Ausbau der A 4 bei Köln

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	12181,197	4540,042578	t	20	7
Binderschicht (grob)	21241,5	6986,673663	t	20	7
Bitumen	1706,246208	551,5856098	t	0	0
Bitumen	987,72975	371,6806712	t	0	0
Bitumen	950,133366	387,9172724	t	0	0
Erdarbeiten	242000	10000	m ³	5	2,5
Füller	2694,07296	1964,342653	t	0	0
Füller	1274,49	762,7648274	t	0	0
Füller	3045,29925	1288,100564	t	0	0
Kies	39780	7856,233298	t	20	7
Kies/Brechsand	31430,8512	10310,15477	t	0	0
Kies/Brechsand	14869,05	5332,042908	t	0	0
Kies/Brechsand	5786,068575	2342,055882	t	0	0
Rammen	28,33333333	15,89682958	h	0	0
Stahl	412,8	98,5351998	t	20	7
Stahl	285,6	96,06635675	t	20	7
Tragschicht	44901,216	13258,65904	t	20	7
Verdichten	102000	17263	m ²	0	0
Zement	1591,2	1234,1	t	20	7

Diese Materialmengen fielen beim Ausbau des Kölner Südrings auf 6 Fahrstreifen an. Dabei mussten keine Bauwerke neu erstellt werden, da diese schon in ausreichender Breite vorhanden waren. Zum Einbau in die bituminöse Trag- und Binderschicht wurden Anteile an Altasphalt zugelassen. Für diese wurde der gleiche KEA angenommen wie für die Herstellung von Brechsand. Die Deckschicht besteht aus Gussasphalt. Die Mengenangaben aus der Tabelle stammen vom Rheinischen Autobahnamt Köln.

Der zweite untersuchte Abschnitt des Ausbaus der A 4 (s.u.) findet im Rahmen der „Verkehrsprojekte Deutsche Einheit“, die die Verkehrsachsen zwischen den alten und neuen Ländern wiederherstellen und verbessern sollen, statt. Die A 4 wird vom Autobahnkreuz Kirchheim bis zur Grenze nach Polen auf sechs Spuren ausgebaut. Der hier untersuchte Abschnitt ist 6,7 km lang und führt von Erfurt-Ost bis Eichelborn. Die Mengenangaben wurden aus den Planfeststellungsunterlagen berechnet, die vom Thüringer Ministerium für Wirtschaft und Infrastruktur zur Verfügung gestellt wurden.

Material Ausbau der A 4 bei Erfurt

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiten	24238,76	10308,305	t	8,5	5
Abbrucharbeiten	9322,6	3816	m³	0	0
Asphaltbeton	10122,87862	2952,61804	t	8,5	5
Asphaltbeton	10122,87862	2952,61804	t	8,5	5
Binderschicht (grob)	18924,878	5398,592734	t	8,5	5
Binderschicht (grob)	18924,878	5398,592734	t	8,5	5
Bitumen	1974,097124	540,2637388	t	0	0
Bitumen	272,2893867	100,9130236	t	0	0
Bitumen	880,006827	298,1522458	t	0	0
Bitumen	880,006827	298,1522458	t	0	0
Bitumen	657,9871103	198,482164	t	0	0
Bitumen	657,9871103	198,482164	t	0	0
Fräsen	10388,04	2881,1551	t	8,5	5
Fräsen	20776,08	13222,628	t	8,5	5
Fräsen	9522,37	3085,1086	t	8,5	5
Füller	3116,995459	2208,518712	t	0	0
Füller	429,9306106	323,0157688	t	0	0
Füller	1135,49268	653,6491407	t	0	0
Füller	1135,49268	653,6491407	t	0	0
Füller	1012,287862	423,5622	t	0	0
Füller	1012,287862	423,5622	t	0	0
HDPE_Rohr	11,51184	0,624289151	t	8,5	5
Kies	140584,86	27351,90217	t	8,5	5
Kies	19391,008	6141,277942	t	8,5	5
Kies/Brechsand	36364,94702	10155,77988	t	0	0
Kies/Brechsand	5015,857123	1879,752392	t	0	0
Kies/Brechsand	13247,4146	4226,400808	t	0	0
Kies/Brechsand	13247,4146	4226,400808	t	0	0
Kies/Brechsand	7440,315786	2394,657185	t	0	0
Kies/Brechsand	7440,315786	2394,657185	t	0	0
Rammen	11,09833333	6,553978218	h	0	0
Stahl	161,7336	38,40924219	t	8,5	5
Stahl	111,8712	37,03041332	t	22	10
Stahlbeton	2629,913	506,1947874	t	8,5	5
Stahlbeton	9,5739995	2,554297211	t	8,5	5
Tragschicht	51949,92432	12466,43809	t	8,5	5
Tragschicht	7165,510176	2482,602196	t	8,5	5
Verdichten	96556	666,1	m²	0	0

Ausbau A 5

Material Ausbau der A 5 zwischen Bühl und Achern

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Bitumen	543,65688	172,8190015	†	0	0
Bitumen	0,0522288	0,084388703	†	0	0
Bitumen	0,01566864	0,02564299	†	0	0
Erdarbeiten	236250	168615	m ³	5	2
Fasermaterial	173,921904	269,3514705	m ³	0	0
Fasermaterial	52,1765712	81,93870746	m ³	0	0
Füller	858,4056	623,8552102	†	0	0
gebrochener Naturstein	34476	6209,840784	†	5	2
Kies	17238	2728,128597	†	5	2
Kies	30420	5246,2	†	5	2
Kies/Brechsand	10014,732	3231,895683	†	0	0
Stahl	678,56	324,6708147	†	5	2
Stahl	289,52	159,6410259	†	5	2
Tragschicht	14306,76	4139,978282	†	5	2
Zement	5323,5	763,3	†	5	2

Material Ausbau der A 5 zwischen Bühl und Baden-Baden

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Bitumen	524,6985888	151,9800885	†	0	0
Bitumen	0,05460588	0,088020922	†	0	0
Bitumen	0,01638288	0,026750156	†	0	0
Fasermaterial	181,8375804	280,8858	m ³	0	0
Fasermaterial	54,5549904	85,45950755	m ³	0	0
Füller	828,471456	592,2439961	†	0	0
gebrochener Naturstein	33273,76	4114,543065	†	5	2
Kies	16636,88	1478,154846	†	5	2
Kies	76333,92	10385,07205	†	5	2
Kies/Brechsand	9665,50032	2850,80696	†	0	0
Stahl	88,72	41,29489413	†	5	2
Stahl	37,84	20,40548282	†	5	2
Tragschicht	13807,8576	3562,998911	†	5	2
Zement	5137,9	299,9	†	5	2

