

TEXTE

96/2013

Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland

Arbeitspaket 4 des Projektes „Weiterentwicklung des
Analyseinstrumentes Renewbility“

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3710 96 175
UBA-FB 001786/1

**Treibhausgas-Emissionen durch
Infrastruktur und Fahrzeuge des
Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs
sowie der Binnenschifffahrt in
Deutschland
Arbeitspaket 4 des Projektes
„Weiterentwicklung des
Analyseinstrumentes Renewbility“**

von

**Moritz Mottschall
Thomas Bergmann
Öko-Institut e.V.**

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-emissionen-durch-infrastruktur> verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Öko-Institut e.V. Büro Berlin Schicklerstr. 5-7 10179 Berlin
Abschlussdatum:	Mai 2013
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr Martin Lambrecht

Dessau-Roßlau, Dezember 2013,
3., korrigierte Fassung Januar 2015

Kurzbeschreibung

Bislang beschränken sich Verkehrsmittelvergleiche hinsichtlich der Treibhausgase meist auf die durch den Fahrzeugbetrieb verursachten Emissionen. Daneben werden für alle Verkehrsträger in den Verkehrsinfrastrukturen wie auch in den Fahrzeugen erhebliche Mengen an Rohstoffen verbaut, die bei der Herstellung zu Treibhausgasemissionen führen. Auch der Erhalt und der Betrieb der Infrastruktur und Fahrzeuge tragen zu Umweltbelastungen bei.

Die vorliegende Studie untersucht deshalb anhand einer orientierenden Stoffstromanalyse die Treibhausgasemissionen, die durch den Bau, die Instandhaltung und den Betrieb der Infrastruktur sowie die Herstellung und den Unterhalt der Fahrzeuge für den Straßen-, Schienen-, Luft- und Binnenschiffsverkehr verursacht werden und bezieht diese auf die erbrachte Verkehrsleistung (Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen Verkehrsmitteln relevante Anteile der Gesamtemissionen auf den Bau, Instandhaltung und Betrieb von Infrastruktur und Fahrzeugen entfallen (Personennahverkehr 12-26 %, Personenfernverkehr 10-29 % und Güterverkehr 4-29 %). Die Reihenfolge unter den Verkehrsträgern bezüglich der spezifischen Treibhausgasemissionen wird durch diese umfassendere Betrachtungsweise nicht verändert.

Abstract

Comparisons of greenhouse gas emissions of different means of transportation usually focus on the emissions caused by the operation of the vehicles. Additionally the construction of infrastructure and vehicles consumes significant amounts of resources, which generates greenhouse gases during production. Also the maintenance and operation of the infrastructure and vehicles cause environmental impacts.

In this study the greenhouse gas emissions produced by the construction, maintenance and operation of the infrastructure as well as by the production and maintenance of the vehicles for road traffic, rail traffic, air traffic and inland navigation were analyzed with an orienting material flow analysis. The results are shown per passenger kilometer and tons kilometer.

The analysis shows that for all means of transport relevant proportion of the greenhouse gas emissions are caused by construction, maintenance and operation of the infrastructure and vehicles (local passenger traffic 12-26 %, long-distance passenger traffic 10-29 % und freight traffic 4-29 %). The order within the means of transport regarding the specific greenhouse gas emissions is not changed by this comprehensive analysis.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Kästen

Abkürzungen

1	Einleitung	1
1.1	Projekthintergrund	1
1.2	Projektziel	2
1.3	Aufbau des Berichtes	3
2	Methodisches Vorgehen.....	5
2.1	Berechnungsprinzipien	7
2.2	Systemgrenzen.....	10
2.3	Allokation.....	11
2.4	Datenquellen	14
3	Straßenverkehr	19
3.1	Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur	19
3.2	Betrieb der Verkehrsinfrastruktur	40
3.3	Herstellung der Fahrzeuge	45
3.4	Ergebnisse	50
4	Luftverkehr	60
4.1	Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur	61
4.2	Betrieb der Verkehrsinfrastruktur	73
4.3	Herstellung und Wartung der Flugzeuge.....	77
4.4	Ergebnisse	81
4.5	Klimawirksamkeit in Reiseflughöhe	86
5	Binnenschifffahrt	89
5.1	Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur	89
5.2	Betrieb der Verkehrsinfrastruktur	101
5.3	Herstellung und Wartung der Schiffe	103
5.4	Ergebnisse	105
6	Schienenverkehr	108
6.1	Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur	108
6.2	Betrieb der Verkehrsinfrastruktur	115

6.3	Herstellung und Wartung der Fahrzeuge	118
6.4	Ergebnisse	120
7	Gesamtergebnisse	124
7.1	Gesamtergebnis.....	124
7.2	Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien	131
8	Zusammenfassung und Empfehlungen	149
9	Literatur	159
10	Anhang.....	169
10.1	Methodisches Vorgehen.....	169
10.2	Straßenverkehr	173
10.2.1	Infrastruktur	173
10.2.2	Verkehrsleistung und Allokationsschlüssel	176
10.2.3	Fahrzeugherstellung.....	179
10.2.4	Sensitivitäten	182
10.2.5	Detailergebnisse.....	183
10.3	Luftverkehr.....	189
10.3.1	Infrastruktur	189
10.3.2	Verkehrsleistung	191
10.3.3	Herstellung von Flugzeugen	192
10.3.4	CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Flugbetriebs.....	193
10.3.5	Detailergebnisse.....	195
10.4	Binnenschifffahrt	201
10.4.1	Infrastruktur	201
10.5	Schienenverkehr.....	204
10.5.1	Bau/Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur.....	204
10.5.2	Betrieb der Verkehrsinfrastruktur	216
10.5.3	Fahrzeugherstellung.....	217

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau und den Unterhalt der Schienenfahrzeuge in Deutschland 2008 [Schmied/Mottschall 2013].....	2
Bild 2:	Einzelprozesse für eine umfassende Treibhausgasbilanz des Schienenverkehrs in Anlehnung an die Product Category Rules for Railways [PCR 2009]	6
Bild 3:	Asphaltbefestigung auf hydraulisch gebundener Tragschicht nach [Natzschka 2011].....	20
Bild 4:	Schichtdicken der verschiedenen Bauklassen einer Asphaltstraße mit hydraulisch gebundener Tragschicht nach RStO 01 nach [Natzschka 2011].....	22
Bild 5:	Verteilung der Bauarten von Brücken an Bundesfernstraßen [Kaschner 2011].....	28
Bild 6:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen].....	37
Bild 7:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßen im Jahr 2008 nach Straßenkategorien [eigene Berechnungen]	38
Bild 8:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau/ Unterhalt der Straßen im Jahr 2008 nach Materialien und Transport und Energie [eigene Berechnungen].....	39
Bild 9:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen].....	44
Bild 10:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrzeugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Straßeninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	53
Bild 11:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrzeugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Straßeninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	54
Bild 12:	Sensitivitätsanalyse zur Annahme der Lebensdauer langlebiger Infrastrukturbereiche beim Straßenverkehr (100a gegenüber 60a) [eigene Berechnungen].....	56
Bild 13:	Veränderung der gesamten spezifischen THG-Emissionen des Personenverkehrs in Prozent durch Allokation der Deckschichten nach AASHO Road Test [Berechnungen Öko-Institut].....	58

Bild 14:	Veränderung der gesamten spezifischen THG-Emissionen des Güterverkehrs in Prozent durch Allokation der Deckschichten nach AASHO Road Test [Berechnungen Öko-Institut]	59
Bild 15:	Beispiele für den konstruktiven Aufbau einer Start- und Landebahn für Großraumflugzeuge [Eisenmann/ Leykauf 2003]	63
Bild 16:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau- und Unterhalt der Flughäfen nach Baumaterial/Bauaufwendungen bzw. nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen].....	72
Bild 17:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Flughafenbetrieb im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen].....	75
Bild 18:	Materialzusammensetzung eines A330-200 [Lopes 2010].....	79
Bild 19:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Flugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Flugzeuge in Deutschland 2008 [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	83
Bild 20:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Flugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Flugzeuge in Deutschland 2008 [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	85
Bild 21:	Sensitivitätsanalyse zur Annahme der Lebensdauer bei langlebigen Infrastrukturbestandteilen (100 Jahre gegenüber 60 Jahre) [eigene Berechnungen].....	86
Bild 22:	Sensitivitätsanalyse zur Berücksichtigung eines EWF von 2,4 [eigene Berechnungen].....	87
Bild 23:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Flugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Flugzeuge in Deutschland 2008 unter Berücksichtigung eines EWF von 2,4 [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	88
Bild 24:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch den Bau der Binnenschifffahrtsinfrastruktur nach Verursacherbereichen [eigene Berechnungen].....	99
Bild 25:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau- und Unterhalt der Schleusen nach Baumaterial/Bauaufwendungen [eigene Berechnungen]	100
Bild 26:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Binnenschifffahrtsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen].....	103
Bild 27:	Materialzusammensetzung eines Binnenschiffs [Knörr/Kutzner 2010].....	104
Bild 28:	Sensitivitätsanalyse zur Annahme der Lebensdauer der langlebigen Bauten (100 Jahre gegenüber 60 Jahren) [eigene Berechnungen].....	107

Bild 29:	Gleislängen der Schieneninfrastruktur in Deutschland (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg) zum 31.12.2008 (öffentliches Netz der übrigen EIU: 31.12.2007) [Schmied/Mottschall 2013].....	110
Bild 30:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau- und Unterhalt der Schienenverkehrsinfrastruktur nach Baumaterial/Bauaufwendungen bzw. nach Verursachergruppen [Schmied/Mottschall 2013].....	115
Bild 31:	Gesamtenergieverbrauch und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den stationären Bereich der DB AG im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [Schmied/Mottschall 2013]	116
Bild 32:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur, differenziert nach Verkehrsart und Verursachergruppen im Jahr 2008 [Schmied/Mottschall 2013]	118
Bild 33:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge in Deutschland [Schmied/Mottschall 2013]	122
Bild 34:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur in Deutschland im Jahr 2008 unter Berücksichtigung einer Lebensdauer für langlebige Infrastrukturen von 60 bzw. 100 Jahren [Schmied/Mottschall 2013].....	123
Bild 35:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Personennahverkehr [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	126
Bild 36:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Personenfernverkehr [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	128
Bild 37:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Güterverkehr [TREMODO 5.25; Knörr et al. 2011; eigene Berechnungen]	130
Bild 38:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Güterverkehr (ohne Luftfracht) [TREMODO 5.25; Knörr et al. 2011; eigene Berechnungen].....	130
Bild 39:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Personennah- und Fernverkehr [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen].....	155
Bild 40:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt	

	der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Güterverkehr [Knörr et al. 2011; eigene Berechnungen].....	156
Bild 41:	Frosteinwirkungszonen in Deutschland [BMVBS/BAST 2012 – Frostzonendaten: Deutscher Wetterdienst DWD]	173
Bild 42:	Verwendete Allokationsmethoden bei der Wegekostenrechnung	182
Bild 43:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch die Flugzeugherstellung in t pro Flugzeug [eigene Berechnungen].....	193
Bild 44:	Abmessungen der Regelprofile für den Kanalbau nach [Strobl 2006]	201
Bild 45:	Auskleidung von Schifffahrtskanälen mit Tondichtung [Lattermann 2010].....	201
Bild 46:	Auskleidung von Schifffahrtskanälen mit geosynthetischer Dichtungsbahn [Lattermann 2010].....	202

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Straßenlänge und durchschnittliche Breite der deutschen Straßen nach Straßenklassen.....	19
Tabelle 2:	Zuordnung der Bauklassen zu den Straßenkategorien	22
Tabelle 3:	Minstdicke des frostsicheren Oberbaus nach ZTVE-StB [Natzschka 2011].....	23
Tabelle 4:	Dicke der zusätzlichen Frostschuttschicht in Abhängigkeit von Frostempfindlichkeitsklasse und Straßenkategorie	23
Tabelle 5:	Verteilung der Deckschichtarten über die Straßenkategorien	26
Tabelle 6:	Materialmengen durch den Bau und Unterhalt des deutschen Straßennetzes pro Jahr	26
Tabelle 7:	Aufwendungen zum Bau und Unterhalt eines Meters Straße pro Jahr nach Straßenklassen.....	27
Tabelle 8:	Bestandsdaten zu den Brücken an Bundesfernstraßen.....	27
Tabelle 9:	Kennzahlen zu ausgewählten Brücken an den Bundesfernstraßen.....	29
Tabelle 10:	Durchschnittliche Materialmengen ausgewählter Brücken an den Bundesfernstraßen.....	29
Tabelle 11:	Kennwerte und Materialmengen der durchschnittlichen Tunnel der Bundesfernstraßen in Deutschland nach Anzahl der Röhren.....	31
Tabelle 12:	Annahmen zum Bestand der Straßenausstattung nach der Straßenkategorie.....	32
Tabelle 13:	Jährliche Materialmengen der Straßenausstattung (Schutzplanken, Beschilderung, Leitpfosten, Schilderbrücken, Lichtzeichenanlagen.....	33
Tabelle 14:	Flächen der Rast- und Autohöfe	34
Tabelle 15:	Menge der Baumaterialien für Bau der Rast- und Autohöfe pro Jahr.....	34
Tabelle 16:	Materialmengen der Tankstellen und Autobahntankstellen.....	35
Tabelle 17:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur im Jahr 2008 nach Fahrzeugkategorie.....	40
Tabelle 18:	Stromverbrauch der Schweizer Straßentunnel nach Verursacher	42
Tabelle 19:	Kennzahlen zu den Lichtzeichenanlagen für ausgewählte Städte in Deutschland.....	43
Tabelle 20:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Fahrzeugkategorie	45
Tabelle 21:	Materialzusammensetzung eine Pkw (mittel, Ottomotor).....	47
Tabelle 22:	Leistungsmerkmale der Fahrzeuge des Personenverkehrs	48
Tabelle 23:	Leistungsmerkmale der Fahrzeuge des Güterverkehrs.....	49
Tabelle 24:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung der Kraftfahrzeuge pro Fahrzeug-km und pro Pkm bzw. tkm	50

Tabelle 25:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Straßenpersonenverkehrs in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Straßeninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge	52
Tabelle 26:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Güterverkehrs der Solo-Lkw in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Straßeninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge	55
Tabelle 27:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Güterverkehrs der Last- und Sattelzüge in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Straßeninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge	55
Tabelle 28:	Deckenaufbau Flugbetriebsflächen Flughafen Frankfurt am Main	64
Tabelle 29:	Schichtdicken der Verkehrsflächen der Flughäfen nach Deckschichttyp und Material.....	65
Tabelle 30:	Materialverbrauch für Bau und Unterhalt der versiegelten Flächen differenziert nach Flächen- und Deckschichttyp	66
Tabelle 31:	Energieverbrauch, Aushub und Materialtransporte für die Herstellung der versiegelten Flächen eines Flughafens pro Jahr	67
Tabelle 32:	Verbrauch an Beton und Stahl sowie Materialtransporte für den Bau der Flughafengebäude.....	68
Tabelle 33:	Gesamtfläche der Start- und Landebahnen der ausgewählten Flughäfen nach der Art der Deckschicht	69
Tabelle 34:	Versiegelte Fläche ausgewählter Flughäfen.....	69
Tabelle 35:	Rechercheergebnisse zu Gebäudeflächen, Flugbetriebsflächen und sonstigen Flächen für ausgewählte Flughäfen	70
Tabelle 36:	Durchschnittlicher Anteil der verschiedenen Flächentypen an der gesamten versiegelten Fläche der Flughäfen	70
Tabelle 37:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch Bau und Instandhaltung der Luftverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten und Entfernungskategorie.....	73
Tabelle 38:	Energieverbrauch ausgewählter Flughäfen im Jahr 2008	74
Tabelle 39:	Gesamte und spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für ausgewählte Flughäfen in 2008.....	76
Tabelle 40:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten und Entfernungskategorie.....	77
Tabelle 41:	Leistungsmerkmale verschiedener Flugzeugkategorien	80
Tabelle 42:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung der Flugzeuge pro Pkm bzw. pro tkm.	81

Tabelle 43:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Passagierluftfahrt in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge	83
Tabelle 44:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge	84
Tabelle 45:	Länge der Binnenwasserstraßen in Deutschland im Jahr 2005.....	90
Tabelle 46:	Länge und Materialbestand der der Wasserstraßen in Deutschland.....	91
Tabelle 47:	Materialmenge für die verschiedenen Kanaltypen pro Kanalmeter	92
Tabelle 48:	Materialmenge und -aushub durch den Bau der Binnenwasserstraßen in Deutschland pro Jahr	93
Tabelle 49:	Menge an Stahl und Beton zum Bau von Schleusen in Deutschland sowie die Menge der Erdbewegungen und des Aushubs.....	94
Tabelle 50:	Materialmenge und Erdbewegung durch den Bau der Schleusen in Deutschland pro Jahr	94
Tabelle 51:	Menge an Stahl und Beton zum Bau von Kanalbrücken in Deutschland sowie Länge und Breite der Kanalbrücken	95
Tabelle 52:	Materialmengen und Kennzahlen einer durchschnittlichen Kanalbrücke in Deutschland.....	96
Tabelle 53:	Materialmenge durch den Bau der Kanalbrücken in Deutschland pro Jahr.....	96
Tabelle 54:	Materialbestand und Anlagengröße der Binnenhäfen in Deutschland	97
Tabelle 55:	Materialmenge durch den Bau der Binnenhäfen in Deutschland pro Jahr.....	97
Tabelle 56:	Verkehrsleistung durch die Materialtransporte durch Bau der Binnenschiffahrtsinfrastruktur nach Bereich und Verkehrsmittel.....	98
Tabelle 57:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau/ Unterhalt der Binnenschiffahrtsinfrastruktur im Jahr 2008.....	100
Tabelle 58:	Spezifischer Energieverbrauch, Mengen Baggergut und Transportleistung für den Betrieb der Wasserstraßen	102
Tabelle 59:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Binnenschiffahrtsinfrastruktur im Jahr 2008.....	103
Tabelle 60:	Leistungsmerkmale der Binnenschiffe.....	104
Tabelle 61:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung der Binnenschiffe pro tkm.	105
Tabelle 62:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Binnenschiffahrt in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Binnenschiffahrtsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Binnenschiffe.....	106
Tabelle 63:	Anzahl der Brücken und deren Länge im aktiven Netz der Deutschen Bahn AG im Jahr 2008 (ohne S-Bahn Berlin und Hamburg)	111

Tabelle 64:	Anteil des Personennahverkehrs an den Zughalften in Bahnhöfen der Kategorie 1 bis 3.....	113
Tabelle 65:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch Bau und Instandhaltung der Schienenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten	115
Tabelle 66:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten	117
Tabelle 67:	Leistungsmerkmale verschiedener Zugkonfigurationen.....	119
Tabelle 68:	Jährliche CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge einschließlich Waggons pro Zug-km sowie pro Pkm bzw. pro tkm	120
Tabelle 69:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Schienenverkehrs in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Schieneninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Schienenfahrzeuge	121
Tabelle 70:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Infrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge.....	124
Tabelle 71:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Infrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge.....	127
Tabelle 72:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen im Güterverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Infrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge.....	129
Tabelle 73:	CO ₂ Äquivalent Emissionen für zwei vergleichbare Straßenkategorien aus [Chester 2008] und dieser Studie.....	132
Tabelle 74:	Gewicht von Passagieren, Fracht und Post auf einem durchschnittlichen Flug nach [Chester 2008].....	135
Tabelle 75:	Spezifische CO ₂ -Äquivalente-Emissionen für den Bau, Unterhalt und Betrieb von Schieneninfrastruktur, für den Bau und Unterhalt von Zügen sowie Versicherungen nach Chester [2008].....	137
Tabelle 76:	Vergleich der spezifischen CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Pkw und die Linienbusse mit Frischknecht/Stucki [2009] und ecoinvent 2.01	140
Tabelle 77:	Vergleich der spezifischen Emissionen für den Bereich Straße im Güterverkehr der Studie mit Frischknecht/Stucki [2009].....	140
Tabelle 78:	Vergleich der spezifischen CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Personenluftverkehr mit Frischknecht/ Stucki [2009] und ecoinvent 2.01	141
Tabelle 79:	Vergleich der spezifischen CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro tkm für die Luftfracht mit Frischknecht/ Stucki [2009] und ecoinvent 2.01.....	142
Tabelle 80:	Vergleich der spezifischen CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro tkm für die Binnenschifffahrt mit Frischknecht/ Stucki [2009] und ecoinvent 2.01.....	144