Material Ausbau der A 5 zwischen Heidelberg und Walldorf

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Bitumen	882,6199747	254,7531431	†	0	0
Bitumen	0,08953668	0,144325934	†	0	0
Bitumen	0,02686212	0,043860448	†	0	0
Erdarbeiten	400000	100000	m ³	2	1
Erdarbeiten	5000	1000	m ³	5	2,5
Fasermaterial	298,1571444	460,5618639	m ³	0	0
Fasermaterial	89,4508596	140,1221655	m ³	0	0
Füller	1393,610486	995,666534	†	0	0
gebrochener Naturstein	55971,344	6786,84	†	5	2
Kies	27985,67	3393,42	†	5	2
Kies	49386,48	5410,82	†	5	2
Kies/Brechsand	16258,78901	4779,201319	†	0	0
Stahl	145,44	67,62444176	†	5	2
Stahl	62,04	33,52896957	†	5	2
Stahl	350	50	†	40	20
Stahlbeton	67575	26572,39013	†	100	30
Stahlbeton	9275	1326,847768	†	40	20
Stahlbeton	210	10	†	430	50
Tragschicht	23226,84144	5966,899104	†	5	2
Zement	8642,6	458,95	†	5	2

Der Ausbau der A 5 erfolgt durchgängig von Karlsruhe bis Freiburg auf sechs Fahrstreifen. In dieser Arbeit werden drei Abschnitte mit einer Gesamtlänge von 33,8 km untersucht. In allen drei Abschnitten ist die Breite des Zubaus unterschiedlich. Er wird in jedem Fall mit Betondecke auf bituminöser Tragschicht ausgeführt. Die Angaben in den Tabellen stammen vom Autobahnbetriebsamt Karlsruhe.

Ausbau A 8

Material Ausbau der A 8

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	9495,883	3092,249787	†	20	5
Asphaltbeton	3098,022	1002,840913	†	100	50
Binderschicht (grob)	21557,55	7560,202397	†	20	5
Binderschicht (grob)	7029,05	1991,188964	†	20	5
Bitumen	817,7157072	299,8979014	†	0	0
Bitumen	690,2119056	189,7295804	†	0	0
Bitumen	1002,426075	396,4386257	†	0	0
Bitumen	326,850825	110,1937215	†	0	0
Bitumen	617,232395	206,5279201	†	0	0
Bitumen	201,37143	66,99987555	†	0	0
Erdarbeiten	216800	50000	m ³	2	1
Füller	1291,130064	967,6049365	†	0	0
Füller	1089,808272	772,6838488	†	0	0
Füller	1293,453	789,9488229	†	0	0
Füller	421,743	242,3637557	†	0	0
Füller	949,5883	420,4458372	†	0	0
Füller	309,8022	136,7291675	†	0	0
Heißeinbau	26210	3002	†	0	0
Heißeinbau	11560	1002	†	0	0
Kies	115700	78506,11441	†	2,5	1
Kies/Brechsand	15063,18408	5587,635368	†	0	0
Kies/Brechsand	12714,42984	3565,88078	†	0	0
Kies/Brechsand	15090,285	5714,371633	†	0	0
Kies/Brechsand	4920,335	1561,039349	†	0	0
Kies/Brechsand	6979,474005	2463,199974	†	0	0
Kies/Brechsand	2277,04617	799,5475145	†	0	0
Lack	0,19116	0,120020113	†	20	10
Stahl	2,904	1,200548912	†	20	10
Tragschicht	21518,8344	7366,646658	†	20	5
Tragschicht	18163,4712	4383,733587	†	80	20
Verdichten	137281	4590	m ²	0	0

Im Rahmen des oben bereits erwähnten Neubaus des Münchner Autobahnringes wird neben den Neubauten bei einem 4,5 km langen Teilstück der A 8 die Fahrbahndecke erneuert und bei jeder Fahrbahn ein zusätzlicher Fahrstreifen eingebaut. Für die Bilanz lagen ausführliche Angaben der Autobahndirektion Südbayern vor.

Ausbau A 9

Material Ausbau der A 9

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiten	6455	3000	t	0	0
Abbrucharbeiten	2582	1500	m ³	0	0
Asphaltbeton	9458,3412	4252,655319	t	20	5
Binderschicht (grob)	13582,8	5959,157581	t	20	3
Bitumen	1030,438886	460,3239489	t	0	0
Bitumen	631,6002	300,190687	t	0	0
Bitumen	633,7088604	288,825929	t	0	0
Erdarbeiten	355000	10000	m ³	6	3
Füller	1627,008768	1288,007017	t	0	0
Füller	814,968	542,1114488	t	0	0
Füller	945,83412	511,2386615	t	0	0
gebrochener Naturstein	36036	13216,1261	t	20	3
Kies	75675,6	28804,3481	t	20	3
Kies/Brechsand	18981,76896	8545,156318	t	0	0
Kies/Brechsand	9507,96	4386,979428	t	0	0
Kies/Brechsand	4729,1706	2327,202505	t	0	0
Stahl	64,68	67,27285854	t	360	20
Stahlbeton	86,07	40	m ³	20	5
Stahlbeton	86,07	40	m ³	20	5
Stahlbeton	930	300	m ³	205	20
Stahlbeton	1010	400	m ³	152	20
Stahlbeton	86,07	30	m ³	205	20
Stahlbeton	86,07	30	m ³	205	20
Stahlbeton	1721	700	m ³	30	15
Stahlbeton	86,07	30	m ³	205	20
Stahlbeton	1010	400	m ³	152	20
Stahlbeton	86,07	30	m ³	205	20
Stahlbeton	1291	500	m ³	205	20
Stahlbeton	1010	400	m ³	152	20
Stahlbeton	1291	500	m ³	205	20
Stahlbeton	130	50	m ³	50	30
Stahlbeton	1010	400	m ³	50	30
Stahlbeton	86,07	30	m ³	205	20
Stahlbeton	172,14	70	m ³	205	20
Stahlbeton	127	50	m ³	100	30
Stahlbeton	1152,96	500	m ³	100	30
Stahlbeton	1291	500	m ³	193	30
Tragschicht	27116,8128	11576,4082	t	20	3
Verdichten	138600	4000	m ²	0	0

Eines der wichtigsten im Bundesverkehrswegeplan enthaltenen Projekte ist der Ausbau der A 9 durchgängig von Berlin bis München auf sechs Fahrstreifen. Mit der Wiedervereinigung ist auf dieser Autobahn das Pkw-Verkehrsaufkommen um 70 % gestiegen. Das hier untersuchte 11,6 km lange Teilstück liegt in der Bauaufsicht der Autobahndirektion Nordbayern, von der auch die Daten in der Tabelle stammen. Neben dem Zubau von zwei Fahrstreifen wurden auch die Verlängerungen und Neubauten von Kleinbauwerken bilanziert.

Eisenbahnprojekte

Die folgenden Bilanzen wurden anhand von Projekten aus dem Schienenwegeausbauplan [Bundestag97a] zusammengestellt. Die Bauschemata (Anhang A) stammen aus Lehrmaterial für Eisenbahningenieure [Vallée95].