Tabelle 81:	Vergleich der Verkehrsweg bezogenen Emissionen für den Bereich Straße der Studie mit Hill et al. [2012].	145
Tabelle 82:	Vergleich der spezifischen Emissionen für den Personenverkehr im Bereich Luft der Studie mit Hill et al. [2012].	146
Tabelle 83:	Vergleich der Emissionen pro Baufläche der Luftverkehrsinfrastruktur der Studie mit Hill et al. [2012].	146
Tabelle 84:	Emissionen der Schieneninfrastruktur pro Streckenkilometer nach Hill et al. [2012].	148
Tabelle 85:	Überblick über die in dieser Studie verwendeten Lebensdauern.	169
Tabelle 86:	CO ₂ - und THG-Emissionsfaktoren für verschiedene Materialien	170
Tabelle 87:	Dichte verschiedener Baumaterialien	171
Tabelle 88:	CO ₂ - und THG-Emissionsfaktoren (einschl. Emissionen aus der Kraftstoffherstellung bzw. Stromproduktion) für Transporte mit verschiedenen Lkw-Größenklassen, der Bahn und dem Binnenschiff in Deutschland im Jahr 2008.	172
Tabelle 89:	CO ₂ - und THG-Emissionsfaktoren für die verwendeten Energieträger	172
Tabelle 90:	CO ₂ - und THG Emissionen für Baumaschinen zum Ausgraben und Verfüllen von Erdmassen	172
Tabelle 91:	Brücken- und Tunneldaten der deutschen Bundesfernstraßen	173
Tabelle 92:	Mehr- bzw. Minderdickenbedarf des frostsicheren Oberbaus durch örtliche Verhältnisse	174
Tabelle 93:	Materialzusammensetzung der einzelnen Bestandteile der Straßenausstattung und -beleuchtung	175
Tabelle 94:	Verkehrsleistung im Straßenverkehr in 2008	176
Tabelle 95:	Annahmen zum Fahrzeugleergewicht, Auslastung und Gesamtgewicht im Straßenverkehr	176
Tabelle 96:	Allokationsschlüssel für den Straßenverkehr auf Basis der Brutto-Tonnen-Kilometer in 2008.	177
Tabelle 97:	Allokationsschlüssel für den Straßenverkehr auf Basis des Energieverbrauchs in 2008	177
Tabelle 98:	Allokationsschlüssel für den Straßenverkehr auf Basis der Fahrleistung in 2008.	178
Tabelle 99:	Materialzusammensetzung der Pkw mit Ottomotor	179
Tabelle 100:	Materialzusammensetzung der Diesel-Pkw	180
Tabelle 101:	Materialzusammensetzung der Busse	181
Tabelle 102:	Materialzusammensetzung der Schwere Nutzfahrzeuge	181
Tabelle 103:	Angenommene Achslasten und die resultierenden Allokationsschlüssel für die Sensitivitätsberechnung nach AASHO nach Fahrzeugkategorien	183

Tabelle 104:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Straßen	183
Tabelle 105:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Brücken	184
Tabelle 106:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Tunnel... ..	184
Tabelle 107:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Rast- und Autohöfe	185
Tabelle 108:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Tankstellen	185
Tabelle 109:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Werkstätten.....	186
Tabelle 110:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Straßenausstattung und -beleuchtung	186
Tabelle 111:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Straßenbeleuchtung pro Fahrzeugkilometer, Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer für eine Zurechnung von 20 % und 50 % der Gesamtemissionen zum motorisierten Straßenverkehr.....	187
Tabelle 112:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Tunnelbetrieb (ohne Beleuchtung) pro Fahrzeugkilometer, Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer	187
Tabelle 113:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Lichtzeichenanlagen pro Fahrzeugkilometer, Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer	188
Tabelle 114:	Fläche und Ausführung der Start- und Landebahnen der ausgewählten Flughäfen.....	189
Tabelle 115:	Ergebnisse der Abschätzung zu den Deckschichttypen des Vorfelds bzw. Flugbetriebsflächen	190
Tabelle 116:	Gewerblicher Luftverkehr auf ausgewählten Flugplätzen im Jahr 2008.....	191
Tabelle 117:	Anteil der verschiedenen Flugzeugkategorien an den Starts und der Verkehrsleistung im Jahr 2008	192
Tabelle 118:	Betriebsleergewicht und Materialmengen der verschiedenen Flugzeugkategorien.....	192
Tabelle 119:	Spezifische CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Flugbetriebs für die Passage und Fracht differenziert nach Entfernungskategorie mit und ohne Berücksichtigung eines EWF.....	193
Tabelle 120:	Spezifische direkte CO ₂ - Emissionen (mit und ohne Berücksichtigung eines EWF) des Flugbetriebs für die Passage und Fracht sowie EWF-Aufschlag differenziert nach Entfernungskategorie	194

Tabelle 121:	Spezifische CO ₂ -Emissionen für die Passage im Flugverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge	195
Tabelle 122:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für die Passage im Flugverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge	196
Tabelle 123:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für die Passage im Flugverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge unter Berücksichtigung eines EWF von 2,4	197
Tabelle 124:	Spezifische CO ₂ -Emissionen für die Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge	198
Tabelle 125:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für die Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge	199
Tabelle 126:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für die Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge unter Berücksichtigung eines EWF von 2,4	200
Tabelle 127:	Annahmen zu den Transportentfernungen und Transportmitteln der Materialtransporte bei Bau und Unterhalt der Binnenschifffahrtsinfrastruktur	202
Tabelle 128:	CO ₂ - bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau der Binneninfrastruktur in Deutschland	203
Tabelle 129:	Verbrauch an Kies-Sand für Bau und Unterhalt der Planumsschicht, differenziert nach Neubaustrecken und übrigen Strecken.....	204
Tabelle 130:	Stahlverbrauch für Bau und Unterhalt der Schienen, differenziert nach Schientypen.....	204
Tabelle 131:	Materialaufwand für Bau und Unterhalt von Schwellen mit Schotterbett, differenziert nach Schwellentyp	205
Tabelle 132:	Beton und Stahl für Bau und Unterhalt der Festen Fahrbahn.....	206
Tabelle 133:	Menge an Stahl und Beton zum Bau verschiedener zweigleisiger Eisenbahn-Talbrücken an den NBS Hannover-Würzburg, Köln-Rhein/Main, Mannheim-Stuttgart und Nürnberg-Erfurt sowie die Menge an Erdaushub	207
Tabelle 134:	Betonverbrauch für den Überbau verschiedener zweigleisiger Talbrücken an der NBS Nürnberg-Erfurt.....	208
Tabelle 135:	Stahlmengen für ausgewählte Stahl-Eisenbahnbrücken in Deutschland	208
Tabelle 136:	Menge an Stahl und Beton zum Bau ausgewählter zweigleisiger Eisenbahntunnel in überwiegend bergmännischer Bauweise sowie die Menge des Ausbruchs in Deutschland.....	209

Tabelle 137:	Menge an Stahl und Beton zum Bau ausgewählter zweigleisiger Eisenbahntunnel in überwiegend offener Bauweise sowie die Menge des Ausbruchs in Deutschland.....	210
Tabelle 138	Verbrauch an Kupfer und Bronze für Herstellung und Unterhalt von Oberleitungen für eine zweigleisige Strecke	210
Tabelle 139	Verbrauch an Beton, Stahl und Aluminium für Herstellung und Unterhalt von Oberleitungsmasten für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert).....	211
Tabelle 140:	Verbrauch an Stahl, Kupfer, Ziegelsteinen und Beton für Herstellung und Unterhalt von Unterwerken für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert).....	212
Tabelle 141:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Stroms aus dem öffentlichen Hochspannungsnetz für die Jahre 2005 und 2010 ohne und mit Materialvorleistungen.....	212
Tabelle 142:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro TJ Dieselmotorkraftstoff für das Jahr 2005 ohne und mit Materialvorleistungen	212
Tabelle 143:	Verbrauch an Beton/Ziegelsteinen, Stahl, Kupfer und PE für Herstellung und Unterhalt von Stellwerken pro Gleiskilometer	213
Tabelle 144:	Übersicht über Gebäudeinnenflächen, Bahnsteigflächen, Anzahl der Stockwerke und Materialmengen für die Errichtung von Bahnhöfen, differenziert nach Bahnhofskategorien.....	213
Tabelle 145:	Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Bahnhöfen	214
Tabelle 146:	Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Instandhaltungswerken	215
Tabelle 147:	Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Güterbahnhöfen.....	215
Tabelle 148:	Anteile der Verkehrsarten an den CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen innerhalb einer Verursachergruppe nach Angaben der DB AG für das Jahr 2008.....	216
Tabelle 149:	Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von Triebfahrzeugen der Typen ICE 1 und ICE 2 (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 500.000 km/a).....	217
Tabelle 150:	Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Nah- und Fernverkehrszügen (Lebensdauer: 40 Jahre).....	218
Tabelle 151:	Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Güterzügen (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 40.000 km/a)	219

Abkürzungen

BAB	Bundesautobahn
CCD	Climb, cruise, descend
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ e	Kohlendioxidäquivalente
DB AG	Deutsche Bahn AG
EWf	Emission Weighting Faktor
GV	Güterverkehr
HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht
LCA	Life Cycle Assessment
LTO	Landing-Take-Off
NE-Bahnen	nichtbundeseigenen Bahnen
OWE	Operating Weight Empty
PCR	Product Category Rules
Pkm	Personenkilometer
PV	Personenverkehr
RFI	Radiative Forcing Index
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transport Emission Model
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen - VDV
VE	Verkehrseinheit
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

1 Einleitung

1.1 Projekthintergrund

Die Vergleiche von Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen von Verkehrsmitteln beziehen i. d. R. die direkten Emissionen, verursacht durch die Verbrennung des Kraftstoffs in den Fahrzeugen (z. B. Benzin, Diesel, Kerosin), wie auch die indirekten energiebedingten Emissionen, die durch die Gewinnung, Umwandlung, Verteilung und Bereitstellung der Energieträger entstehen, ein¹.

In Deutschland werden für emissionsseitige Umweltvergleiche in der Regel die Daten des Verkehrsemissionsmodells Transport Emission Estimation Model (TREMOT) verwendet, das vom Umweltforschungsinstitut IFEU im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt wurde. Auch TREMOD enthält für alle Verkehrsmittel die direkten sowie die indirekten energiebedingten Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen.

Neben den Umweltwirkungen der Verkehrsleistungen durch den Verbrauch von Kraftstoffen und Elektrizität werden für alle Verkehrsträger in den Verkehrsinfrastrukturen wie auch in den Fahrzeugen erhebliche Mengen an Rohstoffen verbaut (z. B. Beton, Stahl, Kupfer), die bei der Herstellung zu Umweltauswirkungen führen können. Auch der Erhalt und der Betrieb der Infrastruktur und Fahrzeuge tragen zu Umweltbelastungen bei.

Ausgelöst durch eine US-amerikanische Studie² ist die Diskussion um den Einbezug der Infrastruktur in ökobilanzielle Vergleiche von Verkehrsmitteln wieder aufgekommen und in der aktuellen Studie des Öko-Institutes im Auftrag des UBA mit dem Titel „Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland“ [Schmied/Mottschall 2013] in Bezug auf den Schienenverkehr in Deutschland detailliert betrachtet worden.³

Den Ergebnissen der Studie zufolge sind beim Schienenverkehr in Deutschland 26 % (Personennahverkehr), bzw. 29 % (Personenfernverkehr, Güterverkehr) der gesamten Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer (Pkm) bzw. Tonnenkilometer (tkm) dem Bau, Unterhalt und Betrieb von Infrastruktur und Fahrzeugen zuzurechnen.

¹ Die Berücksichtigung der indirekten energiebedingten Emissionen ist gerade bei Verkehrsmittelvergleichen zwingend notwendig, da auch mit Strom betriebene Fahrzeuge eingesetzt werden (z. B. Straßen-, S- und U-Bahnen (SSU), Eisenbahn, Elektrofahrzeuge), welche keine direkten Emissionen aufweisen.

² Chester, V.; Horvath, A.: Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure in: Environmental Research Letters Volume 4 Number 2, 2009

³ Schmied, M.; Mottschall, M. (2013): Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland (UBA-Texte 2013); Berlin. (abgeschlossen im Juni 2010)

Ein Teil der Ergebnisse der Studie des Öko-Institutes wird in Bild 1 dargestellt und verdeutlicht, dass die Treibhausgasemissionen durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie durch den Bau und Unterhalt der Züge von hoher Relevanz sind und daher bei zukünftigen Umweltvergleichen einbezogen werden sollten. In Schmied/Mottschall [2013] wurden ausschließlich die Treibhausgasemissionen des Schienenverkehrs betrachtet, andere Verkehrsmittel blieben unberücksichtigt. Sowohl der hohe Anteil der durch die Infrastruktur bedingten Emissionen des Schienenverkehrs, als auch die Ergebnisse der US-amerikanischen Studie lassen erwarten, dass diese Emissionen auch bei anderen Verkehrsträgern relevante Größenordnungen erreichen.

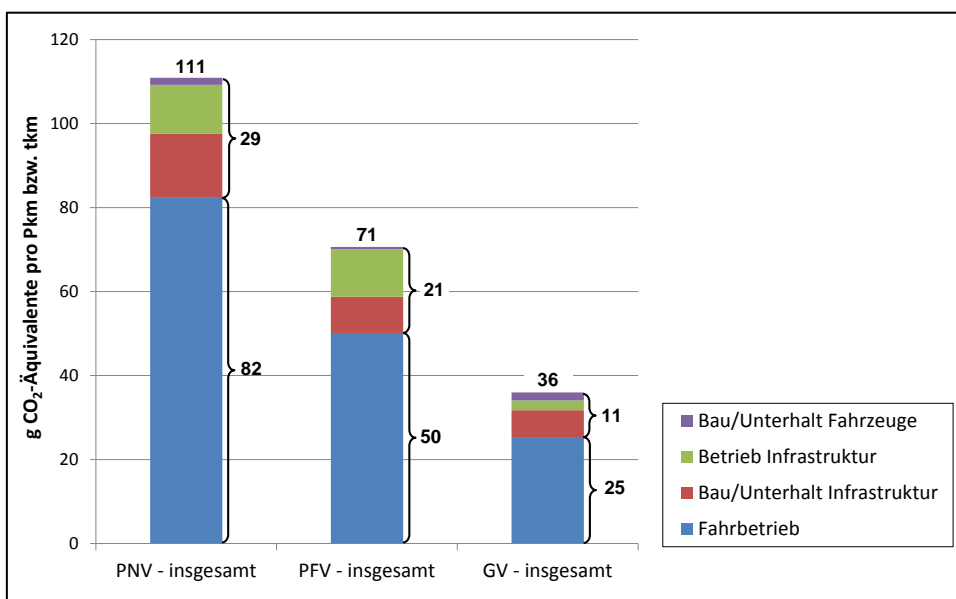


Bild 1: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau und den Unterhalt der Schienenfahrzeuge in Deutschland 2008 [Schmied/Mottschall 2013]

1.2 Projektziel

Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, anknüpfend an die vorhergegangene Studie über die Schieneninfrastruktur, **Treibhausgasemissionen für den Bau, die Instandhaltung und den Betrieb der Infrastruktur sowie für die Herstellung und den Unterhalt der Fahrzeuge für den Straßen-, Luft- und Binnenschiffsverkehr** zu ermitteln. Als Bezugsjahr wird in der vorliegenden Studie das Jahr 2008 gewählt, um einerseits mit der Vorgängerstudie zum Schienenverkehr vergleichbar zu bleiben und andererseits sicherzustellen, dass eine durch die Wirtschafts- und Finanzkrise reduzierte Verkehrsleistung beim Güterverkehr sich nicht verzerrend auf die Ergebnisse auswirkt. Ebenfalls übereinstimmend zur Vorgängerstudie werden die Emissionen pro Meter Verkehrsweg und pro Personenkilometer (Pkm) bzw. Tonnenkilometer (tkm) ermittelt,

sofern dies möglich ist. Bei Abweichungen wird dies konkret ausgewiesen. Getrennt erfasst werden die folgenden Kategorien:

Straßenverkehr:

- Straßenpersonenverkehr
- Linien-, Reisebus
- Straßengüterverkehr

Luftverkehr:

- Passage (national und international)
- Fracht (national und international)

Binnenschifffahrt:

- Güterverkehr

Letztendlich ergänzt dieses Gutachten die Ergebnisse der Studie zur Infrastruktur um drei weitere Verkehrsträger, um zu ermitteln welche Beiträge an CO₂ bzw. CO₂-Äquivalenten auf den Fahrbetrieb hinzuaddiert werden müssten, um eine vollständige Emissionsbilanz zu erhalten. Die Ermittlung der Treibhausgasemissionen erfolgt dabei mit Hilfe einer orientierenden Stoffstromanalyse; eine detaillierte Ökobilanz für jeden der zu untersuchenden Verkehrsträger würde den Rahmen dieser Studie sprengen.

1.3 Aufbau des Berichtes

In **Kapitel 2** erfolgt die Beschreibung der **methodischen Vorgehensweise** zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen beim Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie bei der Herstellung und Wartung der Fahrzeuge. Dabei wird insbesondere auf die Systemgrenzen für die Bilanz, auf die Allokationsregeln zur Aufteilung der Emissionen auf einzelne Bereiche sowie auf die verwendeten generischen Daten detailliert eingegangen.

Kapitel 3 widmet sich den CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen des **Straßenverkehrs**. Dafür werden in Kapitel 3.1 die für den Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur benötigten Materialmengen, die durchgeführten Transporte und die mit den Bautätigkeiten verbundenen Energieverbräuche ebenso wie die sich daraus ergebenden CO₂- bzw. CO₂-Äquivalentemissionen betrachtet. Die verwendeten Daten und Ergebnisse der Treibhausgasbilanz für den Betrieb der Straßeninfrastruktur finden sich in Kapitel 3.2, für die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge in Kapitel 3.3. Die Darstellung der Ergebnisse für den Bereich des Straßenverkehrs erfolgt in Kapitel 3.4.

In **Kapitel 4** wird der **Luftverkehr** betrachtet, in **Kapitel 5** die **Binnenschifffahrt** und in **Kapitel 6** der **Schieneverkehr**. Der Aufbau entspricht dabei dem von Kapitel 3:

Das erste Unterkapitel befasst sich jeweils mit dem Bau und Unterhalt der entsprechenden Infrastruktur. Hier werden die verwendeten Materialmengen, die

durchgeführten Transporte und die mit den Bautätigkeiten verbundenen Energieverbräuche ebenso wie die sich daraus errechneten Treibhausgasemissionen vorgestellt. Die verwendeten Daten und Ergebnisse der Treibhausgasbilanz für den Betrieb der Infrastruktur finden sich jeweils im zweiten Unterkapitel wieder. Das dritte Unterkapitel umfasst jeweils die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge und im vierten Unterkapitel folgen jeweils die zusammengefassten Ergebnisse.

In **Kapitel 7** folgen die **Darstellung der Gesamtergebnisse** und der Vergleich mit anderen Studien. Als letztes inhaltliches Kapitel finden sich in **Kapitel 8** eine **Zusammenfassung der Ergebnisse** der Studie und die Schlussfolgerungen aus dem Gutachten. Die verwendete **Literatur** ist in **Kapitel 9** aufgeführt. Im **Anhang** (Kapitel 10) finden sich weitere Informationen und Detailergebnisse in Tabellenform.

2 Methodisches Vorgehen

In der vom Öko-Institut erstellten Studie „Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland“ [Schmied/Mottschall 2013] wurden bereits die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen von der Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugen für den Schienenverkehr ermittelt. Die Studie konnte dabei auf die „Product Category Rules (PCR) for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for Interurban railway transport services of passengers, Railway transport services of freight and Railways“ zurückgreifen. Diese schafften einen methodischen Rahmen, wie der Bau und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie die Herstellung der Schienenfahrzeuge bei einer ökologischen Bewertung berücksichtigt werden sollten. Für die anderen Verkehrsträger liegt dieser methodische Rahmen nicht vor. Sofern dies sinnvoll ist, orientiert sich das Vorgehen der vorliegenden Studie an den PCR des Schienenverkehrs, hebt aber die Besonderheiten der einzelnen Verkehrsträger hervor.