Material Elektrifizierung Wilhelmshaven-Oldenburg

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Aluminium (primär)	2,12274	0,919213293	t	100	50
Baggerarbeiten	4160	2123	h	0	0
Beton B25	2766,4	1462,6	m ³	50	25
Erdarbeiten	2766,4	1462,6	m ³	50	25
Keramik	32,24	3,31	t	100	50
Kies	1991,808	1057,513841	t	0	0
Kupferdraht	112,32	9,948211699	t	100	50
Kupferdraht	71,5482	3,129487666	t	100	50
Lack	61,36	29,78249318	t	100	50
PVC_Form	9,75936	5,54526411	t	100	50
Stahl	1436,032	727,2695588	t	100	50
Stahl (verzinkt)	815,36	456,9936665	t	100	50
Zement	229,6112	124,5079803	t	0	0

Material Zubau eines Gleises zwischen Plauen und Hof

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Aluminium (primär)	0,73494	0,321695419	t	150	100
Baggerarbeiten	1080	549	h	0	0
Beton B25	63,84	39,84	m ³	50	30
Beton B25	5660,377358	744,8812976	m ³	50	30
Beton B25	958	533	m ³	50	30
Betonstraßeneinbau	309600	37013	m ²	0	0
Erdarbeiten	1022,4	537,6	m ³	50	30
gebrochener Naturstein	148730,4	29104,41597	t	50	30
Keramik	22,3	4,5	t	150	100
Kies	45,9648	28,77169259	t	0	0
Kies	10800	1386,296015	t	0	0
Kies	689,76	385,222012	t	0	0
Kupferdraht	16,2	1,835647025	t	150	100
Kupferdraht	24,7662	1,915851805	t	150	100
Lack	21,24	10,97794899	t	150	100
Lack	1,416	0,834912552	t	150	100
PVC_Form	3,37824	2,007117234	t	150	100
Stahl	33,1392	20,12026468	t	150	100
Stahl	4344	121	t	150	100
Stahl	3000	655	t	100	70
Stahl	497,088	266,1525413	t	150	100
Stahl (verzinkt)	282,24	165,6375766	t	150	100
Verdichten	309600	37013	m ²	0	0
Zement	5,29872	3,367781424	t	0	0
Zement	1245	210,6565566	t	0	0
Zement	79,514	45,26439573	t	0	0

Material Erneuerung Oberleitung (Hochgeschwindigkeit) Aachen-Köln

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Aluminium	308,664	187,3241609	t	150	100
Aluminium (primär)	2,862	1,215086828	t	150	100
Keramik	99,39	25,01	t	150	100
Kupferdraht	151,2	25,77989915	t	150	100
Kupferdraht	96,3	4,188030563	t	150	100
Silber	0,1512	0,044844732	t	150	100

Material Zubau zweier Gleise zwischen Karlsruhe und Basel

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Aluminium	851,04	517,7403585	t	150	100
Aluminium (primär)	7,87806	3,432226581	t	150	100
Baggerarbeiten	9650	5133	h	0	0
Beton B25	103,74	68,62	m ³	50	30
Beton B25	60691,69811	7780,619184	m ³	50	30
Beton B25	7720	2074	m ³	50	30
Erdarbeiten	51,87	34,31	m ³	100	70
gebrochener Naturstein	1594720,4	301998,5246	t	50	30
Keramik	274	69,4	t	150	100
Kies	74,6928	49,53963863	t	0	0
Kies	115799,76	14460,62882	t	0	0
Kies	5558,4	1517,528648	t	0	0
Kran	1072	717	h	0	0
Kupferdraht	416,88	41,98480911	t	150	100
Kupferdraht	265,5198	38,17771802	t	150	100
Lack	2,301	1,443128261	t	150	100
Lack	2087,42	776,1774604	t	150	100
Rammen	19,66	15,02	h	0	0
Silber	0,41688	0,109516655	t	150	100
Stahl	53,856	34,66253791	t	150	100
Stahl	46582	2414	t	150	100
Stahl	32167	7166	t	150	100
Stahl	28304	7680,153543	t	150	100
Verdichten	2644100	148733	m ²	0	0
Zement	8,61042	5,789167762	t	0	0
Zement	13349,139	2223,61994	t	0	0
Zement	640,76	188,6602983	t	0	0

Material Überholgleise zwischen Dortmund und Hagen

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Aluminium (primär)	0,156006	0,092030042	t	100	75
Baggerarbeiten	22	4,66	h	0	0
Baggerarbeiten	240	159,8	h	0	0
Beton B25	39,9	29,68	m ³	50	30
Beton B25	18,86792453	8,370301021	m ³	30	20
Beton B25	303,3962264	49,84434094	m ³	30	20
Beton B25	204,82	146,66	m ³	30	20
Erdarbeiten	239,4	167,2	m ³	20	15
gebrochener Naturstein	31538	13149,55577	t	30	20
Keramik	4,774	2,362	t	100	75
Kies	28,728	21,41518191	t	0	0
Kies	36	15,93637663	t	0	0
Kies	578,88	93,60971103	t	0	0
Kies	147,4704	105,8382564	t	0	0
Kupferdraht	8,262	3,424924665	t	100	75
Kupferdraht	5,25798	2,119393307	t	100	75
Lack	0,885	0,631446752	t	50	30
Lack	4,543	3,058471677	t	100	75
PVC_Form	0,722568	0,538853765	t	100	75
Stahl	20,72	15,09022283	t	50	30
Stahl	1158	730	t	100	75
Stahl	10	4	t	30	20
Stahl	1164	476	t	100	75
Stahl	160	38	t	30	20
Stahl	106,4	74,41188682	t	100	75
Stahl (verzinkt)	60,368	44,66237518	t	100	75
Verdichten	41158	16516	m ²	0	0
Zement	3,3117	2,495543555	t	0	0
Zement	4,15	1,893218424	t	0	0
Zement	66,732	13,06012496	t	0	0
Zement	17,00006	12,34389307	t	0	0

Material Neubau der Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln-Frankfurt