Konkret unterscheiden die PCR for Railways zwischen dem Betrieb der Fahrzeuge (einschließlich der Energievorketten) als eigentlichem Kernprozess sowie dem Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur und der Herstellung der Schienenfahrzeuge als vorgeschalteten Prozessen (Upstream processes) [PCR 2009]. Bei allen Prozessen sind die indirekten Umweltauswirkungen durch Gewinnung von Rohmaterialien und Energieträgern, deren Transporte, Verarbeitung und Umwandlung einschließlich der dabei auftretenden Verluste zu berücksichtigen (vereinfacht dargestellt in Bild 2).

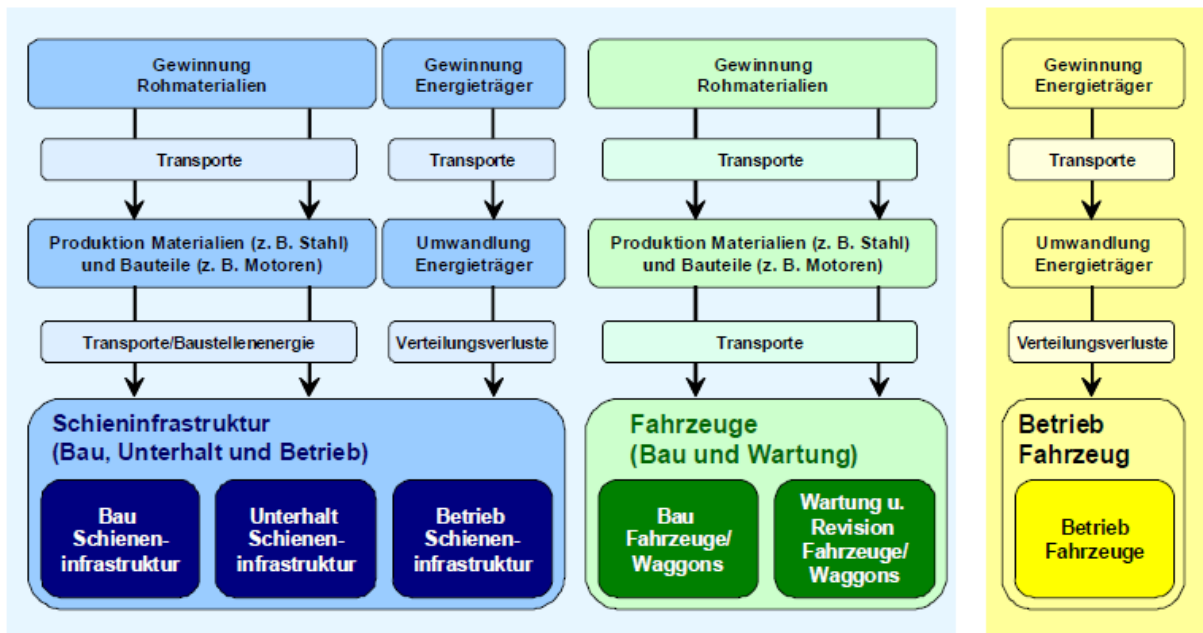


Bild 2: Einzelprozesse für eine umfassende Treibhausgasbilanz des Schienenverkehrs in Anlehnung an die Product Category Rules for Railways [PCR 2009]

Die PCR for Railways machen wie alle PCR Vorgaben, wie ökobilanzielle Bewertungen von Produkten zum Erlangen von Umweltdeklarationen (so genannten Environmental Product Declarations – EPD) – in diesem Falle für Schienenverkehrsdienstleistungen – durchzuführen sind. Produkt-Umweltdeklarationen werden auf Grundlage der ISO 14025 und ISO 14040ff. erstellt und sind damit eine gute methodische Basis für ökobilanzielle Analysen. Aus diesem Grund erfolgt in dieser Studie die Ermittlung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) der verschiedenen Verkehrsmittel angelehnt an die methodischen Vorgaben der PCR for Railways. Die THG-Emissionen werden dabei mit Hilfe einer orientierenden Stoffstromanalyse und nicht mit Hilfe einer detaillierten Ökobilanz ermittelt; daher sind teilweise Vereinfachungen gegenüber den PCR for Railways notwendig. Diese Abweichungen werden aber explizit benannt. Darüber hinaus sind aber auch in den PCR for Railways nicht alle methodischen Aspekte hinreichend geklärt. In diesem Fall werden in dieser Studie Festlegungen getroffen, die über die der PCR hinausgehen. Auch dies wird explizit benannt.

Im folgenden Kapitel 2.1 werden die Berechnungsprinzipien vorgestellt. In Kapitel 2.2 werden dann die Systemgrenzen für die Bilanzierung benannt. Daran anschließend werden in Kapitel 2.3 die Allokationsregeln ausgeführt. Kapitel 2.4 beschreibt dann die in der vorliegenden Studie verwendeten Datenquellen.

2.1 Berechnungsprinzipien

Fokussierung auf Treibhausgasemissionen

Von den möglichen Umweltauswirkungen der Verkehrsinfrastruktur und der Fahrzeuge werden in der vorliegenden Studie ausschließlich die CO₂-Emissionen und die Treibhausgasemissionen betrachtet (THG-Emissionen) betrachtet. Die THG-Emissionen werden dabei als sogenannte CO₂- Äquivalente berechnet. Hierzu werden neben Kohlendioxid (CO₂) auch andere treibhausgaswirksame Emissionen entsprechend ihrem Global Warming Potential (GWP) berücksichtigt. In diesem Zusammenhang relevante Emissionen sind Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren wurden folgende Äquivalenzfaktoren zur Berechnung der CO₂-Äquivalent-Emissionen zugrunde gelegt: CO₂ = 1, CH₄ = 25, und N₂O = 298 [IPCC 2007]. Dies bedeutet, dass ein Kilogramm Methan über 100 Jahre betrachtet einer Treibhausgaswirkung von 25 kg CO₂ entspricht und daher 25 kg CO₂-Äquivalent-Emission ergeben. Mögliche THG-Emissionen, bedingt durch Änderungen der Landnutzung (z. B. durch permanente Abholzung von Waldflächen), werden nicht betrachtet, da die hierzu notwendigen Daten nicht verfügbar sind. In diesem Punkt weicht diese Studie daher von den Anforderungen der PCR for Railways ab.

Vorgehensweise bei der Berechnung

Die Berechnung der THG-Emissionen für Bau und Wartung der Infrastruktur sowie der Fahrzeuge erfolgt auf Basis der eingesetzten Materialmengen. Hierbei werden die Emissionen berücksichtigt, die bei der Gewinnung der Rohstoffe, sowie deren Transport und deren Verarbeitung zu den Grundmaterialien (wie z. B. Beton, Stahl, Kupfer) entstehen (siehe Bild 2). Ebenfalls betrachtet werden für die Infrastruktur die Emissionen, die durch die Transporte der Materialien zum Bauort und durch die Energieverbräuche auf den Baustellen bedingt entstehen. Nicht berücksichtigt werden die Emissionen, die bei der Verarbeitung der Grundmaterialien zu den Endprodukten entstehen (z. B. Signale, Motoren). Damit fehlen z. B. auch die energiebedingten Emissionen zur Herstellung der Fahrzeuge. Aufgrund der geringen Bedeutung für die THG-Emissionen ist dies aber vertretbar (siehe hierzu die Unterkapitel Herstellung und Wartung der Fahrzeuge).

Während die so berechneten Emissionen für die Wartung dem Betrachtungsjahr direkt zugeordnet werden können, ist dies beim Bau der Infrastruktur und den Fahrzeugen nicht möglich. Die hierfür ermittelten Emissionen, berechnet über die verbauten Materialien, müssen im nächsten Schritt noch über die Lebensdauer auf ein Jahr heruntergebrochen werden. Hat ein Fahrzeug eine Lebensdauer von x Jahren, sind für die jährlich zu berücksichtigenden Emissionen 1/x der Gesamtemissionen durch die Herstellung des Fahrzeuges zu berücksichtigen. Die in dieser Studie verwendeten Lebensdauern sind in den jeweiligen Kapiteln und im Anhang dokumentiert (siehe Tabelle 85).

Die Berechnung der THG-Emissionen der Infrastruktur wie auch von den Fahrzeugen, die bereits vor Jahren gebaut wurden, werden in dieser Studie mit den heutigen Emissionsfaktoren bewertet. Dies ist eine notwendige Vereinfachung, auch wenn heute oftmals neue Technologien zur Herstellung der Materialien zum Einsatz kommen, die früher noch nicht verfügbar waren, oder die Emissionen der zur Herstellung verwendeten Hilfsenergie (z. B. Strom) und Hilfsprozesse (z. B. Transporte) von damals nicht mit heute vergleichbar sind. Diese Vorgehensweise wird in der Regel auch von den bisher publizierten Studien in diesem Bereich angewandt [Maibach et al. 1999; Spielmann et al. 1996; Köser et al. 2002; Frischknecht/Stucki 2009; UIC 2009; Schmied/Mottschall 2013].

Weiterer Regelungsbedarf besteht beim Umgang mit Infrastrukturkomponenten, die bereits vor sehr langer Zeit erstellt wurden, so dass die im Regelfall unterstellten Lebensdauern (z. B. 60 oder 100 Jahre; siehe unten) überschritten sind. Im Rahmen der Vorgängerstudie „Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland“ wurde entschieden, diese Komponenten auch über die Standard-Lebensdauer $1/x$ der Emissionen in der THG-Bilanz anzurechnen, wohl wissend, dass damit die Emissionen überschätzt werden. Zum einen wurde dieser Weg gewählt, um die Varianten unterschiedlicher Lebensdauern begrenzt zu halten, zum anderen um nicht für das gesamte deutsche Verkehrsnetz in die Diskussion zu kommen, wann die Infrastrukturkomponente wirklich erbaut wurde.

Für den Betrieb der Infrastruktur werden – wie in Bild 2 dargestellt – die mit der Produktion der Energie verbundenen THG-Emissionen unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste berechnet. Wie bei Wartungsmaßnahmen ist dieser Energieverbrauch genau dem Betrachtungsjahr zugeordnet, weshalb keine weiteren Allokationen über die Lebensdauern nötig sind.

Berechnung der Gebäude

Die in den Gebäuden verbauten Materialien und Materialmengen können sich stark unterscheiden. Eine detaillierte Bilanzierung der Gebäude würde den Rahmen der vorliegenden Studie sprengen, weshalb auf die vereinfachte Vorgehensweise aus Schmied/Mottschall [2013] zurückgegriffen wurde: Auf Basis der Gebäudeflächen und Geschossflächen wurden die Materialien Beton und Bewehrungsstahl betrachtet, die sich durch einen hohen Materialanteil und eine hohe Relevanz bezüglich der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen auszeichnen. Zur Ermittlung der benötigten Mengen an Beton und Stahl wurde vereinfachend angenommen, dass die Grundfläche des Gebäudes aus einer 1 m starken Betonschicht und Decken- und Geschossflächen aus 0,2 m starken Betonschichten bestehen. Bei Decken- und Geschossflächen wird weiterhin unterstellt, dass pro Quadratmeter rund 480 kg Beton und 16 kg Stahl verbaut wurden (Massenanteil des Stahls: 3,2 %). Bei Bodenplatte und anderen Flächen wurde hingegen von einem geringeren Stahlanteil ausgegangen (1,6 %) [Buchert et al. 2004]. Dieser Berechnungsansatz wurde unabhängig von dem Verkehrsmittel für die jeweiligen Gebäude verwendet.

Zur Berechnung der jährlichen Herstellungsaufwände wurde die Lebensdauer mit 60 Jahren veranschlagt. Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsberechnung mit einer Lebensdauer von 100 Jahren durchgeführt. Da keine Angaben zu den jährlichen Materialaufwänden von Instandhaltungsmaßnahmen für die Verkehrsträger vorlagen, konnten diese im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Neben den THG-Emissionen durch die verbauten Materialien wurden auch die Emissionen durch den Materialtransport zur Baustelle berücksichtigt. Die Transportdistanzen wurden analog zu den Werten aus Schmied/Mottschall [2013] veranschlagt und sind in den entsprechenden Kapiteln noch einmal explizit angegeben.

Recycling und Abfallentsorgung

Die PCR for Railways sprechen sich dafür aus, dass keine Allokation für Materialien, die aus Recycling-Prozessen kommen, bzw. für Abfallmengen, die dem Recyclingprozess zugeführt werden, durchgeführt werden soll. Das heißt, dass verwendete Recyclingmaterialien auf der Inputseite berücksichtigt werden sollen, jedoch ohne Betrachtung der Umweltauswirkungen aus früheren Lebenszyklen. Damit werden auf der Output-Seite keine Gutschriften für das Recycling von Abfällen bzw. Reststoffen angerechnet (so genannte Cut-Off-Methode); Recyclinggutschriften werden nur auf der Input-Seite vergeben. Wichtige Umweltauswirkungen durch Recyclingprozesse (z. B. Sammlung der Stoffe, Behandlung) sollen aber nach den PCR for Railways im System berücksichtigt werden. Diese Studie folgt diesem Vorschlag. Konkret bedeutet dies, dass im Regelfall mit typischen Produktmischen aus Primär- und Sekundärmaterialien gerechnet wird (siehe Kapitel 2.4), da für die meisten eingesetzten Materialien die Recyclinganteile nicht bekannt sind. Liegen aber entsprechende Informationen vor, werden diese berücksichtigt. So wird zum Beispiel für die Fahrzeugherstellung wie auch die Herstellung der Schienen ausschließlich Primärstahl verwendet, während für Bewehrungsstahl ausschließlich Sekundärstahl zugrunde gelegt wird. Die Entsorgung von Abfällen kann mit THG-Emissionen verbunden sein. Eine durchgängige Berücksichtigung der Abfallentsorgung ist in diesem Vorhaben nicht möglich, da entsprechende Angaben fehlen. Lediglich für die Bereiche, für die entsprechende Daten vorliegen, wird die Abfallentsorgung berücksichtigt.

Verwendung spezifischer Daten

Die PCR for Railways, an denen sich diese Studie gerade im methodischen Teil orientiert, schreiben vor, dass möglichst konkrete projektspezifische Daten für die Bilanzierungen verwendet werden sollen. Generische Daten können verwendet werden, dürfen aber insgesamt nicht mehr als 10 % zur Gesamtumweltwirkung beitragen. Gleichzeitig wird aber diese Regelung aufgehoben, wenn ganze Netzwerke für Eisenbahnunternehmen betrachtet werden. In solchen Fällen können generische Daten benutzt werden, die allerdings möglichst nahe die Situation des betrachteten Netzwerkes abbilden. Die Daten sollten den Anforderungen der ISO 14040 ff. und ISO 14025 entsprechen und es sollte

dokumentiert werden, warum sie für die Fragestellung anwendbar sind. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, wird in dieser Studie entsprechend vorgegangen.

Nach den PCR for Railways sollten zudem die Daten zur Verkehrsleistung (Personen- und Tonnenkilometer, Brutto-Tonnenkilometer) oder Auslastung auf spezifischen Jahresdurchschnittswerten basieren. Auch diesen Anforderungen wird in dieser Studie gefolgt.

Abschneidekriterien

Prozesse und Aktivitäten, die zusammen nicht mehr als 1 % zu den Gesamtumweltauswirkungen beitragen, können nach den PCR for Railways bei der ökobilanziellen Betrachtung vernachlässigt werden. Wenn keine Umweltauswirkungen bekannt sind, kann die 1 %-Regel auf die eingesetzten Materialmengen bezogen werden.

In dieser Studie kommt die Regel bei den berücksichtigten Materialien zum Tragen. In den Fahrzeugen wird beispielsweise eine Vielzahl von Stoffen verarbeitet, von denen aber ein Großteil sehr geringe Mengen aufweist. Diese Materialien werden im Rahmen der Bilanz nicht berücksichtigt. Es wird an den entsprechenden Stellen bei der Ermittlung der Materialmengen auf diesen Sachverhalt hingewiesen.

2.2 Systemgrenzen

Upstream-Prozesse im Fokus der Analysen

Die vorliegende Studie berechnet ausschließlich die THG-Emissionen, die durch

- den Bau und Unterhalt (Instandhaltung) der Infrastruktur,
- den Betrieb der Infrastruktur und
- die Herstellung und den Unterhalt der Fahrzeuge

entstehen. Damit fokussiert die Studie also auf alle Upstream-Prozesse, die bisher bei Umweltanalysen des Verkehrs unberücksichtigt blieben. Die THG-Emissionen des Betriebs werden in dieser Studie nicht explizit ermittelt, sondern aus dem Verkehrsemissionsmodell TREMOD 5.25 übernommen. Die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen des Betriebs der Binnenschifffahrt werden davon abweichend auf Basis der Energieverbrauchswerte der Binnenschiffe aus Knörr et al. [2011] errechnet.

Der Bau und der Unterhalt bzw. die Instandhaltung der Infrastruktur werden im Rahmen dieses Gutachtens gemeinsam betrachtet, während bei den PCR for Railways die Instandhaltung zusammen mit dem Betrieb der Infrastruktur behandelt wird. Dies hat den Grund, dass zwei Arten von Instandhaltungsmaßnahmen zu unterscheiden sind. Zum einen handelt es sich um betriebliche Instandhaltungsmaßnahmen im engeren Sinne, wie den Ersatz von zerstörten oder abgenutzten Materialien. Zum anderen wird aber auch oftmals unter Instandhaltungsmaßnahmen der Ersatz von Infrastruktur verbucht, deren Lebensdauer überschritten ist. So werden zum Beispiel die Deckschichten der Straßen, je nach Ausführung, meist nach 20 bzw. 30 Jahren vollständig erneuert. Dieser Ersatz ist

aber bereits darüber berücksichtigt, dass für alle verbauten Materialien eine Lebensdauer unterstellt wird, über die der „ökologische Rucksack“ der Produktion „abgeschrieben“ wird (siehe unten). Die damit verbundenen Umweltauswirkungen werden daher unter der Rubrik „Bau der Infrastruktur“ und damit als „Errichtungsaufwand“ schon ermittelt und dürfen nicht nochmals bei den Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden, da es sonst zu Doppelzählungen kommen würde. Um diese Doppelzählungen zu vermeiden und die Zusammenhänge klarer aufzuzeigen, werden in dieser Studie Bau und Unterhalt gemeinsam behandelt.

Neben dem Errichtungsaufwand des Bestandnetzes und den jährlichen Instandhaltungsmaßnahmen im engeren Sinne stellt sich die Frage nach der Berücksichtigung des Neubaus von Infrastruktur. Grundsätzlich handelt es sich bei der vorliegenden Studie um eine Bestandsaufnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt (zum Bezugsjahr 2008). Damit sind alle Neubauvorhaben, die bis zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen wurden, über die Ermittlung der jährlichen Errichtungsaufwände bereits berücksichtigt. Würde es aktuell zu starken Änderungen des Bestandnetzes durch Ausbauvorhaben oder Stilllegungen kommen, würde diese Vorgehensweise zu Über- oder Unterschätzungen der realen THG-Emissionen führen, da die Zeitpunkte der realen Inbetriebnahme der einzelnen Infrastrukturen unberücksichtigt bleiben.

2.3 Allokation

Funktionale Einheit

Die THG-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge werden in dieser Studie für den Personenverkehr auf die Einheit Personenkilometer (Pkm) und für den Güterverkehr auf die Größe Tonnenkilometer (tkm) bezogen.

Bau und Unterhalt der Infrastruktur

Die Allokation der THG-Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur lehnt sich in der vorliegenden Studie für den Schienen- und Straßenverkehr sowie die Binnenschifffahrt an die PCR for Railways [2009a] an.

1. Die berechneten Emissionen durch den Bau der gesamten Infrastruktur werden durch die Lebensdauer geteilt.
2. Zu den so ermittelten baubedingten jährlichen Emissionen werden ggf. die durchschnittlich pro Jahr durch Wartungen entstehenden Emissionen addiert.
3. Die Aufteilung auf die Verkehrsarten erfolgt dann über die Brutto-Tonnenkilometer. Entsprechend dem Quotienten aus Brutto-Tonnenkilometer des Güterverkehrs und der Gesamtsumme der Brutto-Tonnenkilometer ergibt sich der Anteil der THG-Emissionen, der dem Güterverkehr zuzurechnen ist. Entsprechend wird auch für den Personenverkehr vorgegangen.