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Aluminium	463,05	259,497336	t	100	50
Aluminium	46,305	30,85469938	t	200	150
Aluminium (primär)	5,51124	2,385443261	t	200	150
Baggerarbeiten	750	500	h	0	0
Baggerarbeiten	5250	2501	h	0	0
Beton B25	29836	18705	m³	100	50
Beton B25	119448	8916	m³	100	50
Beton B25	133380	38742	m³	100	50
Beton B45	1584,90566	116,7510421	m³	100	50
Betonstraßeneinbau	853200	42427	m²	0	0
Bitumen	2309	235	t	0	0
Erdarbeiten	11229000	3368700	m³	50	30
Fasermaterial	2096	1093	m³	200	150
Grader	19	18	h	0	0
Keramik	147,7	14,25	t	200	150
Kies	21481,92	13508,0246	t	0	0
Kies	86002,56	7660,830392	t	0	0
Kies	96033,6	28282,17902	t	0	0
Kies	2847,6	181,2641485	t	0	0
Kupferdraht	291,6	25,51458571	t	200	150
Kupferdraht	185,7492	7,799509979	t	200	150
Polystyrol	19892,1	3616,361973	t	100	50
Rammen	8,75	7,06	h	0	0
Schwarzdeckenfertige	1154250	69632	m²	0	0
Silber	0,288	0,089805345	t	200	50
Siloxan & Silikonartige	1968,95	313,0528863	t	100	50
Stahl	11092	1302	t	100	50
Stahl	45,36	25,28635776	t	100	50
Stahl	32584	483	t	100	50
Stahl	963	127	t	100	50
Stahl	1925	396	t	100	50
Stahl	91,2	19,07409762	t	100	50
Stahl (verzinkt)	3064	1336,548873	t	100	50
Stahl (verzinkt)	452,16	194,0023492	t	100	50
Stahl (verzinkt)	158,4	78,90484649	t	100	50
Stahlbeton	63600	61810,46379	t	50	25
Stahlbeton	204633	36907,07736	t	100	50
Verdichten	1263500	54441	m²	0	0
Verdichten	1263500	54441	m²	0	0
Zement	73915	30271	t	100	50
Zement	2476,388	1580,92426	t	0	0
Zement	9914,184	1405,141954	t	0	0
Zement	11070,54	3481,237677	t	0	0
Zement	537,6	49,05423872	t	0	0

Anschlussstellen

Material Neubau der Anschlussstelle Zelle-Mehlis (A 71)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	95,53545	37,18493224	t	15	10
Asphaltbeton	121,0902	95,93610452	t	10	7
Asphaltbeton	251,616	190,7323274	t	10	7
Beton B45	1320	300	m ³	10	7
Beton B45	365	100	m ³	10	7
Binderschicht (grob)	267,9075	82,9621517	t	15	10
Binderschicht (grob)	339,57	248,3551016	t	10	7
Binderschicht (grob)	705,6	489,8243875	t	10	7
Bitumen	20,32440336	6,22146304	t	0	0
Bitumen	12,45769875	4,479716597	t	0	0
Bitumen	6,20980425	2,463770305	t	0	0
Bitumen	15,790005	11,90374403	t	0	0
Bitumen	7,870863	6,265170081	t	0	0
Bitumen	32,8104	23,5532455	t	0	0
Bitumen	16,35504	12,46127132	t	0	0
Erdarbeiten	5000	2000	m ³	2	1
Füller	32,0911632	23,15980696	t	0	0
Füller	16,07445	9,45382318	t	0	0
Füller	9,553545	4,694838852	t	0	0
Füller	20,3742	18,05064901	t	0	0
Füller	12,10902	10,25835827	t	0	0
Füller	42,336	36,21912166	t	0	0
Füller	25,1616	20,51262435	t	0	0
Heißeinbau	267,91	82,96	t	0	0
Heißeinbau	95,53	37,17	t	0	0
Heißeinbau	339,57	248,36	t	0	0
Heißeinbau	121,09	95,93	t	0	0
Heißeinbau	705,6	489,87	t	0	0
Heißeinbau	251,616	190,74	t	0	0
Kies	1579,5	245,4582557	t	15	10
Kies	894,96	206,9708153	t	0	0
Kies	247,47	68,62129571	t	0	0
Kies/Brechsand	374,396904	116,4833362	t	0	0
Kies/Brechsand	187,53525	63,9552688	t	0	0
Kies/Brechsand	70,21855575	28,9525421	t	0	0
Kies/Brechsand	237,699	177,1338576	t	0	0
Kies/Brechsand	89,001297	71,54520758	t	0	0
Kies/Brechsand	493,92	350,0619939	t	0	0
Kies/Brechsand	184,93776	142,428419	t	0	0
Lack	0,1593	0,099477583	t	50	30
Stahl	198	59,94	t	10	7
Stahl	54,75	18,57	t	10	7
Stahl	17,28	6,795433761	t	15	10
Stahl	7,728	2,72171482	t	15	10
Stahl	1,936	0,800365941	t	15	10
Stahlbeton	6227,5	2928,627163	t	10	7
Stahlbeton	1701,3	530,1555108	t	10	7
Tragschicht	534,85272	147,8256923	t	15	10
Verdichten	1215	162,2	m ²	0	0
Zement	168,96	40,60541836	t	0	0
Zement	46,72	13,31024042	t	0	0

Material Neubau der Anschlussstelle Arnstadt Nord (A 71)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	56,6136	38,78943235	t	15	7
Beton B35	1782	554	m³	10	5
Beton B35	146,52	52,81	m³	10	5
Beton B45	1231	200	m³	10	5
Binderschicht (grob)	158,76	97,46915537	t	15	7
Bitumen	0,00174096	0,002805479	t	0	0
Bitumen	0,000348192	0,000568033	t	0	0
Bitumen	0,00021762	0,000350685	t	0	0
Bitumen	0,000087048	0,000142104	t	0	0
Bitumen	7,38234	4,728945772	t	0	0
Bitumen	3,679884	2,537153376	t	0	0
Erdarbeiten	43200	10000	m³	5	3
Fasermaterial	5,7973968	8,952398721	m³	0	0
Fasermaterial	1,15947936	1,814572522	m³	0	0
Fasermaterial	0,7246746	1,11904984	m³	0	0
Fasermaterial	0,28986984	0,453976941	m³	0	0
Füller	13,9	11,7	t	10	5
Füller	0,965	0,823	t	10	5
Füller	9,5256	7,542222108	t	0	0
Füller	5,66136	4,234476397	t	0	0
Heißeinbau	158,76	97,46	t	0	0
Heißeinbau	56,61	38,79	t	0	0
Kies	3791	1578	t	10	5
Kies	2685	960	t	10	5
Kies	555,75	204,5609064	t	10	5
Kies	186,469	71,894	t	10	5
Kies	1243,836	390,36992	t	0	0
Kies	102,27096	37,1225354	t	0	0
Kies	834,618	140,2204643	t	0	0
Kies/Brechsand	111,132	70,05114658	t	0	0
Kies/Brechsand	41,610996	29,06689475	t	0	0
Lack	0,07965	0,049738792	t	15	5
Polypropylen	0,3375	0,1261	t	50	30
Stahl	2,824	1,33646627	t	30	20
Stahl	1,208	0,664171672	t	30	20
Stahl	0,704	0,408094891	t	30	20
Stahl	0,304	0,1920376	t	10	5
Stahl	1847	476	t	10	5
Stahl	0,6912	0,144258967	t	15	5
Stahl	0,6048	0,264108223	t	15	5
Stahl	0,968	0,400182971	t	15	5
Stahlbeton	4823	1060,624797	t	10	5
Verdichten	1062	4,7	m²	0	0
Zement	110,6	47	t	10	5
Zement	126,4	53,1	t	10	5
Zement	7,68	3,57	t	10	5
Zement	8,775	3,898	t	10	5
Zement	185,328	60,3088373	t	0	0
Zement	15,23808	5,68432153	t	0	0
Zement	157,568	28,40591664	t	0	0