4. Die so ermittelten THG-Emissionen werden dann durch die jährlichen Verkehrsleistungen (Pkm oder tkm) der drei Verkehrsarten geteilt; so also zum Beispiel die Emissionen, die auf die Fracht entfallen, durch die (Netto-)tkm des Güterverkehrs. Ergebnis sind THG-Emissionen pro tkm bzw. Pkm, differenziert nach den Verkehrsarten.

Der dritte Schritt, also die Allokation der Gesamtemissionen auf die verschiedenen Verkehrsarten (z. B. Fracht und Personenverkehr) soll für die verschiedenen Verkehrsträger nochmals beleuchtet werden, da an dieser Stelle einerseits Unterschiede zwischen den Verkehrsmitteln bestehen und damit teilweise von dem in PCR for Railways [PCR 2009] beschriebenen Vorgehen abgewichen wird und es sich andererseits um einen wesentlichen Aspekt handelt, bei dem sich teilweise das Vorgehen von anderen in Kapitel 7.2 vorgestellten Studien unterscheidet.

Beim **Straßenverkehr** erfolgt die Allokation wie oben beschrieben. Der Allokationsschlüssel wird dabei entsprechend den im TREMOD-Modell enthaltenen Fahrzeugkategorien angewendet. Dafür wurden aus den Verkehrs- und Fahrleistungszahlen aus TREMOD 5.25 (Tabelle 94) und Annahmen zu den Fahrzeuggewichten (siehe Tabelle 95) die Brutto-tkm errechnet (Tabelle 96). Entsprechend wird auch für den Personenverkehr vorgegangen.

Das Vorgehen beim **Schienenverkehr** wird ausführlich in Schmied/Mottschall [2013] beschrieben und basiert auf einem Datensatz der DB zur Zugbelegung und der sich daraus ergebenden Verkehrsleistung in Deutschland. Die Besonderheit liegt darin begründet, dass nicht wie im TREMOD-Modell Durchschnittswerte verwendet werden, sondern eine Allokation auf jedem einzelnen Streckenabschnitt durchgeführt wird.

Bei der **Binnenschifffahrt** ist keine Allokation notwendig, da hier ausschließlich der Güterverkehr betrachtet wird.

Abweichend von den anderen Verkehrsmitteln erfolgt die Allokation für den Bereich **Luftverkehr** in der vorliegenden Studie nicht auf Basis der Brutto-tkm. Dieses Vorgehen wäre ungeeignet, da dann Langstreckenflüge einen überproportionalen Anteil an den Gesamtemissionen tragen würden, da die Infrastruktur (und damit Emissionen) nur an Start- und Landepunkt existiert. Eine weitere denkbare Möglichkeit, die Emissionen durch Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur (Flughäfen) zu allokalieren, wäre die Anzahl der Flugbewegungen. Da auf den kürzeren Flügen jedoch tendenziell kleinere Flugzeuge als auf Langstrecken eingesetzt werden, würde auch dieses Vorgehen zu einer Diskriminierung führen. In diesem Fall würde den Kurzstrecken ein zu hoher Anteil an den Gesamtemissionen zugerechnet. Zudem ist die Trennung zwischen Passage (Passagiertransport) und Fracht beim Luftverkehr nicht so abgegrenzt wie beim Straßen- oder Schienenverkehr, da auch in Passagiermaschinen Fracht als Beifracht (Belly-Fracht)

transportiert wird. Aus diesen Gründen wird in der vorliegende Studie für den Bereich des Luftverkehrs ein Allokationsverfahren auf Basis der Verkehrseinheiten⁴ gewählt. Somit bleibt die Flugstrecke unberücksichtigt und Flugzeuge mit einer größeren Anzahl an Passagieren oder Fracht werden größere Mengen der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen zugerechnet. Dieses Vorgehen unterscheidet jedoch nicht zwischen Fracht und Passagieren, auch wenn für die Abwicklung des Flugbetriebs in der Praxis unterschiedliche Gebäude und Flächen benötigt werden.

Betrieb der Infrastruktur

Die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Infrastruktur wurden über Jahresenergieverbrauchswerte der einzelnen Module berechnet. Eine Allokation auf Personen- und Güterverkehr wird für den Straßenverkehr und dann entsprechend der für den Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur vorgestellten Methodik auf Basis der Brutto-tkm durchgeführt. Die Allokation für den Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur erfolgt ebenso wie oben beschrieben anhand der Verkehrseinheiten. Für den Bereich des Schienenverkehrs war es nicht notwendig, die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen auf Personen- und Güterverkehr zu allokieren, da die Energieverbräuche dem Öko-Institut von der Deutschen Bahn AG für diesen Bereich bereits auf die verschiedenen Verkehrsarten aufgeteilt zur Verfügung gestellt wurden. Hinsichtlich der Binnenschifffahrt wird lediglich der Güterverkehr betrachtet, weshalb eine Allokation in diesem Bereich nicht durchgeführt wurde.

Herstellung und Wartung der Fahrzeuge

Die Allokation der THG-Emissionen für Bau und Wartung der Fahrzeuge, Flugzeuge, Binnenschiffe und des rollenden Materials im Schienenverkehr (im Weiteren als Fahrzeuge bezeichnet) auf die Verkehrsarten Personen - und Güterverkehr wird wie folgt durchgeführt:

1. Es werden für repräsentative Fahrzeugkategorien spezifisch für den Personen- und Güterverkehr die Emissionen für den Bau sowie für die Wartung während der gesamten Lebensdauer berechnet. Damit ist eine Aufteilung auf die Verkehrsarten nicht mehr nötig, da die Emissionen bereits auf Basis einer für die jeweilige Verkehrsart typischen Fahrzeugkategorie berechnet wurden.
2. Die so pro Fahrzeug ermittelten Emissionen durch die Herstellung und Wartung werden dann durch die Lebensdauer der Fahrzeuge geteilt.
3. Im letzten Schritt werden die jährlichen Emissionen durch die jährliche Fahrleistung und durch die durchschnittliche Fahrgastzahl bzw. Ladungszahl

⁴ Eine Verkehrseinheit (VE) entspricht einem abgefertigtem Passagier bzw. 100 kg Fracht.

des Durchschnittsfahrzeuges geteilt. Ergebnis sind THG-Emissionen pro Pkm bzw. tkm, differenziert nach den Verkehrsarten.

Lebensdauern

Die PCR for Railways schreiben vor, dass für die Schieneninfrastruktur eine Lebensdauer von 60 Jahren für die Berechnungen der Umweltauswirkungen zugrunde gelegt werden soll. Dies reflektiert die Tatsache, dass auch viele sozioökonomische Berechnungen (z. B. Berechnung des Brutto- und Netto-Anlagevermögens der Verkehrsinfrastruktur) diese Zeitspanne verwenden. Es ist aber davon auszugehen, dass beispielsweise Brücken oder Tunnel längere Lebensdauern haben und diese Vorgehensweise bei diesen Infrastrukturteilen zu einer Überschätzung der Umweltauswirkung führt. Viele der bisher durchgeführten Studien gehen für diese langlebigen Infrastrukturen von einer Lebensdauer von 100 Jahren aus [Spielmann et al. 2007]. Um die Vergleichbarkeit zur Vorgängerstudie [Schmied/Mottschall 2013] sicherzustellen und der Anlehnung an die PCR for Railways folgend, werden für die langlebige Infrastruktur in der vorliegenden Studie die für die Schieneninfrastruktur festgelegten Lebensdauern veranschlagt. Für diese Studie wird daher im Basisfall ebenfalls mit einer Lebensdauer von 60 Jahren gerechnet, es wird aber auch eine Sensitivitätsrechnung mit einer Lebensdauer von 100 Jahren durchgeführt.

Neben den langlebigen Bestandteilen der Infrastrukturen gibt es auch Bestandteile, die eine kürzere Lebensdauer aufweisen (z. B. Straßendeckschichten, Verkehrszeichen, etc.). Für diese Bestandteile der Infrastruktur werden kürzere Lebensdauern verwendet, da sonst die Umweltwirkungen unterschätzt würden. Die in der vorliegenden Studie veranschlagten Lebensdauern sind in Tabelle 85 im Anhang dokumentiert.

2.4 Datenquellen

Im Folgenden wird ausgeführt, welche Daten für die Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen bezogen auf die vier untersuchten Verkehrsträger grundsätzlich benötigt werden und welche Quellen für die benötigten Daten in dieser Studie verwendet wurden. **Bezugsjahr** der Daten ist dabei das Jahr **2008**. Während Daten zu Verkehrsleistungen sich auf das gesamte Jahr 2008 beziehen, handelt es sich bei der betrachteten Infrastruktur um diejenige, auf der im Jahr 2008 Verkehre abgewickelt werden konnten. Wenn das Bezugsjahr der Daten vom Jahr 2008 abweicht, wird dies dokumentiert.

Infrastruktur

Für die Berechnung der Umweltauswirkungen durch Bau, Wartung und Betrieb der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland werden detaillierte Daten zum Infrastrukturbestand benötigt.

Für die **Straßeninfrastruktur** werden dafür einerseits Daten aus offiziellen statistischen Erhebungen verwendet [z. B. VIZ 2011; Kaschner 2011], z. B. für die Länge des

Straßennetzes und die Anzahl der Ingenieurbauwerke. Daneben wurde eine Internetrecherche und Experteninterviews durchgeführt, um Bestandszahlen zu den Raststätten, Tankstellen usw. zu ermitteln. Zusätzlich wurden anhand von Luftbildern die Flächen der jeweiligen Bereiche abgeschätzt. Die Daten zum Betrieb der Infrastruktur basieren auf Internetrecherchen und sind ausführlich in Kapitel 3.2 beschrieben.

Die Datenquellen für die **Schieneinfrastruktur** sind detailliert in Schmied/Mottschall [2013] beschrieben. Hauptsächlich basieren die Berechnungen auf einem Datensatz der Deutschen Bahn [DB 2009a], aus dem für jeden Streckenabschnitt des DB-Netzes detaillierte Informationen u. a. zur

- Streckenlänge,
- Anzahl der Gleise,
- Schienenart (z. B. UIC 60),
- Schwellenart (z. B. Holz, Beton, Stahl),
- Angaben zur Elektrifizierung,
- Tunnelanzahl und -länge,
- Brückenanzahl und -länge sowie Brückenkategorien (z. B. Talbrücke, Brücke über Straße etc.),
- Anzahl der Bahnhöfe mit entsprechender Bahnhofskategorie (Kat.1-6)

hervorgehen.

Diese Detaildaten standen allerdings nur für das Netz der Deutschen Bahn zur Verfügung, welches etwa 87 % des Gesamtnetzes darstellt. Bei den restlichen Streckenabschnitten handelt es sich um von anderen öffentlichen Eisenbahninfrastrukturunternehmen betriebene Strecken (11 %) und um nichtöffentliche Eisenbahnnetze (2 %). Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse des DB-Netzes auf das Gesamtnetz übertragen. Dabei flossen Daten von der Bundesnetzagentur [Bundesnetzagentur 2010] und aus der VDV-Statistik [VDV 2009] ein. Die Daten zum Energieverbrauch der Infrastruktur wurden aufgeteilt auf die Verkehrsarten von der Deutschen Bahn AG zur Verfügung gestellt [DB 2009b].

Die Daten zum Bestand der Infrastruktur der **Binnenschifffahrt** stammen hauptsächlich von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes [WSV 2011]. Dazu zählen bspw. die Länge der verschiedenen Wasserstraßen und die Anzahl der Bauwerke wie z. B. der Schleusen. Darüber hinaus wurden auch Bestandszahlen aus dem Verbundprojekt MaRes verwendet [Steger et al. 2012]. Für den Betrieb der Infrastruktur werden Daten vom BMVBS zur Nassbaggerei [BMVBS 2004] und aus den „Ökoinventaren Transporte“ [Maibach et al. 1995] zum Kanalbetrieb verwendet.

Hinsichtlich der **Infrastruktur des Luftverkehrs** wurde mit dem Auftraggeber vereinbart, lediglich die in der Verkehrsstatistik enthaltenen Flughäfen zu betrachten. Datenquellen

zu den verschiedenen Flächen sind einerseits Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsberichte der Flughafenbetreiber [FFG 2009, FHG 2011, FHLG 2010, FMG 2009, FMOG 2010, Fraport 2011, FSG 2010], Internetrecherchen (Flächen der Start- und Landebahnen) sowie eigener Abschätzungen anhand von Luftbildern. Die Daten zum Energieverbrauch (u. a. Strom, Wärme, Kraftstoffe) sind ebenfalls den Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsberichten entnommen.

Materialmengen

Der Aufbau der **Infrastruktur** (bspw. die Stärke der verschiedenen Schichten des Straßenoberbaus) und den sich daraus ergebenden Materialmengen wurde in der vorliegenden Studie Lehrbüchern entnommen [z. B. Natzschka 2011; De Neufville und Odoni 2003; Eisenmann/Leykauf 2003; Kohler 2002]. Weiterhin wurden Vorschriften zu Bauweisen wie beispielsweise von der BAST [2010] herangezogen oder die Materialmengen einzelner Baubeschreibungen verwendet. Um fundierte Annahmen treffen zu können, wurden im Falle von Datenlücken Internetrecherchen und Telefoninterviews durchgeführt. Spezifische Beschreibungen zu den jeweils verwendeten Daten befinden sich in den Kapiteln 3-6. Annahmen zu den Transporten im Zusammenhang mit den Materialmengen durch Bau und Wartung der Infrastruktur werden aus Schmied/Mottschall [2013] übernommen und sind ebenfalls in den entsprechenden Kapiteln dokumentiert.

Bezüglich Materialzusammensetzung der **Fahrzeuge** wird in der vorliegenden Studie auf Ergebnissen des Projektes Renewbility [Knörr/Kutzner 2009] aufgebaut. Bei den Flugzeugen und Schienenfahrzeugen werden diese um Ergebnisse von verschiedenen Öko-Bilanzen ergänzt [Lopes 2010; Köser et al. 2002; Bombardier 2003].

Verkehrsleistung

Bei den Kennzahlen zu der Verkehrsleistung auf der jeweiligen Infrastruktur, die in die Berechnungen der vorliegenden Studie eingeflossen sind, handelt es sich im Wesentlichen um die in TREMOD 5.25 enthaltenen Werte.

Für den **Straßenverkehr** liegen diese Verkehrsleistungszahlen differenziert nach den verschiedenen Straßentypen (Autobahn, Bundesstraßen, Landesstraße, Kreisstraße, Gemeindestraßen und Innerortsstraße) und Fahrzeugkategorien (div. leichte Nutzfahrzeuge, div. Pkw; Busse; div. Lkw) vor. Diese Zahlen werden einerseits zur Berechnung der spezifischen Emissionen für den Fahrbetrieb in g/Pkm bzw. g/tkm herangezogen und andererseits zur Berechnung eines Allokationsschlüssels herangezogen.

Für den **Schienenverkehr** wird wie ausführlich in Schmied/Mottschall [2013] beschrieben vorgegangen. Die Verkehrsleistung basiert im Wesentlichen auf einem Datensatz der DB, aus dem die Zugbelegung sowie die Verkehrsleistung für jeden Streckenabschnitt des Streckennetzes der DB hervorgehen [DB 2009a]. Rund 11 % des deutschen Streckennetzes wurden jedoch von anderen öffentlichen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU)

betrieben und von NE-Bahnen genutzt (Stand Ende 2007). Für dieses Netz wurden Daten zur Verkehrsleistung des Personen- und Güterverkehrs von der Bundesnetzagentur zur Verfügung gestellt [Bundesnetzagentur 2010].

Die Berechnungen für den Bereich der **Binnenschifffahrt** basieren vollständig auf TREMOD 5.25.

Auch beim **Luftverkehr** wurde auf die in TREMOD enthaltene Verkehrsleistung für Passage und Fracht zurückgegriffen. Diese liegen differenziert nach nationalen und grenzüberschreitenden Flügen für verschiedene Entfernungskategorien vor (≤ 500 km; 500-1.000 km; 1.000-2.000 km; 2.000-5.000 km; 5.000-10.000 km und >10.000 km). Aufgrund des abweichenden Allokationsverfahrens wurde zusätzlich zu diesen Daten eine Zusammenstellung des Statistischen Bundesamt verwendet, aus der die Anzahl der Passagiere und die Menge der Fracht und Post nach Zielflughafen für jeden der ausgewählten 26 Verkehrsflughäfen hervorging [Walter 2012].

Emissionsfaktoren

Spezifische Emissionsfaktoren für die CO₂- und THG-Emissionen bei der Herstellung von **Materialien** wie Stahl, Beton, Schotter etc. werden durchgängig für dieses Gutachten der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent Version 2.1 entnommen (Datenbestand 2009) [ecoinvent 2009]. Diese Daten enthalten alle Prozessschritte von der Gewinnung der Rohmaterialien bis zu deren Verarbeitung. Transportprozesse der Rohmaterialien sind in den Prozessschritten enthalten, jedoch nicht die Transporte vom Werk oder Regionallager bis zum Endkunden. Die spezifischen CO₂- und THG-Emissionen werden in der Regel in der Einheit "kg Emissionen pro kg eingesetztes Material" angegeben. In einzelnen Fällen können auch die Emissionen auf "m² oder m³ eingesetztes Material" bezogen sein (z. B. Farben, Beton). Die in dieser Studie verwendeten materialbezogenen CO₂- und THG-Emissionsfaktoren sind in Tabelle 86 im Anhang aufgeführt. In der Regel handelt es sich dabei um durchschnittliche Produktionsmische in Europa, die in Teilen Recyclingmaterialien enthalten. Für einige wichtige Materialien (z. B. Stahl, Kupfer) sind zusätzlich Daten für die Primär- und Sekundärgewinnung aufgeführt, so dass nach Datenverfügbarkeit gezielt der Anteil des Recyclingmaterials in die Berechnung eingesetzt werden kann (siehe auch Kapitel 2.1).

Für die **Transporte** wurden für diese Studie spezifische CO₂- und THG-Emissionsfaktoren pro Tonnenkilometer aus dem Verkehrsemissionsmodell TREMOD Version 5.25 entnommen. Bei diesen Werten handelt es sich um Durchschnittswerte für Deutschland, in denen bereits typische Auslastungen der Verkehrsträger unterstellt sind. Diese Werte werden vereinfachend auch zugrunde gelegt, wenn die Transporte außerhalb Deutschlands stattfinden. Die Werte enthalten bereits die indirekten CO₂- und THG-Emissionen, die durch die Gewinnung und Produktion der Kraftstoffe bzw. des Fahrstroms entstehen. In Kontrast zur Vorgängerstudie wird hier eine aktuelle Version von TREMOD verwendet und somit ergeben sich für die Daten aus 2008 genauere Emissionswerte – dies führt im Gros zu einer leichten Absenkung der Emissionen pro Verkehrseinheit. Die

aktuell benutzten Werte und die Veränderungen zu TREMOD 4.17, welches in der Vorgängerstudie benutzt wurde, sind im Anhang in Tabelle 88 zu finden.

Für die Berechnung der CO₂- und THG-Emissionen durch den **Strom- und Wärmeverbrauch** werden für dieses Gutachten hauptsächlich spezifische Emissionsfaktoren aus dem Energie- und Stoffstrommodell Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS Version 4.5) entnommen. Für die Umrechnung wurde für Heizöl eine Dichte von 0,84 kg / l und ein Heizwert von 42,61 MJ / kg angenommen. Die Emissionsfaktoren für Benzin und Diesel wurden in eigenen Berechnungen aus Daten des TREMOD Modells erstellt, die Faktoren für Flüssiggas stammen von Schmied et al. [2011]. Die in dieser Studie verwendeten Emissionsfaktoren sind in Tabelle 89 aufgeführt. Wie bei den Emissionsfaktoren für Materialien und Transporte sind auch hier die Gesamtemissionen ab Förderung und Gewinnung der Energieträger in den ausgewiesenen Emissionsfaktoren enthalten.