Material Neubau der Anschlussstelle Arnstadt Süd (A 71)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	80,2026	54,96022032	t	10	5
Beton B35	445,5	199,7	m³	10	5
Beton B35	146,25	52,81	m³	10	5
Beton B45	1231	200	m³	10	5
Binderschicht (grob)	224,91	138,0757378	t	10	5
Bitumen	0,00043524	0,00070137	t	0	0
Bitumen	0,000087048	0,000142104	t	0	0
Bitumen	0,00021762	0,000350685	t	0	0
Bitumen	0,000087048	0,000142104	t	0	0
Bitumen	10,458315	6,699091805	t	0	0
Bitumen	5,213169	3,594851249	t	0	0
Erdarbeiten	43200	10000	m³	5	3
Fasermaterial	1,4493492	2,23809968	m³	0	0
Fasermaterial	0,28986984	0,453976941	m³	0	0
Fasermaterial	0,7246746	1,11904984	m³	0	0
Fasermaterial	0,28986984	0,453976941	m³	0	0
Füller	3,47	3,13	t	10	5
Füller	0,97	0,82	t	10	5
Füller	13,4946	10,68455573	t	0	0
Füller	8,02026	5,999622448	t	0	0
Heißeinbau	224,91	138,07	t	0	0
Heißeinbau	80,26	54,95	t	0	0
Kies	947,7	503,2085254	t	10	5
Kies	671,29	323,34	t	10	5
Kies	555,75	204,5609064	t	10	5
Kies	186,47	71,89	t	10	5
Kies	310,959	140,0298632	t	0	0
Kies	102,0825	37,12157717	t	0	0
Kies	834,618	140,2204643	t	0	0
Kies/Brechsand	157,437	99,23532978	t	0	0
Kies/Brechsand	58,948911	41,18424641	t	0	0
Lack	0,07965	0,049631037	t	50	30
Polypropylen	0,3375	0,1261	t	50	30
Stahl	0,704	0,408094891	t	30	20
Stahl	0,304	0,1920376	t	30	20
Stahl	0,704	0,408094891	t	30	20
Stahl	0,304	0,1920376	t	30	20
Stahl	184,65	47,58	t	10	5
Stahl	0,9792	0,20436687	t	15	5
Stahl	7,488	3,15338944	t	15	5
Stahl	0,968	0,400182971	t	15	5
Stahlbeton	4823	1060,624797	t	10	5
Verdichten	1505	5,89	m²	0	0
Zement	27,64	14,79	t	10	5
Zement	31,59	16,74	t	10	5
Zement	7,678	3,572	t	10	5
Zement	8,775	3,898	t	10	5
Zement	46,332	21,24123533	t	0	0
Zement	15,21	5,683626172	t	0	0
Zement	157,568	28,40591664	t	0	0

Material Neubau der Anschlussstelle Eichelborn (A 4)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	903,93048	267,5711691	†	12	5
Asphaltbeton	266,5557	79,74706308	†	12	5
Asphaltbeton	269,85816	82,42754033	†	12	5
Asphaltbeton	104,84	60,68140868	†	12	5
Binderschicht (grob)	844,956	305,5841987	†	12	5
Binderschicht (grob)	55,119365	23,79919707	†	12	5
Binderschicht (grob)	504,504	151,0242733	†	12	5
Binderschicht (grob)	196	112,8174844	†	12	5
Bitumen	112,1773242	31,82398266	†	0	0
Bitumen	39,290454	15,92160545	†	0	0
Bitumen	58,7554812	17,96978866	†	0	0
Bitumen	42,54928248	12,0607018	†	0	0
Bitumen	2,563050473	1,201752131	†	0	0
Bitumen	17,3261205	5,3521569	†	0	0
Bitumen	43,0576249	12,42355303	†	0	0
Bitumen	23,459436	8,228407721	†	0	0
Bitumen	17,5407804	5,525079244	†	0	0
Bitumen	20,445216	11,65669515	†	0	0
Bitumen	9,114	5,504199183	†	0	0
Bitumen	6,8146	3,978972428	†	0	0
Füller	177,1220909	126,19417	†	0	0
Füller	50,69736	31,28465609	†	0	0
Füller	90,393048	38,09625424	†	0	0
Füller	67,1830776	47,85947991	†	0	0
Füller	3,3071619	2,184805797	†	0	0
Füller	26,65557	11,29347988	†	0	0
Füller	67,98572352	48,56973629	†	0	0
Füller	30,27024	17,6403472	†	0	0
Füller	26,985816	11,55353097	†	0	0
Füller	32,28192	27,99783162	†	0	0
Füller	11,76	8,966293839	†	0	0
Füller	10,484	6,834809187	†	0	0
HDPE_Rohr	0,3993792	0,159577062	†	12	5
HDPE_Rohr	0,5513472	0,221098569	†	12	5
Kies	13001,976	2542,150153	†	12	5
Kies	3305,25	741,9809338	†	12	5
Kies	3346,2	779,0323731	†	12	5
Kies	1456	781,0519063	†	12	5
Kies/Brechsand	2066,424394	597,3974337	†	0	0
Kies/Brechsand	591,4692	229,9924795	†	0	0
Kies/Brechsand	664,3889028	216,4438734	†	0	0
Kies/Brechsand	783,802572	226,4097285	†	0	0
Kies/Brechsand	38,5835555	17,54760145	†	0	0
Kies/Brechsand	195,9184395	64,39045829	†	0	0
Kies/Brechsand	793,1667744	233,0703182	†	0	0
Kies/Brechsand	353,1528	117,13806	†	0	0
Kies/Brechsand	198,3457476	66,32258033	†	0	0
Kies/Brechsand	376,6224	215,7484609	†	0	0
Kies/Brechsand	137,2	81,36814207	†	0	0
Kies/Brechsand	77,0574	45,81646835	†	0	0
Lack	0,06372	0,040006704	†	12	5
LDPE (Form)	0,1362336	0,046943361	†	12	5
LDPE (Form)	0,0587604	0,021169637	†	12	5
LDPE (Form)	0,0811164	0,028533626	†	12	5
Stahl	0,968	0,400182971	†	12	5
Stahlbeton	27	9	m³	0	0
Stahlbeton	423,5	40,0406	m³	0	0
Tragschicht	2952,034848	741,9480651	†	12	5
Tragschicht	1119,71796	281,1190542	†	12	5
Tragschicht	1133,095392	290,961536	†	12	5
Tragschicht	538,032	298,4743999	†	12	5
Verdichten	8622	439,6	m²	0	0
Verdichten	2542,5	170,2	m²	0	0
Verdichten	2574	234,2584	m²	0	0
Verdichten	1000	500	m²	0	0

Material Neubau der Anschlussstelle Erfurt Ost (A 4)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiten	1410,98	375,8	†	8	2
Abbrucharbeiten	542,685	138,4	m³	0	0
Asphaltbeton	430,879988	133,5972004	†	8	2
Asphaltbeton	425,3883	127,2584714	†	8	2
Asphaltbeton	288,88662	88,2366658	†	8	2
Asphaltbeton	104,84	60,68140868	†	8	2
Binderschicht (grob)	618,772	176,515841	†	8	2
Binderschicht (grob)	795,27	232,9283651	†	8	2
Binderschicht (grob)	540,078	161,6669314	†	8	2
Binderschicht (grob)	196	112,8174844	†	8	2
Bitumen	41,07443894	11,83308952	†	0	0
Bitumen	28,772898	9,748540226	†	0	0
Bitumen	28,8689592	9,206631445	†	0	0
Bitumen	67,87347048	19,23708788	†	0	0
Bitumen	36,980055	12,76749975	†	0	0
Bitumen	27,6502395	8,540876183	†	0	0
Bitumen	46,09373947	13,37130253	†	0	0
Bitumen	25,113627	8,808358424	†	0	0
Bitumen	18,7776303	5,914474475	†	0	0
Bitumen	20,445216	11,65669515	†	0	0
Bitumen	9,114	5,504199183	†	0	0
Bitumen	6,8146	3,978972428	†	0	0
Erdarbeiten	0	0	m³	0	0
Erdarbeiten	0	0	m³	0	0
Füller	64,85437728	46,32103907	†	0	0
Füller	37,12632	21,37192412	†	0	0
Füller	43,0879988	18,5896188	†	0	0
Füller	107,1686376	76,34301171	†	0	0
Füller	47,7162	27,65012078	†	0	0
Füller	42,53883	18,02239914	†	0	0
Füller	72,77958864	52,04037047	†	0	0
Füller	32,40468	18,88401784	†	0	0
Füller	28,888662	12,3679838	†	0	0
Füller	32,28192	27,99783162	†	0	0
Füller	11,76	8,966293839	†	0	0
Füller	10,484	6,834809187	†	0	0
HDPE_Rohr	0,6373536	0,255704987	†	8	2
HDPE_Rohr	0,5902272	0,236479908	†	8	2
Kies	4432,48	943,5953302	†	8	2
Kies	5274,75	1183,976292	†	8	2
Kies	3582,15	833,8634678	†	8	2
Kies	1456	781,0519063	†	8	2
Kies/Brechsand	756,6344016	222,0052914	†	0	0
Kies/Brechsand	433,1404	138,1887496	†	0	0
Kies/Brechsand	215,439994	79,48980205	†	0	0
Kies/Brechsand	1250,300772	361,1298242	†	0	0
Kies/Brechsand	556,689	181,4105816	†	0	0
Kies/Brechsand	312,6604005	102,7538023	†	0	0
Kies/Brechsand	849,0952008	250,8023276	†	0	0
Kies/Brechsand	378,0546	125,3936954	†	0	0
Kies/Brechsand	212,3316657	70,99710938	†	0	0
Kies/Brechsand	376,6224	215,7484609	†	0	0
Kies/Brechsand	137,2	81,36814207	†	0	0
Kies/Brechsand	77,0574	45,81646835	†	0	0
Lack	0,06372	0,040006704	†	8	2
LDPE (Form)	0,0781724	0,027613076	†	8	2
LDPE (Form)	0,0109664	0,033120215	†	8	2
LDPE (Form)	0,0868388	0,030374669	†	8	2
Stahl	0,968	0,400182971	†	8	2
Stahlbeton	927,85	84,529	m³	0	0
Tragschicht	1080,906288	277,0204641	†	8	2
Tragschicht	1786,14396	448,3795029	†	8	2
Tragschicht	1212,993144	313,5975708	†	8	2
Tragschicht	538,032	298,4743999	†	8	2
Verdichten	3157	225,6	m²	0	0
Verdichten	4057,5	270,9156	m²	0	0
Verdichten	2755,5	250,74	m²	0	0
Verdichten	1000	500	m²	0	0

Kunstbauwerke

Material Tunnel Behringen (A 71)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiter	94256	10000	m ³	2	1,5
Beton B25	4500	500	m ³	20	15
Brechen Stein	235640	53348	t	0	0
Erdarbeiten	94256	10000	m ³	2	1,5
Kies	3240	392,9456069	t	0	0
PVC_Form	82,8	48,31490453	t	50	30
Stahl	1757	437	t	50	30
Stahlbeton	39750	10604,24443	t	20	15
Zement	373,5	61,2147858	t	0	0

Material Kirchbergtunnel

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiter	170000	20000	m ³	3	2
Acrylat	19,872	1,409731889	t	50	30
Beton B25	11400	2300	m ³	10	5
Bohren	1400	560	h	0	0
Brechen Stein	442000	72835,43094	t	0	0
Glasfaser	7,04	7	t	50	30
Kies	8208	1703,389856	t	0	0
Kran	670	10	h	0	0
Kupferdraht	71	71	t	50	30
Mörtel	144	74	m ³	10	5
PVC_Form	124,2	3,295087252	t	50	30
Sprengstoff	178	17	t	50	30
Stahl	2760	260	t	50	30
Stahlbeton	62805	2822,584321	t	10	5
Zement	1860	580	t	50	30
Zement	946,2	222,3483978	t	0	0

Material Schlossbergtunnel

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiter	110000	27000	m ³	5	3
Acrylat	6,9	1,383618445	t	40	20
Beton B25	2400	1200	m ³	10	5
Bohren	366	140	h	0	0
Brechen Stein	286000	77569,58167	t	0	0
Grader	48	24	h	0	0
Kies	1728	868,0737296	t	0	0
Kupferdraht	35	35	t	40	20
PVC_Form	74,52	9,720185183	t	40	20
Sprengstoff	100	20	t	40	20
Stahlbeton	38425	20142,08778	t	10	5
Zement	199,2	102,4507687	t	0	0

Material Langenfirsttunnel

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiter	21000	1000	m ³	5	3
Beton B25	1950	100	m ³	10	5
Bohren	78	30	h	0	0
Brechen Stein	54600	6815,423685	t	0	0
Epoxidharz	13,9125	7,023284933	t	30	20
Glasfaser	7,04	7	t	30	20
Kies	1404	99,2071696	t	0	0
PVC_Form	15,18	1,397426206	t	30	20
Sprengstoff	21,66	7	t	30	20
Stahl	58	3	t	30	20
Stahlbeton	11527,5	158,5094634	t	10	5
Zement	161,85	21,19292335	t	0	0