Für die Herstellung des Unterbaus sind **Erdarbeiten** notwendig. Zum Ausheben der Erdmassen werden i. d. R. Bagger eingesetzt, zum Verfüllen der Baugruppe oftmals Planerraupen. Die Energieverbräuche dieser Fahrzeuge werden pro Stunde angegeben. Unter der Annahme, dass pro Stunde rund 75 m² Erde durch die Fahrzeuge bewegt werden, kann ein Energieverbrauchswert und damit Werte für die THG-Emissionen pro Kubikmeter Erdmasse ermittelt werden [UIC 2010]. Diese Werte sind in Tabelle 90 enthalten. Quelle dieser Daten ist die Ökobilanzdatenbank [ecoinvent 2009].

3 Straßenverkehr

Im Folgenden werden die Berechnungswege zu den CO₂- und THG-Emissionen für den Bau und Unterhalt (Kapitel 3.1) und den Betrieb der Verkehrsinfrastruktur (Kapitel 3.2), sowie die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge (Kapitel 3.3) detailliert dargelegt. Die Ergebnisse für den Bereich Straßenverkehr sind in Kapitel 3.4 zu finden.

3.1 Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur

Die Bestandsdaten zur Länge des Straßennetzes wurden aus VIZ [2011] für das Bezugsjahr 2008 entnommen. Zu Ungenauigkeiten kann es hierbei bei den Gemeindestraßen kommen, welche seit Anfang der 90er Jahre nicht mehr offiziell über das Statistische Bundesamt erfasst werden. Der letzte Wert für die Länge der deutschen Gemeindestraßen stammt von 2004 über eine Auswertung vom Statistischen Bundesamt des Amtlich Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit einer Auflösung im Verhältnis 1:25000 [Knoll 2010]. Aufgrund des Mangels an konkreten Daten zu den Fahrbahnbreiten und der Anzahl der Spuren für die verschiedenen Straßenkategorien, mussten Annahmen für diese Werte getroffen werden. Durchschnittliche Fahrbahnbreiten der Bundesautobahnen (BAB) und Bundesstraßen basieren auf Daten des Jahres 2005. Hierzu wurden die befestigten Flächen (Fahrbahnen ohne Mittelstreifen, Bankette, Böschungen usw.), welche ebenfalls aus VIZ [2011] entnommen wurden, auf die Länge der jeweiligen Kategorie bezogen. Für die Landes- und Gemeindestraßen wurde die zutreffende Regelbreite nach den Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitt (RAS-Q) verwendet, da die letzte Flächenerfassung im Gegensatz zu den Bundesfernstraßen fast 30 Jahre zurückliegt. Für die zwischen diesen Kategorien liegenden Kreisstraßen wurde der Mittelwert beider angenommen, da es hier keinen konkreten auf die Straßenklasse bezogenen Regelquerschnitt gibt. Tabelle 1 enthält die in der vorliegenden Studie veranschlagten Netzlängen und Fahrbahnbreiten.

Tabelle 1: Straßenlänge und durchschnittliche Breite der deutschen Straßen nach Straßenklassen

Straßenklasse	Netzlänge km	durchschn. Breite m
Autobahnen	12.640	21,8
Bundesstraßen	40.200	8,4
Landesstraßen	86.530	6,5
Kreisstraßen	91.620	6,0
Gemeindestraßen	457.000	5,5

Quellen: [VIZ 2011]; [Knoll 2010]

Die in Tabelle 1 aufgeführten Straßen dienen zwar überwiegend dem Verkehr, dennoch erfüllen sie auch verkehrsfremde Funktionen. Verkehrswege, insbesondere Innerortsstraßen, erfüllen über den verkehrlichen Nutzen hinaus eine Erschließungs- und Kommunikationsfunktion. Auch zu berücksichtigen ist die Vorhaltung von Verkehrswegen nach regional- und sicherheitspolitischen Aspekten. Angelehnt an die Wegekostenrechnung des DIW [Link et al. 2009], werden in der vorliegenden Studie pauschal 6 % der Gesamtaufwendungen für Kreis-, und Gemeindestraßen den verkehrsfremden Funktionen zugeordnet.

Der allgemeine Aufbau eines Straßenkörpers, unabhängig seiner Auslegung, beinhaltet:

- Untergrund,
- Unterbau und
- Oberbau.

Bild 3 zeigt einen beispielhaften Aufbau eines Straßenoberbaus mit Asphaltdeckschicht.

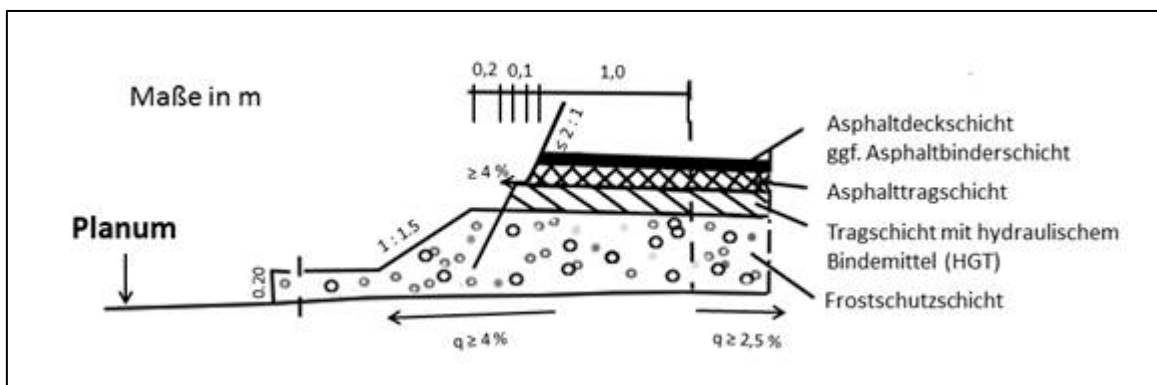


Bild 3: Asphaltbefestigung auf hydraulisch gebundener Tragschicht nach [Natzschka 2011]

Es gibt vielfältige Vorschriften zu den Kornzusammensetzungen – also die Anteile unterschiedlicher Gesteinskörnungen, klassifiziert durch oberen und unteren Äquivalenzdurchmesser – der im Straßenkörper verwendeten Materialien [Natzschka 2011]. Diese unterscheiden sich durch verschiedene Hohlraumanteile und dadurch auch in der Dichte. Diese Differenzen werden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Einerseits gehen die verwendeten Emissionsfaktoren von einem Standardgemisch aus und dessen Veränderungen könnten emissionstechnisch nicht abgebildet werden. Andererseits ist der potentielle Unterschied als eher gering einzuschätzen.

Untergrund

Der Untergrund ist der natürliche Boden oder Fels, auf dem der Straßenkörper aufgebaut ist und bestimmt zugleich einige bautechnische Faktoren. Je nach Bauklasse werden unterschiedliche Anforderungen an das Verformungsmodul (E_{v2} -Wert) gestellt. Wenn

diese Anforderungen nicht erfüllt werden, muss durch Bodenaustausch, -verfestigung oder andere Methoden die Tragfähigkeit verbessert werden.

Für diese Studie relevant ist nur die Bearbeitung, wenn die Anforderungen an das Verformungsmodul nicht getroffen werden. Wie bereits erwähnt, muss dann entweder Bodenaustausch oder -verdichtung stattfinden. Es können auch Geogitter oder Vliese verlegt werden. Da weder Detaildaten noch statistische Erhebungen zu diesen Aufbereitungsarbeiten vorliegen, werden diese in der vorliegenden Studie nicht gesondert betrachtet, da die Aufwendungen in den in Tabelle 7 abgebildeten Energieverbräuchen der ecoinvent Datenbank für den Straßenbau enthalten sind [Spielmann et al. 2007].

Unterbau / Planum

Der Unterbau ist der künstlich erstellte Erdkörper zwischen Oberbau und Untergrund. Es gibt keine vorgeschriebenen Schichtdicken. Er dient hauptsächlich dazu, dass der Straßenkörper die benötigte Höhenlage erreicht und um eine plane Fläche für den Oberbau (das Planum) zu schaffen [Natzschka 2011]. Die Anforderungen an den Unterbau bezogen auf das Verformungsmodul entsprechen denen des Untergrundes.

Jeder Straßenkörper muss weiterhin einen ausreichenden Frostschutz haben. Weiter unten wird genauer beschrieben, wie dieser vorschriftstechnisch umgesetzt ist. Für den Unterbau ist dieser Aspekt relevant, weil bis zu 15 cm des Unterbaus auf die Dicke des frostsicheren Oberbaus angerechnet werden können [Schade 2010]. Da es zu den durchschnittlichen Materialverbräuchen im Unterbau keine Daten gibt, benutzt die vorliegende Studie diesen Wert als Einbaudicke des Unterbaus. Bei der späteren Berechnung der Frostschuttschicht wird dieser Wert nach der gerade genannten Regelung berücksichtigt. Als Material für den Unterbau wird Kies angenommen, obwohl in der Praxis auch mineralische Sekundärrohstoffe wie zum Beispiel Hochofenschlacke verwendet werden. Die für den Bau nötigen Erdarbeiten und Transporte werden in den Energieverbräuchen in Tabelle 7 mit erfasst, werden aber nicht separat ermittelt. In Anlehnung an die PCR [2009] wurde für den Unterbau eine Lebensdauer von 60 Jahren angenommen, wie es für die langlebigen Ingenieurbauten vorgeschrieben wird. Der Bau des Unterbaus führt insgesamt zu 31.000 Tonnen CO₂ bzw. 32.500 Tonnen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Jahr.

Oberbau

Der Oberbau besteht aus mehreren strukturell und funktionell unterschiedlichen Schichten und soll die langlebige Tragfähigkeit der Verkehrsfläche gewährleisten - einerseits durch Aufnahme und Verteilung der Straßenlast, andererseits durch Witterungsbeständigkeit. Abfolge und Dicke der einzelnen Schichten sind durch die RStO 01 (Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, 2001) festgehalten. Im Detail setzt sich der Oberbau zusammen aus Deckschicht, gegebenenfalls einer Bindschicht, gebundener und/oder ungebundener Tragschicht und einer

Frostschuttschicht. Die Schichtdicken variieren stark nach der angesetzten Straßenkategorie. Diese wird über die zu erwartende Belastung der Straße bestimmt. Bild 4 veranschaulicht, wie sich der Straßenoberbau nach RStO 01 für eine bestimmte Asphaltbauweise differenziert nach Straßenkategorien zusammensetzt.

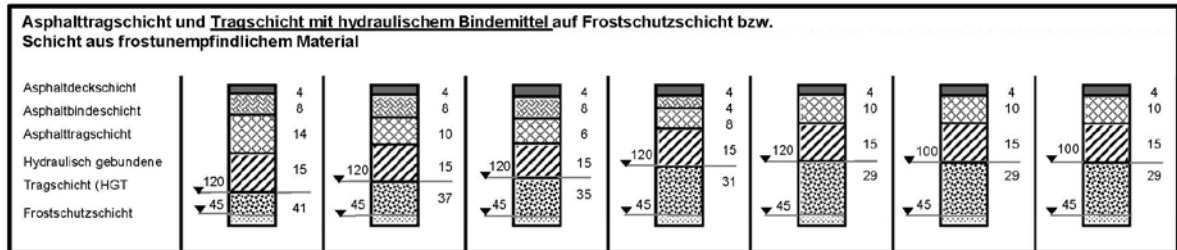


Bild 4: Schichtdicken der verschiedenen Bauklassen einer Asphaltstraße mit hydraulisch gebundener Tragschicht nach RStO 01 nach [Natzschka 2011]

Es gibt insgesamt fünf verschiedene Standardbauweisen für Asphaltstraßen, vier für Straßen mit Betondecke und drei für Pflasterstraßen [Natzschka 2011]. Die sechs verschiedenen Bauklassen wurden entsprechend Tabelle 2 den fünf untersuchten Straßenkategorien zugeordnet.

Tabelle 2: Zuordnung der Bauklassen zu den Straßenkategorien

Straßenkategorie	Zugeordnete Bauklasse
Autobahn	SV / I
Bundesstraße	I / II
Landesstraße	II / III
Kreisstraße	III / IV
Gemeindestraße	IV / V

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Nachfolgend werden die verschiedenen Schichten des Oberbaus separat untersucht. Die Betrachtung erfolgt aus Querschnittsicht von unten nach oben.

Frostschuttschicht

Als Frostschuttschicht werden ungebundene Tragschichten bezeichnet, welche zur Vermeidung von Frostschäden am Oberbau vorhanden sind. Dazu werden frostunempfindliche Materialstoffgemische verwendet, die im verdichteten Zustand noch wasserdurchlässig sind. Verwendet werden dabei Sande, Kiese oder gebrochene Körnungen. Auch regionale, gebrochene Stücke aus Naturgestein, Hochofen- und Metallhüttenstück oder Recyclingmaterial können zugemischt werden. Hierbei darf das Feinkorn ($D < 0,063\text{mm}$) einen Massenanteil von 5% nicht überschreiten [Natzschka 2011].

Auf Böden der Frostempfindlichkeitsklasse II und III muss eine in der ZTVE-StB (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau) angeordnete Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus erreicht werden, welche in Tabelle 3 dargestellt sind. Diese Mindestdicke bezieht sich auf den gesamten Oberbau und kann durch mehrere Faktoren beeinflusst werden. Die örtlichen Faktoren spielen hierbei die größte Rolle.

Tabelle 3: Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus nach ZTVE-StB [Natzschka 2011]

Frostempfindlichkeits- klasse nach ZTVE-StB	Dicke in cm bei Bauklasse		
	SV / I / II	III / IV	V / VI
F2	55	50	40
F3	65	62	52

Quelle: [Natzschka 2011]

In Tabelle 92 im Anhang findet sich eine Auflistung über Faktoren, welche eine Mehr- oder Minderdicke indizieren. Die Regionen der Frosteinwirkungszonen in Deutschland sind im Anhang in Bild 41 abgebildet. Ausgehend davon wird durchschnittlich ein Mehrdickenbedarf des frostsicheren Oberbaus von 10 cm in Deutschland angenommen. Die anderen örtlichen Faktoren sind in einer orientierenden Stoffstrombilanz nur schwer zu berücksichtigen, daher wird generell davon ausgegangen, dass diese sich im deutschen Mittel ausgleichen.

Als Baumaterial für die Frostschutzschicht wird Kies veranschlagt. Dies ist aufgrund des geringen Einflusses auf das Endergebnis vertretbar. Die geforderte Mindestdicke wird mit der schon vorhandenen Schichtdicke und den zusätzlichen 10 cm durch die Frosteinwirkungszonen verrechnet. Auf diese Weise werden die durchschnittlichen zusätzlich zu bauenden Frostschutzschichten für die verschiedenen Straßenkategorien bestimmt (Tabelle 4). Um die Materialmengen berechnen zu können, fehlt die Verteilung der Frostempfindlichkeiten der Böden in Deutschland. Hierzu waren keine Daten bekannt und es wurde von einer Gleichverteilung ausgegangen.

Tabelle 4: Dicke der zusätzlichen Frostschutzschicht in Abhängigkeit von Frostempfindlichkeitsklasse und Straßenkategorie

Frostempfindlichkeits- klasse nach ZTVE-StB	Dicke in cm bei Bauklasse		
	SV/I/II	III/IV	V/VI
F2	10	15	10
F3	20	27	22

Quelle: eigene Berechnungen

Tragschichten ohne Bindemittel

Tragschichten im Allgemeinen dienen dazu, die auf die Fahrbahn wirkenden Kräfte in den Untergrund zu verteilen, um punktuelle Spannungsbelastungen gering zu halten. Zu den ungebundenen Tragschichten gehören sowohl Kies als auch Schottertragschichten. Ohne ein Bindemittel erfolgt die Übertragung der Kräfte nur durch Abstützung und Reibung zwischen den Körnern. Daher ist eine enge Lagerung erforderlich. Um diesem Umstand gerecht zu werden, gibt es Spezifikationen für die Korngrößenverteilung und das geforderte Verformungsmodul in Abhängigkeit zum erwarteten Belastungsgrad und der Schichtdicke. Dies wird, wie bereits weiter oben beschrieben, in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Die Materialmengen werden für Schotter mit 1.775 kg/m^2 und Kies mit 1.900 kg/m^2 Einbaugewicht berechnet (siehe Tabelle 87), dies entspricht 17,75 bzw. 19 kg pro cm Schichtdicke und Quadratmeter.

Verfestigungen und Tragschichten mit Bindemitteln

Als gebundene Tragschicht gibt es Tragschichten aus Asphalt, Beton und hydraulisch gebundene Tragschichten. Zusätzlich gibt es die reine Verfestigung einer Tragschicht durch Vermischung des Bodens mit einem hydraulischen Bindemittel.

Hierfür bietet Natzschka [2011] Richtwerte für die Zumischung von Zement zwischen 80 kg/m^2 und 240 kg/m^2 abhängig von der Bodenart. Für verfestigte Tragschichten benutzt diese Studie daher den Mittelwert von $160 \text{ kg Zement/m}^2$. Die Verfestigung wird im Straßenbau gelegentlich auch für den Unterbau einer Straße verwendet, falls dies nötig ist, um die Tragfähigkeit zu gewährleisten. Da es aber keine Mengenangaben oder Durchschnittswerte dafür gibt, bleibt dies im Weiteren unberücksichtigt. Generell kann die Verfestigung auch mit anderen hydraulischen Bindemitteln, wie Baukalk oder Flugasche erfolgen, dies wurde in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Die HGT (hydraulisch gebundene Tragschicht) unterscheidet sich von den Verhältnissen der Materialien in der Zusammensetzung von reinem Beton. Zum Teil wird auch hydraulischer Kalk anstatt von Zement als Bindemittel benutzt [Natzschka 2011]. Da es weder Informationen zum Verteilungsgrad der HGTs mit Zement oder Kalk als Bindemittel gab, noch unterschiedliche Emissionsfaktoren für die Unterscheidung zwischen Beton und HGT vorliegen, wird die HGT mit dem Emissionsfaktor und der Dichte von Beton berechnet. Dies führt zu einer leichten Überschätzung der Emissionen für diesen Bereich.

Asphalttragschichten sind mit Straßenbaubitumen gebundene Tragschichten. Als Bindemittel wird Bitumen 70/100 oder 60/70 verwendet. Im Falle des Einbaus mit Asphaltdeckschicht kann auch Bitumen 30/45 angesetzt werden. Auch hier gibt es differenzierte Anforderungen an die Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnungsgemische [Natzschka 2011]. Trotz dieser Detailinformationen verwendet die vorliegende Studie den vorhandenen Emissionsfaktor für Gussasphalt aus ecoinvent

(siehe Tabelle 86), da keine Informationen zum Verbau der unterschiedlichen Sorten vorliegen. Für die Tragschichten wurde eine Lebensdauer von 40 Jahren angenommen. Der Bau der Tragschichten führt jährlich zu Emissionen von 6,3 Millionen Tonnen CO₂ bzw. 6,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten.

Deckschichten

Deckschichten gibt es aus Beton, Asphalt und Pflastersteinen.

Den Verbau von Fahrbahndecken aus Beton im Straßenbau regelt die ZTV Beton-StB, die DIN 18299 und die DIN 18316. Außerdem wird bei den Bauklassen SV und I bis III eine HGT oder eine Verfestigung mit hydraulischem Bindemittel verbaut [Natzschka 2011]. Diesem Punkt wird genüge getan, indem Autobahnen sowie Bundes- und Landesstraßen mit Betondecke nur der Bauart mit HGT zugeteilt wurden. Dübel und Anker, die zum Verbau von Betonfahrbahnen benötigt werden, sind nicht berücksichtigt.

Fahrbahnen mit Asphaltdeckschichten unterscheidet man generell in Guss- und Walzasphalt. Der Unterschied beider liegt in der Konsistenz im erhitzten, auftragsbereiten Zustand. Gussasphalt ist beim Einbau gieß- und streichfähig und bedarf keiner zusätzlichen Verdichtungsarbeit. Walzasphalt wird nach dem Auftragen zusätzlich gewalzt, um die geforderte Lagerungsdichte zu erreichen. Gerade wenn Lärm eine Rolle spielt, wird auch offenporiger Asphalt verwendet, welcher zum Walzasphalt gehört und einen größeren Hohlraumanteil hat. Wie zuvor für HGTs und Asphalttragschichten kann diese Studie nicht zwischen den verschiedenen Asphaltbauarten unterscheiden - einerseits aufgrund von Datenlücken hinsichtlich der Verteilung, andererseits, weil keine zuverlässigen Aussagen zu den Emissionen der verschiedenen Materialien gemacht werden können.

Betonfahrbahnen zeichnen sich gegenüber Asphalt durch höhere Belastbarkeit und daher durch eine längere Lebensdauer aus. In der vorliegenden Studie wird Rosauer [2010]⁵ folgend von einer Lebensdauer von 20 Jahren (Asphaltdeckschicht) bzw. 30 Jahren (Betondeckschicht) veranschlagt.

Pflasterstraßen liegen hauptsächlich als Altbestände vor oder werden als optisches Mittel in Zonen eingesetzt, die kein starkes Verkehrsaufkommen vorweisen, wie dies zum Beispiel in Altstädten der Fall ist. Da diese aus heutiger Sicht ungeeignet für schnelleren Verkehr sind, wird von einem geringen Anteil von 5 % auf Kreis- und 25 % auf Gemeindestraßen ausgegangen [Knoll 2009]. Pflasterdecken für Bundesautobahnen, -fernstraßen sowie für Landesstraßen werden ausgeschlossen.

Es wird von einem Gewicht von 2.200 kg/m² für die Natursteine ausgegangen (Tabelle 87) und mit Vernachlässigung der Fugen ein Einbaugewicht von 22 kg pro cm Schichtdicke und Quadratmeter veranschlagt.

⁵ Nach Haberl, J.; TU Wien aus <http://www.diebauzeitung.at/ppp-beton-statt-asphalt-101921.html> (abgerufen September 2012)

Die letzte bekannte Verteilung von Deckschichten für Bundesautobahnen stammt aus dem Jahr 1989 [Knoll 2009]. Für die anderen Straßenkategorien sind Schichtverteilungen unbekannt. Es wird davon ausgegangen, dass Betonfahrbahnen nur aufgrund ihrer hohen Belastbarkeit häufig auf Autobahnen verbaut werden. Daher wird angenommen, dass der Durchsetzungsgrad in den kleineren Straßenkategorien abnimmt. Tabelle 5 führt die den Berechnungen zu Grunde gelegten Deckschichtenverteilungen auf.

Tabelle 5: Verteilung der Deckschichtarten über die Straßenkategorien

Straßenkategorie	Beton	Gussasphalt	Asphaltbeton	Pflaster
Autobahnen	28%	46%	26%	0%
Bundesstraßen	10%	90%	0%	0%
Landesstraßen	0%	100%	0%	0%
Kreisstraßen	0%	95%	0%	5%
Gemeindestraßen	0%	75%	0%	25%

Quelle: [Knoll 2009], eigene Annahmen

Tabelle 6 fasst die gesamten Materialmengen für den Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur zusammen. Der Unterhalt des Straßenkörpers wird einerseits über die unterschiedlich angesetzten Lebensdauern der Schichten berücksichtigt. Zusätzlich wird pauschal angenommen, dass innerhalb von 10 Jahren 1 % des Ausgangsmaterials der Deckschicht erneuert wird.

Tabelle 6: Materialmengen durch den Bau und Unterhalt des deutschen Straßennetzes pro Jahr

Straßennetz	Deckschicht			Trag- und Bindschicht					Unterbau
	Beton	Asphalt	Naturstein	Beton	Asphalt	Schotter	Kies	Zement	Kies
	1.000 t/a	1.000 t/a	1.000 t/a	1.000 t/a	1.000 t/a	1.000 t/a	1.000 t/a	1.000 t/a	1.000 t/a
Autobahnen	1.590	892	0	1.130	2.478	132	1.496	178	872
Bundesstraßen	658	1.522	0	574	3.616	405	2.186	4	1.071
Landesstraßen	0	2.815	0	502	5.771	750	4.279	7	1.783
Kreisstraßen	0	2.614	182	467	4.191	787	4.772	7	1.743
Gemeindestraßen	0	9.435	4.151	1.684	12.659	4.466	21.612	30	7.967

Der Bau und Unterhalt der Deckschichten verursacht Emissionen in Höhe von 4,7 Millionen Tonnen CO₂ bzw. 5,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente.

Straßenbau

Der Energieaufwand für den Bau und Unterhalt der Straßen wurde nach Spielmann et al. [2007] berechnet. Der Datensatz basiert auf Daten für das Straßennetz der Schweiz. Daher

mussten die schweizerischen Straßenkategorien auf die deutschen umgelegt werden (siehe Tabelle 7). Die Zuordnung wurde wie folgt vorgenommen:

- Motorway – BAB
- 1st class road – Bundesstraße
- 2nd class road – Landesstraße
- 3rd class road – Kreis- und Gemeindestraßen.

Die Aufwendungen wurden so auf das deutsche Straßennetz hochgerechnet und mit Emissionswerten aus Tabelle 88 für den Transport, Tabelle 89 für den Stromverbrauch und Tabelle 90 für den Aushub verrechnet.

Tabelle 7: Aufwendungen zum Bau und Unterhalt eines Meters Straße pro Jahr nach Straßenklassen

	Einheit	BAB	Bundesstraße	Landesstraße	Kreis- und Gemeindestraßen
Strom, Mittelspannung	<i>MJ/(m*a)</i>	98,7	10,6	2,18	2,18
Diesel, in Baumaschine	<i>MJ/(m*a)</i>	192	60	33	23
Aushub Frontladerraupe	<i>m³/(m*a)</i>	2	0,2	0,15	0,1
Transport, Lkw 28t	<i>tkm/(m*a)</i>	16,01	4,57	3,26	2,21

Quelle: [Spielmann et al. 2007]

Brücken

An den Bundesfernstraßen in Deutschland gibt es laut Bundesanstalt für Straßenwesen 38.806 Brücken in 50.326 Teilbauwerken (Stand 31.12.2010). Für diese Brücken hat die Bundesanstalt für Straßenwesen Detailinformationen zur Verfügung gestellt. Die Daten geben Aufschluss über Anzahl, Länge und Breite der Brücken an Bundesfernstraßen und die Verteilung der verschiedenen Bauformen [Kaschner 2011]. Tabelle 8 zeigt die Länge und Fläche dieser Brücken auf.

Tabelle 8: Bestandsdaten zu den Brücken an Bundesfernstraßen

Zuordnung	Teilbauwerke	Länge	Fläche
	Anzahl	m	m ²
in BAB	19.559	933.553	15.935.796
über BAB	6.684	370.275	3.804.916
zugeordnet BAB	401	11.074	95.058
in B-Str.	18.769	556.220	8.051.490
über B-Str.	4.236	180.437	1.736.473
zugeordnet B-Str.	677	12.233	54.294
Summe	50.326	2.063.792	29.678.027

Quelle: [Kaschner 2011]

Die Anteile der verschiedenen Bauformen an der Gesamtfläche ist in Bild 5 dargestellt. Bei rund 87 % der Fläche handelt es sich um Spannbeton und Betonbrücken. Stahl und Stahlverbundbrücken machen jeweils nur rund 6 % der Brückenfläche aus. Holz und Steinbrücken sind an den Bundesfernstraßen vernachlässigbar.

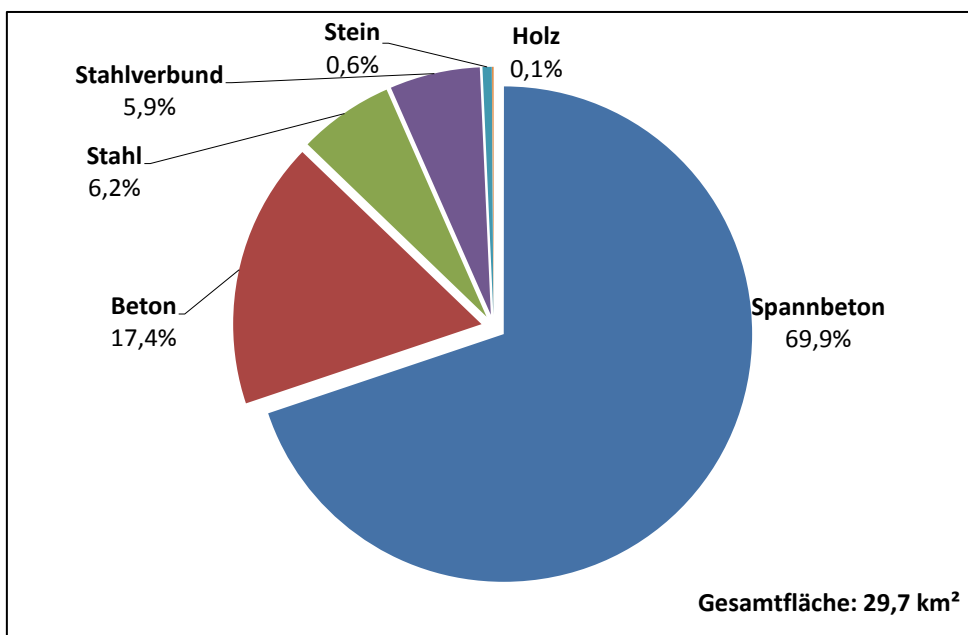


Bild 5: Verteilung der Bauarten von Brücken an Bundesfernstraßen [Kaschner 2011]

Die meisten großen und damit materialintensiven Brücken dürften an den Bundesfernstraßen liegen. Dennoch wird es auch an den Landesstraßen, Kreis und Gemeindestraßen Brückenbauwerke geben. Die Gesamtzahl der Straßenbrücken in Deutschland wird auf 120.000 Brücken⁶ geschätzt.

Zur Bestimmung der Materialverbräuche der Brücken wurde eine umfangreiche Recherche durch das Öko-Institut durchgeführt. Dafür wurde die Reihe „Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen“ (Jahrgang 1998-2010) und „Brücken an Bundesfernstraßen“ (Jahrgang 1994-1997) vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung ausgewertet [BMVBS 1994-2010]. Damit lagen dem Öko-Institut Informationen zur Bauweisen, Kennzahlen (Länge und Breite) und Materialdaten von insgesamt 119 Neubauten vor. Tabelle 9 und Tabelle 10 enthalten die Kennzahlen und durchschnittlichen Materialmengen dieser Brücken. Die Materialmengen gehen überwiegend auch differenziert nach Brückenüberbauten und -unterbauten hervor. Der

⁶ <http://www.deutsche-bruecken.de/ausstellung/index.html>

Anteil des Betons, der in den Überbauten der Brücken verbaut wurde, beträgt im Durchschnitt rund 42 %. Der Großteil des Betons wird im Unterbau, Gründung, Widerlager usw. verbaut. Beim verbauten Stahl wird mit durchschnittlich rund 70 % der größere Anteil im Brückenüberbau eingesetzt.

Tabelle 9: Kennzahlen zu ausgewählten Brücken an den Bundesfernstraßen

Bauweise	Ausgewertete Brücken	Durchschnittl. Länge	Durchschnittl. Breite	Durchschnittl. Fläche
	Anzahl	m	m	m ²
Spannbetonbrücke	63	487	22,9	11.140
Stahlbetonbrücke	20	175	20,7	3.618
Stahlbrücke	4	86	18,8	1.619
Verbundbrücke	32	368	21,3	7.840
Gesamtbestand		2.063.792	14,4	29.678.027

Quellen: [BMVBS 1994 -2010]; [Kaschner 2011]; eigene Berechnungen

Tabelle 10: Durchschnittliche Materialmengen ausgewählter Brücken an den Bundesfernstraßen

Bauweise	Baustahl	Spannstahl	Betonstahl	Beton
	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	m ³ /m ²
Spannbetonbrücke	75,5	34,2	151,5	1,3
Stahlbetonbrücke	62,5		202,3	1,5
Stahlbrücke	355,3		32,9	0,5
Verbundbrücke	250,1		144,1	0,9

Quellen: [BMVBS 1994 -2010]; eigene Berechnungen

Da die ausgewerteten Brückenbauwerke im Durchschnitt deutlich breiter sind als der Durchschnitt der Brücken im Bestand (21 m ggü. 14,4 m), wurde zur Hochrechnung auf die gesamten Brücken der Bundesverkehrsstraßen die Materialmenge pro m² Brückenfläche verwendet (siehe Tabelle 10). Würde stattdessen die Länge verwendet, ergäben sich um rund 50 % höhere Materialmengen und damit THG-Emissionen. Die in Tabelle 10 aufgeführten Materialmengen wurden den Berechnungen für den Bau der Brücken zugrunde gelegt. Für den Unterhalt lagen keine weiteren Daten vor, so dass dieser nicht über die durch die Herstellung anfallenden, aufs Jahr bezogenen Mengen hinaus berücksichtigt wurde.

Neben den Materialmengen fließen der Dieserverbrauch für den Bau sowie der Abraum in die Berechnungen ein. Da für die Baustellenenergie keinerlei Verbrauchswerte vorlagen, wurde auf die in Köser et al. [2002] aufgeführten Dieserverbräuche für den Bau der Eisenbahnbrücken zurückgegriffen. Bezogen auf die Brückenfläche ergibt sich ein Verbrauch von 0,97 l/m².

Lünser [1999] zufolge ergibt sich durch den Brückenbau eine Menge von 126 bis 642 kg Abraum pro m² Brückenfläche. Dem konservativen Ansatz der Studie folgend wurde letztgenannter Wert verwendet. Bezogen auf die Durchschnittsbreite müssen demnach rund 9,2 Tonnen Material pro m Brücke abtransportiert werden. In der vorliegenden Studie wurde unterstellt, dass das Material über eine Distanz von 5 km mit einem Last-/Sattelzug (>34-40t) transportiert wird. Für den Beton wurde eine entsprechend dem Vorgehen in Schmied/Mottschall [2013] eine Transportentfernung von 20 km (Solo LKW > 26t) und für den Stahl von 300 km (Bahn) unterstellt.

Dieser detaillierte Bilanzierungsansatz war für die Brücken an den Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen nicht möglich, da keine genauen Kennzahlen zum Bestand vorlagen und ebenfalls keine genauen Materialmengen bekannt sind.

Um die verbleibenden rund 80.000 Brücken dennoch zumindest orientierend berücksichtigen zu können, wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber vereinfachend angenommen, dass der Aufwand für die Materialien, Materialtransporte und Baustellenenergie für die sonstigen Brücken rund 40 % einer durchschnittlichen Brücke der Bundesfernstraßen beträgt. Dies soll neben einer geringeren Breite berücksichtigen, dass diese Brücken vermutlich kürzer als die Brücken an den Bundesfernstraßen (durchschnittlich 53 m) ausfallen.

Die jährlichen Materialmengen ergeben sich durch die Division durch die angenommene, an die PCR [2009] angelehnte Lebensdauer von 60 Jahren. Insgesamt führt dies zu Emissionen in Höhe von 578.300 Tonnen CO₂ bzw. rund 610.200 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. In einer Sensitivität wird zudem betrachtet, wie sich eine Lebensdauer von 100 Jahren auf die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen auswirken würde. Die Emissionen würden dann 40 % geringer ausfallen.

Tunnel

Im Netz der Bundesfernstraßen in Deutschland gibt es 244 Tunnel mit einer Gesamtlänge von rund 242 km. Bezogen auf die Länge liegen 61 % davon an den BAB [Kaschner 2011]. Unklar ist, ob es sich um Tunnel mit einer oder zwei Röhren handelt.

Analog zu den Brücken wurde die Reihe „Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen“ (Jahrgang 1998-2010) und vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung hinsichtlich der verbauten Materialmengen ausgewertet [BMVBS 1994-2010]. Dafür wurden 34 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 53 km ausgewertet. Dies entspricht 22 % der gesamten Tunnelkilometer. 31 km (bzw. 60 %) dieser Tunnel wurden in geschlossener Bauweise errichtet, 40 % in offener Bauweise.

Die Analysen ergeben, dass der Materialverbrauch eines durchschnittlichen Tunnels rund 55 m² Beton und 5,5 Tonnen Stahl pro Tunnelmeter beträgt (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Kennwerte und Materialmengen der durchschnittlichen Tunnel der Bundesfernstraßen in Deutschland nach Anzahl der Röhren

	Stichproben	Länge offene Bauweise	Länge geschlossene Bauweise	Breite	Erd-aushub	Tunnel-ausbruch	Beton	Stahl
	Anzahl	m	m	m	m ³ /m	m ³ /m	t/m	t/m
1-röhrig	15	666	518	14,7	193	49	113	5,6
2-röhrig	14	272	1.716	7,9	89	184	150	7,4
Anzahl unbekannt	5	1.512	0	10,1	292	0	185	8,7
Gesamt	34	628	935	13	120	121	132	5,5

Quelle: [BMVBS 1994 - 2010]; eigene Berechnungen

Diese Werte liegen deutlich über den von Spielmann et al. [2007] genannten Materialverbräuchen pro Tunnelmeter (40 t Beton, 1,35 t Bewehrungsstahl und 0,158 t Stahl niedrig legiert), die auch in Steger et al. [2011] verwendet wurden. Lediglich einer der ausgewerteten Tunnel lag auf einem ähnlich niedrigem Niveau (Grenztunnel Füssen). Neben den verbauten Materialmengen ging aus BMVBS [1997-2010] auch die Menge des Erdaushubs (durchschnittlich 120 m³/m) und des Ausbruchs (durchschnittlich 121 m³/m) hervor. Da keinerlei Informationen zu den Diesel- und Stromverbräuchen für den Tunnelbau vorlagen, wurden diese in Anlehnung an Köser et al. [2002] für die Tunnel der Eisenbahninfrastruktur bilanziert. Da die Materialmengen bei den Straßentunneln größer sind, wurden die Verbrauchswerte in der vorliegenden Studie daran skaliert. Daraus ergeben sich rund 145 l Diesel für Baumaschinen pro Meter und rund 1.450 kWh/m Strom für Tunnelbohrer und Bau pro Meter.

Die Materialtransporte wurden entsprechend der Brücken veranschlagt:

- Beton 20 km mit einem Solo LKW (> 26t) und
- Stahl 300 km mit der Bahn.

Lediglich für den Abraum wurde abweichend eine Distanz von 7,5 km veranschlagt, da Teile des Abraums zurücktransportiert werden müssen. Es wurde angenommen, dass dafür ein Last-/Sattelzug (34-40 t) eingesetzt wird. Diese Annahme ist an Köser et al. [2002] für die Schieneninfrastruktur angelehnt.

Die jährlichen Materialmengen ergeben sich durch die Division durch die angenommene, an die PCR [2009] angelehnte Lebensdauer von 60 Jahren. Insgesamt führt dies zu Emissionen in Höhe von 108.400 Tonnen CO₂ bzw. rund 112.700 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. In einer Sensitivität wird zudem betrachtet, wie sich eine Lebensdauer von 100 Jahren auf die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen auswirken würde. Die Emissionen würden dann 40 % geringer ausfallen.

Straßenausstattung und -beleuchtung

Für die Berechnung der Materialmengen und der Treibhausgas-Emissionen durch den Bau der Straßenausstattung und -beleuchtung wurde eine Recherche zu den Materialmengen und -arten durchgeführt und um Annahmen ergänzt. Berücksichtigt wurden folgende Bereiche:

- Stahlschutzplanken,
- Straßenschilder und Schilderbrücken,
- Leitpfosten,
- Lichtzeichenanlagen und die
- Pfähle der Straßenbeleuchtung.

Detaillierte Daten zum Bestand der einzelnen Komponenten liegen nicht vor. Aus diesem Grund wurden Annahmen zum Bestand getroffen (siehe Tabelle 12). Insgesamt besitzt dieser Bereich deshalb einen stark orientierenden Charakter.

Tabelle 12: Annahmen zum Bestand der Straßenausstattung nach der Straßenkategorie

	Anteil Schutzplanken	Schilderbrücken	Leitpfosten	Verkehrszeichen
	%	pro km	pro km	pro km
Autobahnen	90%	1	20	2
Bundesstraßen	25%	0,2	20	2
Landesstraßen	10%	0	10	5
Kreisstraßen	0%	0	5	5
Gemeindestraßen	0%	0	5	20

Quelle: Annahmen des Öko-Instituts

Hinsichtlich der Materialzusammensetzung und Menge für die einzelnen Bestandteile wurde eine Internet-Recherche durchgeführt (siehe

Tabelle 93 im Anhang).

Unter Berücksichtigung einer veranschlagten Lebensdauer von 20 Jahren ergeben sich die in Tabelle 13 aufgeführten jährlichen Materialmengen für die Straßenausstattung (ohne Straßenbeleuchtung).