Material Tunnel Döggingen

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Abbrucharbeiter	72000	12000	m ³	5	3
Abbrucharbeiter	65250	10810	m ³	5	3
Abbrucharbeiter	1260	300	m ³	5	3
Beton B25	2130	676	m ³	10	5
Beton B25	1930	990	m ³	10	5
Beton B25	76	39	m ³	10	5
Brechen Stein	187200	37947,33192	t	0	0
Brechen Stein	169650	34250,95416	t	0	0
Grader	67400	40000	h	0	0
Kies	1533,6	492,3962438	t	0	0
Kies	1389,6	715,9936051	t	0	0
Kies	54,72	28,20570864	t	0	0
PVC_Form	59,34	5,586591089	t	30	20
PVC_Form	53,82	5,57483632	t	30	20
PVC_Form	2,07	0,277625647	t	30	20
Stahl	1111	150	t	30	20
Stahl	1011	190	t	30	20
Stahlbeton	16960	5910,88608	t	10	5
Stahlbeton	15343,5	5354,252389	t	10	5
Stahlbeton	604,2	214,6984306	t	10	5
Zement	176,79	60,01497866	t	0	0
Zement	160,19	84,4061544	t	0	0
Zement	6,308	3,325021654	t	0	0

Material Sommerbergtunnel

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Brechen Stein	182000	24698,17807	t	0	0
Stahl	861	128	t	50	30
Stahlbeton	18550	2653,695536	t	10	5
PVC_Form	49,68	2,852367438	t	50	30
Sprengstoff	79	20	t	50	30
Zement	358,56	88,45640791	t	0	0
Kies	3110,4	686,4587387	t	0	0
Abbrucharbeiter	70000	5000	m ³	5	3
Beton B25	4320	930	m ³	10	5
Bohren	285	110	h	0	0

Material Geratalbrücke (A 71)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	336,85092	230,7510907	†	10	5
Beton B45	9315,6	2000	m ³	10	5
Binderschicht (grob)	944,622	579,7132936	†	10	5
Bitumen	43,924923	28,12705828	†	0	0
Bitumen	21,8953098	15,09308921	†	0	0
Füller	56,67732	44,86560666	†	0	0
Füller	33,685092	25,19091794	†	0	0
Heißeinbau	944,622	579,71	†	0	0
Heißeinbau	336,851	230,748	†	0	0
Kies	6315,9768	1382,649022	†	0	0
Kies/Brechsand	661,2354	416,6487533	†	0	0
Kies/Brechsand	247,5854262	172,9148384	†	0	0
Stahl	1397,34	410	†	10	5
Stahl	7,8336	1,634934961	†	15	10
Stahl	5,092	1,307150597	†	15	10
Stahlbeton	978,38	583,7622019	†	10	5
Stahlbeton	5649,8	268,408587	†	10	5
Verdichten	5814	102,99	m ²	0	0
Zement	1192,3968	272,4225401	†	0	0

Material Steinatalbrücke (A 71)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	562,243815	385,1425191	†	15	10
Beton B45	8086	1500	m ³	10	5
Binderschicht (grob)	1576,68525	967,6016683	†	10	5
Bitumen	73,31586413	46,94701191	†	0	0
Bitumen	36,54584798	25,19161197	†	0	0
Erdarbeiten	75000	75000	m ³	5	3
Füller	94,601115	74,88560274	†	0	0
Füller	56,2243815	42,04585469	†	0	0
Heißeinbau	1576,69	967,6	†	0	0
Heißeinbau	562,244	385,144	†	0	0
Kies	5482,308	1043,684069	†	0	0
Kies/Brechsand	1103,679675	695,4303187	†	0	0
Kies/Brechsand	413,249204	288,6092978	†	0	0
Klinker	26,88	14,97603419	†	10	5
Stahl	1212,9	330,9	†	10	5
Stahl	13,0752	2,729697359	†	15	10
Stahl	17,648	7,955059293	†	15	10
Stahlbeton	37736	4410,060745	†	10	5
Stahlbeton	8379,3	2650,754477	†	10	5
Verdichten	10044	170	m ²	0	0
Zement	1035,008	208,3322817	†	0	0

Material Wipratalbrücke (A 71)

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Asphaltbeton	290,61648	199,0798738	†	15	10
Beton B45	8212	2000	m ³	10	5
Binderschicht (grob)	814,968	500,1413105	†	15	10
Bitumen	37,896012	24,26632604	†	0	0
Bitumen	18,8900712	13,02152112	†	0	0
Füller	48,89808	38,70741979	†	0	0
Füller	29,061648	21,7333869	†	0	0
Heißeinbau	814,97	500,14	†	0	0
Heißeinbau	290,62	199,08	†	0	0
Kies	5567,736	1376,753598	†	0	0
Kies/Brechsand	570,4776	359,4592888	†	0	0
Kies/Brechsand	213,6031128	149,1817907	†	0	0
Stahl	1231,8	388,19	†	50	30
Stahl	6,7592	1,410532722	†	50	30
Stahl	4,392	1,129335207	†	50	30
Stahlbeton	1452,2	642,5064857	†	10	5
Stahlbeton	8554,2	2650,786297	†	10	5
Verdichten	5192	89,23	m ²	0	0
Zement	1051,136	268,8488319	†	0	0

Material Dickelsbachbrücke

Bezeichnung	Mengen- angabe	Fehler Menge	Einheit	Transport- entfernung	Fehler Transport
Acrylat	0,474	0,158	t	22	10
Aluminium	1,92456	0,805599647	t	22	10
Asphaltbeton	8,7861575	1,73341198	t	22	10
Asphaltbeton	88,98295	28,74158634	t	22	10
Basaltsteine	71,01	24	t	300	100
Beton B25	1108	100	m³	22	10
Beton B25	290	10	m³	22	10
Beton B25	18	2,059	m³	22	10
Beton B25	0,72	0,1415	m³	22	10
Beton B45	1332	20	m³	22	10
Bitumen	9,72	2,16	t	22	10
Bitumen	0,685320285	0,176994119	t	0	0
Bitumen	2,1291504	0,564247881	t	0	0
Bitumen	5,78389175	1,920450989	t	0	0
Bitumen	0,00101556	0,001563037	t	0	0
Epoxidharz	0,58	0,01	t	22	10
Epoxidharz	0,176	0,0224	t	22	10
Erdarbeiten	4235	150	m³	6	1
Fasermaterial	3,3818148	4,96631111	m³	0	0
Füller	9,07	3,28	t	22	10
Füller	2,196539375	0,617078785	t	0	0
Füller	6,8242	1,959543259	t	0	0
Füller	8,898295	3,922621152	t	0	0
gebrochener Naturstein	3900	519,7114584	t	6	1
gebrochener Naturstein	95,24	24,75	t	22	10
Gußasphalt	27,2968	5,624263948	t	22	10
HDPE_Rohr	0,12768	0,012760329	t	22	10
HDPE_Rohr	0,18048	0,017684343	t	22	10
HDPE_Rohr	0,00384	0,000867696	t	22	10
Kies	200	41,91	t	6	1
Kies	797,76	81,77951088	t	0	0
Kies	208,8	12,44437624	t	0	0
Kies	903,096	40,93892993	t	0	0
Kies	12,96	1,610790784	t	0	0
Kies	0,5184	0,104950343	t	0	0
Kies/Brechsand	4,173424813	1,054594692	t	0	0
Kies/Brechsand	12,96598	3,365757171	t	0	0
Kies/Brechsand	65,40246825	22,92265398	t	0	0
Kompressor	1500	500	m³	0	0
Kran	5	0,5	h	0	0
Polyester	0,29	0,0732	t	22	10
Polypropylen	0,37	0,0447	t	22	10
Pumpen	500	117	m³	0	0
PVC_Form	0,01725	0,002222108	t	22	10
Rammen	3,333333333	2,159611813	h	0	0
Schneiden	3,25	1,25	m	0	0
Schneiden	540	10	m	0	0
Siloxan & Silikonartige	0,245	0,005	t	22	10
Stahl	118,125	33,76	t	22	10
Stahl	3,456	3,456269989	t	22	10
Stahl	261	5	t	22	10
Stahl	0,004	0,002	t	22	10
Stahl	1,65	0,8	t	22	10
Stahl	0,96	0,344209239	t	22	10
Stahl	0,7464	0,076570549	t	22	10
Stahl	0,64	0,320099984	t	22	10
Stahl	0,0624	0,02081462	t	22	10
Stahlbeton	0,58565	0,045266311	t	22	10
Stahlbeton	2,809	0,134185282	t	22	10
Stahlbeton	9,57445	2,555621777	t	22	10
Stahlbeton	1,59	0,47715092	t	22	10
Stahlbeton	24,592	6,124312991	t	22	10
Vakuumbehandeln	7,25	7,267220927	m³	0	0
Verdichten	14000	1000	m²	0	0
Wurzelstöcke entfernen	10	5	m³	0	0
Zement	91,964	13,84400231	t	0	0
Zement	24,07	3,016438297	t	0	0
Zement	170,496	13,56377529	t	0	0
Zement	1,494	0,248205126	t	0	0
Zement	0,05976	0,013775822	t	0	0