Tabelle 13: Jährliche Materialmengen der Straßenausstattung (Schutzplanken, Beschilderung, Leitpfosten, Schilderbrücken, Lichtzeichenanlagen

	Stahl	AlMg2	HD-PE	Aluminium	Polycarbonat
	t/a	t/a	t/a	t/a	t/a
Straßenausstattung	12.249	1.148	868	204	41

Quelle: eigene Berechnungen

Die Straßenbeleuchtung in Deutschland erfolgt mit etwa 9,1 Millionen Straßenleuchten, von denen ein Drittel älter als 30 Jahre ist [Nabu 2009]. Die Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Leuchten erfolgt anhand einer einfachen Abschätzung zur Menge an verbautem Stahl für die Masten, die Leuchtmittel und sonstigen Bestandteile bleiben unberücksichtigt. Wie in Kapitel 3.2 ausführlicher beschrieben, wird die Beleuchtung in der vorliegenden Studie nur zu 20 % dem Verkehr zugeschlagen. Auf eine Sensitivität wurde aufgrund des sehr geringen Einflusses verzichtet. Das Gewicht wird mit 100 kg Stahl pro Mast abgeschätzt. Die Lebensdauer wird mit 50 Jahren veranschlagt [VWEW 2009].

Insgesamt ergeben sich durch den Bau der Straßenausstattung und Beleuchtung CO₂-Emissionen in Höhe von rund 32.000 Tonnen bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 34.700 Tonnen pro Jahr. Die Detailergebnisse sind in Tabelle 110 dokumentiert. Der Unterhalt wurde für diesen Bereich nicht weiter im Detail untersucht.

Rast- und Autohöfe

In Deutschland gab es im Jahr 2008 430 bewirtschaftete und 1.520 unbewirtschaftete Raststätten an den Bundesautobahnen [Verkehrsrundschau 2008]. Zusätzlich werden auf 160 (Stand 2008) Autohöfen rund 18.000 Lkw-Stellplätze bereitgestellt. Für die Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Rast- und Autohöfe werden in Abstimmung mit dem Auftraggeber die asphaltierten Flächen und die Gebäude an den bewirtschafteten Raststätten einbezogen. Nicht in den Bilanzgrenzen werden hingegen die Gebäude an den Autohöfen gesehen.

Die in die Bilanzierung einfließenden Kennwerte zu den entsprechenden Flächen sind in Tabelle 14 aufgeführt. Diese Flächen wurden anhand von Luftbildern in Google Maps abgeschätzt.

Tabelle 14: Flächen der Rast- und Autohöfe

	Asphaltierte/ Betonierte Fläche	Bebaute Fläche (ohne Tankstellen)
	m ²	m ²
Bewirtschaftete Raststätten	26.900	1.300
unbewirtschaftete Raststätten (PWC)	10.000	
Autohöfe	20.600	

Quelle: Abschätzungen des Öko-Instituts

Die Bilanzierung der Gebäude folgt dem vereinfachten in Kapitel 2.1 beschriebenen Ansatz. Für die Flächen wurde angenommen, dass der Aufbau dem der Kreisstraßen mit Asphaltdeckschicht entspricht.

Die Lebensdauer der verschiedenen Deckschichten bei den asphaltierten Flächen entspricht denen im oben beschriebenen Straßenbau (Deckschicht 20 Jahre, Tragschicht 40 Jahre, Unterbau 60 Jahre). Für die Gebäude wurde eine Lebensdauer von 60 Jahren veranschlagt.

In Tabelle 15 sind die sich daraus ergebenden jährlichen Materialmengen zusammengefasst.

Tabelle 15: Menge der Baumaterialien für Bau der Rast- und Autohöfe pro Jahr

	Einheit	Asphalt	Schotter	Kies Oberbau	Kies Unterbau	Zement	Beton	Bewehrungs- stahl
Insgesamt	t/a	387.258	40.042	257.169	95.248	361	45.058	340
davon Flächen	t/a	387.258	40.042	257.169	95.248	361	26.845	
davon Gebäude	t/a						18.213	340

Quelle: eigene Berechnungen

Insgesamt werden rund 81.800 Tonnen CO₂ bzw. rund 88.800 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr durch den Bau der Rast- und Autohöfe verursacht. Die Detailergebnisse für die verschiedenen Fahrzeugkategorien sind in im Anhang (Tabelle 107) aufgeführt, wobei die Allokation auf Basis der Bruttotonnenkilometer erfolgte.

Gebäude

Damit die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur vergleichbar sind mit denen der Schieneninfrastruktur in Schmied/Mottschall [2013], wurden auch für diesen Bereich die Tankstellen und die Werkstätten berücksichtigt, obwohl die Datenlage besonders für letztgenannte schlecht ist und die Energieverbräuche dieser Gebäude nicht in 3.2 betrachtet werden.

In Deutschland gab es im Jahr 2008 379 **Tankstellen** an den Bundesautobahnen und 14.068 Tankstellen an den übrigen Straßen. Die Fläche der Gebäude, Bedachung und betonierten Fläche der Tankstellen wurde anhand von Luftbildern in Google Maps abgeschätzt. Demnach wird bei den Autobahntankstellen eine Gebäudefläche von rund 520 m², eine 570 m² große Überdachung und eine betonierte Fläche von rund 5.600 m² unterstellt. Bei den kleiner ausfallenden übrigen Tankstellen werden für die Gebäude 420 m², für die Überdachung 820 m² und für die betonierte Fläche 2.800 m² veranschlagt. Für die Auswertung der Anzahl und Größe der Tanks wurde dem Öko-Institut vom Mineralölkonzern Total eine Bestandsliste nach Behältergröße für 1.100 Tankstellen zur Verfügung gestellt [Steffens 2012].

Für die Berechnung der Materialmengen wurde für die Gebäude der oben beschriebene vereinfachte Ansatz gewählt. Für das Dach wurde von 100 kg niedrig legiertem Stahl pro m² Dachfläche ausgegangen⁷. Für das Gewicht der unterirdischen Tankanlagen wurde anhand einer Aufstellung zu Volumina und Gewicht der Firma Emtec vorgegangen [Emtec 2012]. Für die betonierte Fläche wurde eine Schichtdicke von 20 cm veranschlagt. Die Lebensdauer der Gebäude wurde mit 60 Jahren, die der unterirdischen Tankanlagen Schmied/Mottschall [2013] folgend mit lediglich 30 Jahren veranschlagt. Die sich daraus ergebenden Materialmengen pro Tankstelle sind in Tabelle 16 aufgeführt. Die Materialtransporte wurden entsprechend dem oben beschriebenen Vorgehen bei den Brücken bilanziert.

Tabelle 16: Materialmengen der Tankstellen und Autobahntankstellen

	Beton	Bewehrungs- stahl	Stahl, niedriglegiert
	t pro Tankstelle	t pro Tankstelle	t pro Tankstelle
Tankstelle	2.541	6	104
davon Gebäude	1.197	6	0
davon Dach			82
davon betonierte Fläche	1.345		0
davon Tanks			22
Tankstelle BAB	4.191	8	78
davon Gebäude	1.500	8	0
davon Dach			57
davon Betonierte Fläche	2.691		0
davon Tanks			22

⁷ Auf <http://www.hannl.com/index.php?id=9> wird für ein 320 m² großes Tankstellendach ein Gewicht von 30 Tonnen genannt.

Quelle: eigene Berechnungen

Insgesamt ergeben sich daraus jährliche Emissionen in Höhe von rund 179.600 Tonnen CO₂ bzw. rund 186.500 Tonnen CO₂-Äquivalente. Diese werden abweichend von der bisherigen Vorgehensweise nicht anhand der Bruttotonnenkilometer allokiert. Als geeignetere Allokationsgröße bietet sich der Energieverbrauch der verschiedenen Fahrzeugkategorien an.

Für die Bilanzierung der Werkstätten stand allein ihre Anzahl zur Verfügung. Unter Verwendung des oben beschriebenen vereinfachten Ansatzes zur Berechnung der Materialverbräuche der Gebäude und einer angenommenen Fläche von 500 m²² pro Werkstatt ergibt sich ein Materialverbrauch von rund 1.440 Tonnen Beton und rund 8 Tonnen Bewehrungsstahl. Bei einer Lebensdauer von 60 Jahren führt dies zu jährlichen CO₂-Emissionen in Höhe von 127.900 Tonnen (130.600 Tonnen CO₂e pro Jahr). Auch hier erscheint die Allokation auf Basis der Bruttotonnenkilometer nicht geeignet. Es ist fraglich, warum ein schwererer Pkw einen größeren Anteil an den Emissionen zugerechnet bekommen sollte. Abweichend vom bisherigen Vorgehen wird für die Werkstätten deshalb anhand der Fahrleistung allokiert, davon ausgehend, dass Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung häufiger gewartet und repariert werden müssen als Fahrzeuge mit einer geringen Fahrleistung.

Die Detailergebnisse sind im Anhang aufgeführt (siehe Tabelle 108 und Tabelle 109).

CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen

Insgesamt führte der Bau und Unterhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 zu CO₂-Emissionen in Höhe von 14,43 Millionen Tonnen. Die THG-Emissionen als CO₂-Äquivalente betragen 15,42 Millionen Tonnen (Bild 6). Den größten Anteil besitzt mit 92 % der Bau und Unterhalt des Straßennetzes (14,25 Millionen Tonnen CO₂e). Überraschend ist dagegen, dass die Ingenieurbauten lediglich mit 4 % (Brücken) und 0,7 % (Tunnel) zu den Gesamtemissionen beitragen. Die Tunnel liegen demnach unter den Abschneidekriterien der PCR. Um eine bessere Vergleichbarkeit mit den anderen Verkehrsmitteln zu gewährleisten, wurden sie dennoch weiter betrachtet.

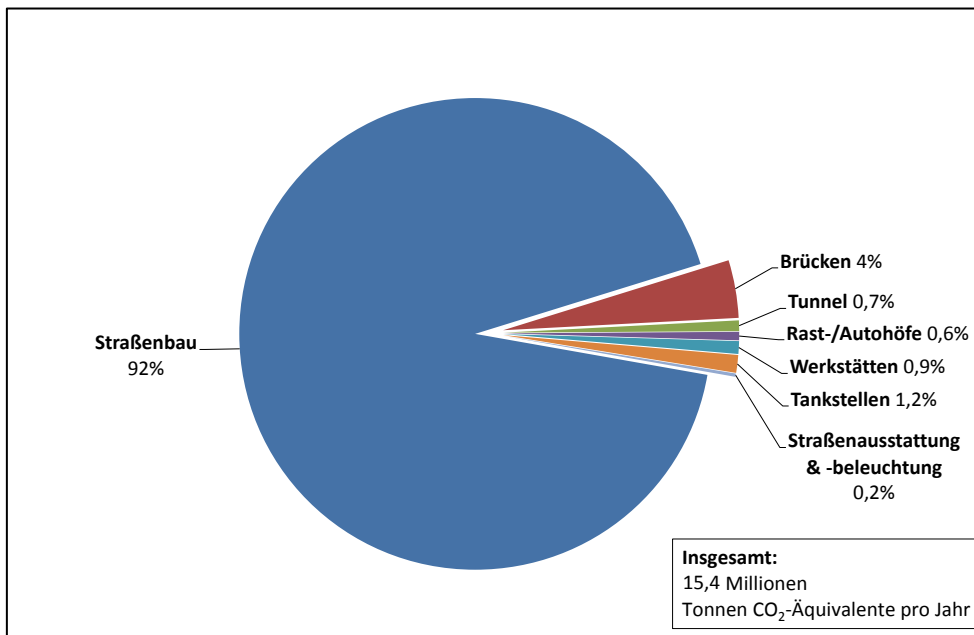


Bild 6: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen]

Bild 7 zeigt den Anteil der Straßenkategorien auf die Gesamtemissionen durch den Bau und Unterhalt des Straßennetzes (insg. Rund 14,3 Mio. Tonnen CO₂e). Aufgrund der großen Länge der Gemeindestrassen verursachen diese mit etwa sieben Millionen Tonnen rund die Hälfte der CO₂-Äquivalent-Emissionen. Auf die Bundesfernstraßen entfallen hingegen lediglich 23 % bzw. 3,3 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent-Emissionen.

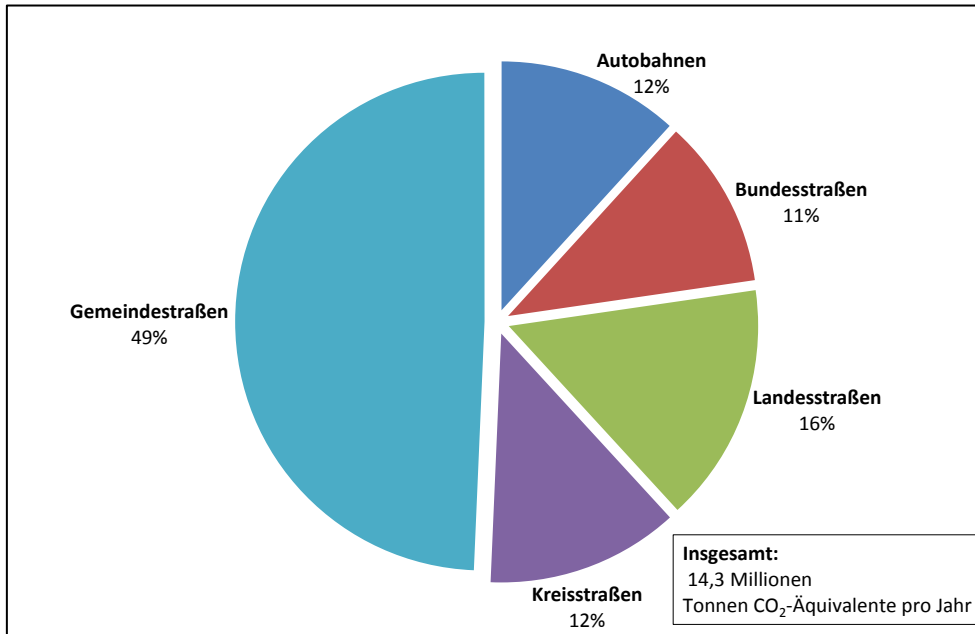


Bild 7: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßen im Jahr 2008 nach Straßenkategorien [eigene Berechnungen]

Dabei entfällt mit zwei Dritteln der größte Anteil der verursachten Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt des Straßennetzes auf den verwendeten Asphalt (9,4 Mio. Tonnen CO₂e). Die Baustellenenergie und die Materialtransporte tragen mit 2,5 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten bzw. 18 % den zweitgrößten Beitrag zu den Treibhausgasemissionen (siehe Bild 7).

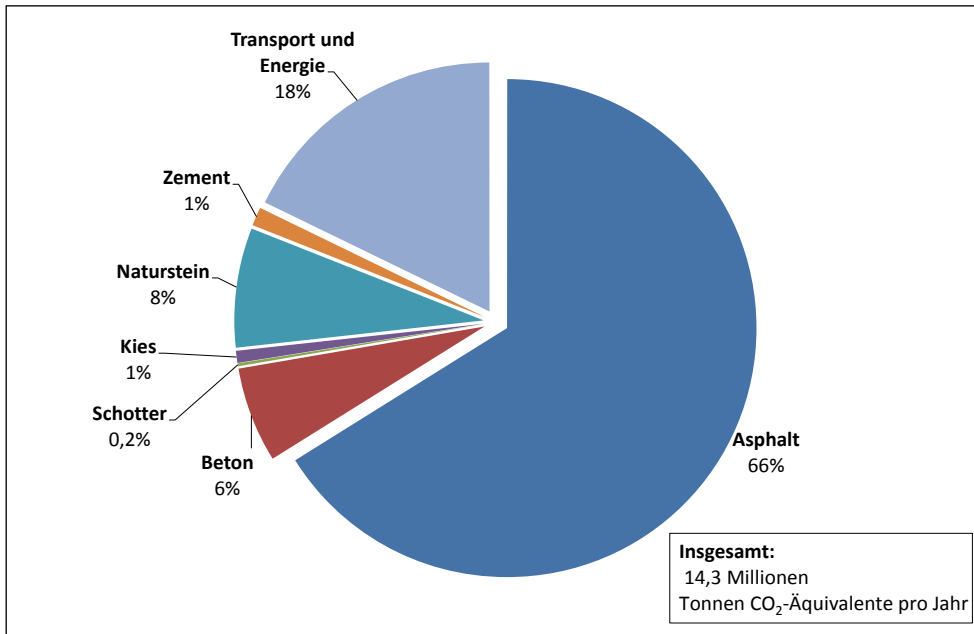


Bild 8: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau/ Unterhalt der Straßen im Jahr 2008 nach Materialien und Transport und Energie [eigene Berechnungen]

Von den durch die verwendeten Baumaterialien verursachten Emissionen, welche insgesamt mit rund 12 Mio. Tonnen pro Jahr zu den Gesamtemissionen beitragen, entfallen rund 58 % auf die Tragschicht und 42 % auf die Deckschicht. Der Beitrag des Unterbaus ist mit rund 32.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr vernachlässigbar.

Die sich daraus ergebenden CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm (Personenverkehr) und tkm (Güterverkehr) der verschiedenen Fahrzeuge sind in Tabelle 17 aufgeführt. Die Treibhausgasemissionen liegen beim Personenverkehr zwischen 5 gCO₂e/Pkm (Reisebus) und 8 gCO₂e/Pkm (Pkw). Beim Güterverkehr ergeben sich je nach Fahrzeugkategorie deutlich größere Unterschiede. Während Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur bei den großen Last- und Sattelzügen mit rund 15 g CO₂-Äquivalente pro tkm zu Buche schlagen, liegen die Emissionen bei den kleinen Solo-Lkws mit einem zGG unter 7,5 Tonnen mit 40 g/tkm fast dreimal so hoch. Die Beiträge der verschiedenen Bereiche in Tabelle 17 können dem Anhang entnommen werden⁸.

⁸ Die Detailergebnisse sind im Anhang in Tabelle 104 bis einschließlich Tabelle 110 aufgeführt.

Tabelle 17: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur im Jahr 2008 nach Fahrzeugkategorie

Fahrzeugkategorie	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/pkm	7,6	8,1
Linienbus	g/pkm	6,5	7,0
Reisebus	g/pkm	4,7	5,0
Solo-Lkw 3,5-7,5 t	g/tkm	37,5	40,1
Solo-Lkw 7,5-12 t	g/tkm	30,0	32,1
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	20,1	21,5
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	19,5	20,9
Last- und Sattelzug 28-34 t	g/tkm	15,2	16,2
Last- und Sattelzug 34-40 t	g/tkm	13,9	14,9
Gesamtemissionen	Mio. t/a	14,4	15,4

Quelle: eigene Berechnungen

3.2 Betrieb der Verkehrsinfrastruktur

Bei der Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur werden im Weiteren die Bereiche

- Betrieb der Straßenbeleuchtung,
- Betrieb der Tunnel,
- Betrieb der Lichtzeichenanlagen,

abgeschätzt.

Da das Fahrzeuggewicht keinen Einfluss auf den Energieverbrauch der Straßeninfrastruktur besitzt, ist die Allokation auf Basis der Brutto-Tonnenkilometer bei den Treibhausgasemissionen der Straßeninfrastruktur ungeeignet. Der Fahrer eines Sattelschleppers zum Beispiel „nutzt“ eine Lichtzeichenanlage genauso wie ein Pkw-Fahrer. Einen besser geeigneten Allokationsschlüssel stellen in diesem Fall die Fahrzeugkilometer dar. Diese werden in diesem Kapitel zur Allokation herangezogen, weshalb die Allokationsmethode von dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Vorgehen abweicht.

Die **Straßenbeleuchtung** in Deutschland erfolgt mit etwa 9,1 Millionen Straßenleuchten, von denen ein Drittel älter als 30 Jahre ist und veraltete ineffiziente Lichttechnologien verwendet. Etwa 35 bis 40 % aller Leuchten werden noch mit ineffizienten Quecksilberdampfhochdrucklampen betrieben [NABU 2009]. Dem NABU (Naturschutzbund Deutschland e.V.) zufolge werden in Deutschland jährlich bis zu 4 Mrd. kWh Strom für die Beleuchtung von Straßen, Plätzen und Brücken verbraucht.