Anhang E

Emissionen der baulichen Maßnahmen im Infrastrukturmodell

Die folgenden Tabellen listen die Emissionen auf, die durch den Bau aller Maßnahmen bis zum Jahr 2020 in den Korridoren entstehen. Die Emissionswerte sind auf die Baulänge der Maßnahmen bezogen. Sie dienen als Datenbasis für die Emissionsberechnung im Infrastrukturmodell.

CO₂-Emissionen aller baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell (Angaben in t/km).

Korridor	Straße		Schiene			Geschwindigkeits- erhöhung
	Neubau	Ausbau	Neubau	Zubau	Überhol- gleise	
1/3/5	4.444	874	5.113	1.021	181	315
11/13	0	938	0	912	0	0
1/20	3.039	322	2.195	950	34	421
2	3.384	931	3.045	2.011	238	193
4	2.721	949	4.984	1.291	46	374
6	3.632	919	2.598	588	47	120
7	2.519	944	5.822	843	0	0
8	4.032	941	2.826	995	0	386
9	2.752	850	5.822	1.152	136	291

CO-Emissionen aller baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell (Angaben in t/km).

Korridor	Straße		Schiene			Geschwindigkeits- erhöhung
	Neubau	Ausbau	Neubau	Zubau	Überhol- gleise	
1/3/5	3,44	0,56	3,33	0,62	0,08	0,15
11/13	0	0,89	0	0,62	0	0
1/20	1,89	0,23	0,88	0,59	0,02	0,26
2	2,21	0,53	1,22	1,21	0,14	0,11
4	1,61	0,57	2,13	0,84	0,03	0,24
6	2,01	0,53	1,41	0,33	0,03	0,08
7	1,50	0,55	3,73	0,55	0	0
8	2,02	0,73	1,81	0,64	0	0,25
9	0,87	0,64	3,73	0,73	0,09	0,18

NO_x-Emissionen aller baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell (Angaben in t/km).

Korridor	Straße		Schiene			Geschwin- digkeits- erhöhung
	Neubau	Ausbau	Neubau	Zubau	Überhol- gleise	
1/3/5	16,21	2,35	18,67	2,42	0,28	0,58
11/13	0	2,77	0	2,08	0	0
1/20	10,96	0,86	6,33	2,00	0,07	0,88
2	12,05	2,21	9,22	5,11	0,60	0,47
4	12,23	2,42	17,81	3,02	0,08	0,76
6	12,94	2,18	8,08	1,17	0,09	0,27
7	8,75	2,35	21,45	1,97	0	0
8	14,31	2,53	9,51	2,27	0	0,88
9	8,61	2,78	21,45	2,59	0,31	0,65

SO₂-Emissionen aller baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell (Angaben in t/km).

Korridor	Straße		Schiene			Geschwindigkeits- erhöhung
	Neubau	Ausbau	Neubau	Zubau	Überhol- gleise	
1/3/5	8,83	1,45	13,68	1,95	0,20	0,38
11/13	0	1,13	0	0,90	0	0
1/20	6,15	0,57	5,22	1,28	0,05	0,57
2	7,74	1,25	8,64	4,13	0,49	0,41
4	8,59	1,40	13,39	1,38	0,09	0,60
6	8,31	1,24	7,48	0,54	0,04	0,20
7	5,60	1,37	15,45	1,36	0	0
8	9,42	1,19	7,20	1,28	0	0,49
9	6,47	1,68	15,45	1,85	0,22	0,46

CH₄-Emissionen aller baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell (Angaben in t/km).

Korridor	Straße		Schiene			Geschwin- digkeits- erhöhung
	Neubau	Ausbau	Neubau	Zubau	Überhol- gleise	
1/3/5	1,304	0,269	3,211	0,404	0,046	0,080
11/13	0	0,042	0	0,194	0	0
1/20	1,072	0,185	1,018	0,320	0,012	0,142
2	2,389	0,037	2,496	0,969	0,115	0,094
4	2,273	0,139	3,190	0,290	0,035	0,209
6	2,088	0,040	2,265	0,100	0,008	0,056
7	1,413	0,114	3,495	0,293	0	0
8	2,194	0,038	1,612	0,270	0	0,103
9	1,567	0,490	3,495	0,421	0,051	0,105

KWS-Emissionen (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe) aller baulichen Maßnahmen als Eingangsdaten in das Infrastrukturmodell (Angaben in t/km).

Korridor	Straße		Schiene			Geschwindigkeits- erhöhung
	Neubau	Ausbau	Neubau	Zubau	Überhol- gleise	
1/3/5	1,989	0,271	1,675	0,276	0,027	0,060
11/13	0	0,463	0	0,315	0	0
1/20	1,207	0,117	0,395	0,244	0,009	0,108
2	29,370	0,265	0,586	0,429	0,051	0,036
4	0,883	0,287	1,504	0,428	0,006	0,077
6	1,338	0,262	0,689	0,165	0,013	0,030
7	0,808	0,276	1,876	0,263	0	0
8	1,083	0,376	0,880	0,308	0	0,119
9	0,441	0,343	1,876	0,328	0,038	0,082