Im Leitfaden „Straßenbeleuchtung – Leitfaden für Planung, Bau und Betrieb“ wird der Stromverbrauch durch die Straßenbeleuchtung auf 0,7 % des Gesamtstromverbrauches in Deutschland beziffert [VWEW 2009]. Im Jahr 2008 betrug der Bruttostromverbrauch in Deutschland laut der AG Energiebilanzen rund 617 TWh⁹. Demnach würde der Verbrauch durch die Straßenbeleuchtung rund 4,3 Mrd. kWh betragen. Dieser Verbrauchswert wird in der vorliegenden Studie unterstellt. Somit ergeben sich CO₂-Emissionen in Höhe von 2,65 Millionen Tonnen bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 2,76 Millionen Tonnen pro Jahr.

Die durch den Betrieb der Straßenbeleuchtung entstehenden CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen können jedoch nicht allein dem Straßenverkehr zugerechnet werden. Gerade für andere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer sind beleuchtete Straßen essenziell. Andererseits wird die Beleuchtung an den Hauptverkehrsstraßen und auf Bundesfernstraßen zu 100 % durch den Straßenverkehr genutzt. Da im Rahmen der vorliegenden Studie nicht geklärt werden konnte, welche Anteile der Gesamtemissionen welchen Straßenkategorien zuzurechnen sind, wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber unterstellt, dass 20 % der Emissionen durch den motorisierten Straßenverkehr verursacht werden. In einer Sensitivität wird zudem untersucht, wie hoch die Emissionen ausfallen, wenn dem motorisierten Straßenverkehr 50 % der Emissionen zugeschlagen werden.

Die Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der **Tunnel** in Deutschland basiert auf der „Erhebung des Elektrizitätsverbrauchs bestehender Straßentunnel“ in der Schweiz aus dem Jahr 1994 [Steinemann/Borel 1994]. Die in der Publikation veröffentlichten Daten enthalten Verbrauchswerte für die Tunnelbeleuchtung, Tunnelbelüftung und die der Nebenaggregate. Für die Auswertung wurden die Verbräuche von 118,4 km Tunnelbauwerke von mehr als 80 % der Tunnel in der Schweiz erfasst. Wie Tabelle 18 zeigt, trägt die Tunnelbeleuchtung mit rund 57 % den größten Anteil am Gesamtverbrauch bei. Um eine Doppelzählung mit dem Bereich Straßenbeleuchtung zu vermeiden, wird dieser Anteil nicht in der Berechnung berücksichtigt.

⁹ <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=22581>

Tabelle 18: Stromverbrauch der Schweizer Straßentunnel nach Verursacher

	Stromverbrauch der Schweizer Straßentunnel		
	MWh/a	MWh/(a*km)	%
Tunnelbelüftung	11.400	96	17%
Tunnelbeleuchtung	39.500	334	57%
Nebenanlagen	18.000	152	26%
Total	68.900	582	100%

Quelle: [Steinemann/ Borel 1994]

Über die Länge des Tunnelnetzes an den Bundesfernstraßen in Deutschland werden diese Verbrauchswerte übertragen und mit dem in Kapitel 2.4 beschriebenen Emissionsfaktoren verknüpft. Demnach führt der Tunnelbetrieb in Deutschland zu einem Stromverbrauch von rund 60.100 MWh/a. Daraus ergeben sich CO₂-Emissionen in Höhe von rund 36.900 Tonnen bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von rund 38.400 Tonnen pro Jahr. Diese Emissionen wären letztlich nur dem Verkehr auf den Bundesfernstraßen zuzurechnen. Aufgrund der geringen Relevanz wird jedoch auf ein gesondertes Allokationsverfahren verzichtet und, ebenso wie es bei der Straßenbeleuchtung der Fall war, auf die Fahrzeugkilometer zurückgegriffen.

Für die Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb von **Lichtzeichenanlagen** (Ampeln) wurde vom Öko-Institut eine Internetrecherche durchgeführt. Dabei wurden für elf Regionen Informationen zu der Anzahl der Lichtzeichenanlagen (LZA) zusammengetragen. Für vier dieser Regionen wurden zusätzlich Verbrauchsangaben veröffentlicht. Wie sich zeigt, liegt die Anzahl der LZA in den größeren Städten mit 0,6 bis 0,8 Lichtzeichenanlagen pro 1.000 Einwohner deutlich unter der in dünner besiedelten Ortschaften (z.B. Schweinfurt, Norderstedt jeweils 1,4 LZA pro 1.000 Einwohner). Für die weiteren Berechnungen wird von einer LZA pro 1.000 Einwohner mit einem mittleren Stromverbrauch von 5.011 kWh pro Jahr ausgegangen. Dabei wird eine Bevölkerung von 81,7 Millionen Menschen unterstellt.

Tabelle 19: Kennzahlen zu den Lichtzeichenanlagen für ausgewählte Städte in Deutschland

	Lichtzeichen- anlage	Anzahl pro Einwohner	Strom- verbrauch	spezifischer Strom- verbrauch
	Anzahl	LZA pro 1.000 Einwohner	MWh/a	kWh/(a*LZA)
Berlin	2.000	0,6		
München	1.100	0,8		
Aachen	200	0,8		
Lüneburg	76	1,0	485	6.382
Hamburg	1.717	1,0		
Bremen	591	1,1		
Freiburg	165	0,8		
Gütersloh	80	0,8	357	4.460
Schweinfurt	75	1,4		
Norderstedt	101	1,4	289	2.861
Kiel	250	1,0	1.410	5.640

Quellen: [Berlin 2012]; [Hamburg 2009]; [LUBW 2008]; [Gütersloh 2012]; [Schweinfurt 2012]; [Brüning 2012]; [Kiel 2010]; [RDS 2012]; [Augsburger Allgemeine 2010]; [TZ-Online 2012]; [Kommunal Direkt 2005]

Demnach ergeben sich jährliche Emissionen in Höhe von rund 251.400 Tonnen CO₂ bzw. 261.900 Tonnen CO₂-Äquivalente. Diese Emissionen werden vereinfachend anhand der gesamten Verkehrsleistung allokiert. Damit werden die Emissionen bei den Lkw jedoch überschätzt, da diese den Großteil der Fahrleistung auf den Autobahnen ohne Ampeln erbringen.

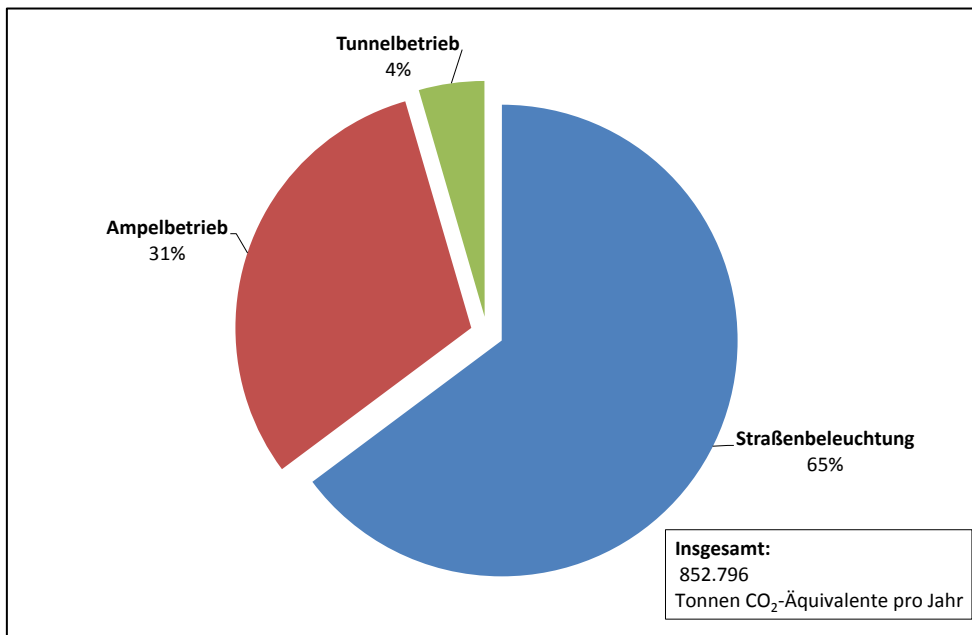


Bild 9: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen]

Insgesamt entfallen rund 65 % der durch den Betrieb der Straßeninfrastruktur verursachten THG-Emissionen auf die Straßenbeleuchtung, 31 % auf die Lichtzeichenanlagen und 4 % auf den Tunnelbetrieb. In einer Sensitivitätsanalyse wird betrachtet, wie es sich auswirkt, wenn 50 % der durch die Straßenbeleuchtung entstehenden Emissionen dem motorisierten Straßenverkehr zugerechnet werden. In diesem Fall liegt der Anteil der Beleuchtung mit 82 % deutlich über den Lichtzeichenanlagen (16 %) und dem Tunnelbetrieb (2 %). Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 aufgeführt. Für den Personenverkehr ergeben sich THG-Emissionen in Höhe von 0,84 g pro Pkm (Pkw) und 0,05 g pro Pkm (Reisebus). Beim Güterverkehr liegen sie zwischen 1,23 (Solo-Lkw >7,5t) und 0,1 g (Last- und Sattelzug 34-40 t) pro tkm.

Insgesamt wird deutlich, dass die Emissionen eher gering ausfallen, es aber entscheidend ist, wie viel der durch die Beleuchtung verursachten Emissionen dem motorisierten Verkehr zugeschlagen wird.

Tabelle 20: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Fahrzeugkategorie

	Einheit	Basis:		Sensitivität:	
		20 % Allokation Beleuchtung		50 % Allokation Beleuchtung	
		CO ₂	CO ₂ e	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	0,81	0,84	1,59	1,65
Linienbus	g/Pkm	0,08	0,09	0,16	0,17
Reisebus	g/Pkm	0,05	0,05	0,09	0,09
Solo-Lkw 3,5-7,5 t	g/tkm	1,18	1,23	2,33	2,43
Solo-Lkw 7,5-12 t	g/tkm	0,71	0,74	1,40	1,46
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,32	0,33	0,63	0,66
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,32	0,34	0,64	0,66
Last- und Sattelzug 28-34 t	g/tkm	0,16	0,16	0,31	0,32
Last- und Sattelzug 34-40 t	g/tkm	0,10	0,11	0,20	0,21

Quelle: eigene Berechnungen

Die Detailergebnisse für die drei Bereiche sind im Anhang aufgeführt (Kapitel 10.2.5).

3.3 Herstellung der Fahrzeuge

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Herstellung der Kraftfahrzeuge und den damit verbundenen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen. Berechnet werden ausschließlich die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen, die bei der Produktion der eingesetzten Materialien entstehen. Emissionen, die durch den Energieverbrauch beim Bau der Fahrzeuge entstehen, sind ebenso wie bei den anderen Verkehrsmitteln in dieser orientierenden Stoffstrombilanz nicht berücksichtigt. Weiterhin werden Transporte von den Produktionsstätten der Materialien bis zu den Fahrzeugherstellern nicht betrachtet.

Die Materialmengen, die für die Herstellung der Fahrzeuge zu Grunde gelegt werden, sind vollständig aus dem Renewbility-Projekt entnommen [Zimmer et al. 2009]. Die Leistungsmerkmale der Fahrzeuge stammen ebenfalls aus diesem Projekt, wurden jedoch hinsichtlich der Daten zur durchschnittlichen Fahrleistung in 2008 und der Auslastung aus TREMOD 5.25 ergänzt. Der Auslastungsgrad errechnet sich je Fahrzeugtyp aus der jährlichen Verkehrsleistung (Personen- bzw. Tonnenkilometer) geteilt durch die Fahrleistung (Fahrzeugkilometer).

Renewbility führt keinerlei durch die Wartung der Fahrzeuge verursachte Materialmengen auf, somit bleiben diese in der vorliegenden Studie unberücksichtigt. Die nachfolgenden CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. pro tkm werden deshalb leicht unterschätzt.

In der orientierenden Stoffstromanalyse zu den Fahrzeugen des **Personenverkehrs** werden folgende Fahrzeuge betrachtet:

- Pkw klein
- Pkw mittel
- Pkw groß
- Linienbus (18 t zGG)
- Reisebus (18 t zGG)

Unberücksichtigt bleiben aufgrund der geringen Relevanz die verschiedenen motorisierten Zweiräder.

Für die Pkw werden durch das Projekt Renewbility Materialzusammensetzungen für drei Größenklassen bereitgestellt. Dabei wird zusätzlich zwischen Fahrzeugen mit Otto- und Dieselmotor unterschieden. In den nachfolgenden Berechnungen sind die Fahrzeuge bereits aggregiert dargestellt. Dafür wurde auf den Fahrzeugbestand laut Kraftfahrtbundesamt (KBA) aus dem Jahr 2008 zurückgegriffen, wobei jedoch nicht zwischen den Größenklassen unterschieden wurde. Demnach waren in 2008 rund 25 % der 41 Millionen zugelassenen Pkw dieselbetrieben [KBA 2012]. Tabelle 21 zeigt die Materialzusammensetzung eines Pkw am Beispiel eines mittleren Pkw mit Ottomotor gemäß Zimmer et al. [2009]. Die Materialzusammensetzung aller Pkw differenziert nach Antriebsart ist im Anhang dokumentiert (siehe Tabelle 99 und Tabelle 100). Die Tabelle 101 im Anhang beinhaltet die veranschlagte Materialzusammensetzung der Busse.

Den größten Anteil am Gesamtgewicht von rund 1,3 Tonnen besitzen mit 60 % die Eisenhaltigen Metalle (Stahl, Eisen, hochfeste Stähle) gefolgt von den Kunststoffen mit 17 % (Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Polyurethan (PUR), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyethylenterephthalat (PET) und andere Kunststoffe). Mit 116 kg besitzt Aluminium einen Anteil von 10 % am Gesamtgewicht des Pkw, die anderen Bestandteile liegen mengenmäßig jeweils unter 3 %.

Tabelle 21: Materialzusammensetzung eine Pkw (mittel, Ottomotor)

	Materialmenge	Anteil am Fahrzeuggewicht
	kg	%
Stahl	530	41%
PP, PE	149	11%
Hochfeste Stähle	127	10%
Eisen	124	10%
Aluminium	116	9%
PUR, ABS, PET, andere Kunststoffe	75	6%
Andere	37	3%
Glas	31	2%
Gummi	28	2%
Andere Flüssigkeiten	27	2%
Textilien	13	1%
Kupfer	12	1%
Blei	9	1%
Öl	8	1%
Andere Metalle	5	0,4%
Magnesium	3	0,2%
Zink	3	0,2%
Kältemittel	1	0,04%
Palladium	0,002	0,0002%
Rhodium	0,0002	0,00002%

Quelle: [Zimmer et al. 2009]

Durch eine Verknüpfung der Materialien mit Emissionsfaktoren aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent werden dann die gesamten CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen berechnet und anhand der in Tabelle 22 aufgeführten Lebensdauern, jährlichen Fahrleistungen und Auslastungsgraden auf die Personenkilometer bezogen. Die Ergebnisse für den Personenverkehr sind in Tabelle 24 aufgeführt.

Tabelle 22: Leistungsmerkmale der Fahrzeuge des Personenverkehrs

Fahrzeugkategorie	Leergewicht	Auslastungsgrad	Jahresfahrleistung	Lebensdauer
	t	Pers./Fzg.	km/a	a
Personenverkehr				
PKW klein	1,0	1,5	10.002	14
Pkw mittel	1,3	1,5	15.167	14
Pkw groß	1,6	1,5	18.230	12
Linienbus	11,0	14,5	35.759	10
Reisebus	14,0	26,8	69.814	10

Quellen: [Zimmer et al. 2009], [TREMODO 5.25]

Beim **Güterverkehr** werden folgende Fahrzeuge betrachtet:

- Solo-Lkw 3,5-7,5 t zGG
- Solo-Lkw 7,5-12 t zGG
- Solo-Lkw > 12 t zGG
- Last- und Sattelzug <= 28 t
- Last- und Sattelzug 28-34 t
- Last- und Sattelzug 34-40 t.

Die zugrunde gelegten Daten zur Materialzusammensetzung der Fahrzeuge wurden auch für den Güterverkehr Zimmer et al. [2009] entnommen (siehe Tabelle 102 im Anhang). Für die schweren Nutzfahrzeuge liegen diese jedoch nicht in dem hohen Detaillierungsgrad vor wie es für die Pkw der Fall ist.

Tabelle 23 führt die Leistungsmerkmale für die Schweren Nutzfahrzeuge auf. Die Kategorie Last- und Sattelzug 40 t aus Zimmer et al. [2009] wurde jedoch in die drei Kategorien Last- und Sattelzug <= 28 t, Last- und Sattelzug 28-34 t und Last- und Sattelzug 34-40 t aufgeteilt. Um das geringere zulässige Gesamtgewicht auch in den Materialdaten zu berücksichtigen, wurden diese mit einem Faktor von 0,6 und 0,8 für die Kategorien <= 28 t und 28-34 t angepasst. Die beschriebenen Änderungen der Kategorien wurden vorgenommen, um die entnommenen Daten zu Materialverbrauch (in dem Fall das Leergewicht) und Lebensdauer mit der Fahr- und Verkehrsleistung aus TREMOD verknüpfen zu können.

Tabelle 23: Leistungsmerkmale der Fahrzeuge des Güterverkehrs

Fahrzeugkategorie	Leerge- wicht	Auslastungs- grad	Jahresfahr- leistung	Lebens- dauer
	t	t Nutzlast/Fzg.	km/a	a
Güterverkehr				
Solo-Lkw 3,5-7,5 t	4,0	1,0	36.982	12
Solo-Lkw 7,5-12 t	5,0	1,7	55.474	11
Solo-Lkw > 12 t	6,2	3,8	80.926	9
Last- und Sattelzug <= 28 t	5,9	3,7	29.052	8
Last- und Sattelzug 28-34 t	7,8	7,8	83.152	8
Last- und Sattelzug 34-40 t	9,8	11,7	124.155	8

Quellen: [Zimmer et al. 2009], [TREM0D 5.25]

Die Materialmengen für die Herstellung der zuvor klassifizierten Kraftfahrzeuggruppen bezogen auf die Verkehrsleistung werden im Anhang unter 10.2.3 aufgeführt. Hierfür werden die unterstellten Materialmengen auf die Lebensdauer der Fahrzeuge linear verteilt und mit der jährlichen Fahrleistung und dem Auslastungsgrad verrechnet.

Über die eingangs festgelegten Emissionsfaktoren kann dieser Wert dann in CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer durch die Herstellung umgerechnet werden. Wie die Ergebnisse in Tabelle 24 zeigen, führt der Pkw im Mittel mit 10,4 gCO₂-Äquivalenten pro Pkm zu den höchsten Emissionen durch den Fahrzeugbau im Personenverkehr. Die Linienbusse liegen mit 5,4 g CO₂e pro Pkm fast um die Hälfte darunter. Bei den besser ausgelasteten Reisebussen mit größerer Fahrleistung entstehen durch den Bau der Fahrzeuge mit 1,9 g CO₂e pro Pkm sogar um 82 % niedrigere spezifische Emissionen als beim Pkw. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die großen Pkw trotz der deutlich höheren Fahrzeugmasse nicht wesentlich schlechter abschneiden als die kleinen. Dies liegt in der größeren Fahrleistung bei diesen Fahrzeugen begründet.

Beim Güterverkehr wurden lediglich die schweren Nutzfahrzeuge betrachtet. Dabei fällt einerseits ins Auge, dass die spezifischen CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Fahrzeuge in g pro tkm mit zunehmender Fahrzeuggröße abnehmen. Bei den kleinen Solo-Lkw mit einem zGG. bis 7,5 t liegen die CO₂-Äquivalent-Emissionen mit 24,4 g CO₂e pro tkm bspw. fast doppelt so hoch wie bei den nächstgrößeren Lkw (Solo-Lkw 7,5 bis 12 t zGG). Andererseits scheinen die spezifischen Emissionen für den Last- und Sattelzug (<=28 t zGG) mit 18,1 gCO₂e pro tkm unplausibel hoch. Dies liegt an der sehr geringen durchschnittlichen Fahrleistung dieser Fahrzeuge im TREMOD-Modell (rund 30.000 km/a). Die niedrigsten spezifischen THG-Emissionen durch den Bau der Fahrzeuge weisen die Last- und Sattelzüge (34-40 t zGG.) mit 2,3 g CO₂e pro tkm auf.

Tabelle 24: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung der Kraftfahrzeuge pro Fahrzeug-km und pro Pkm bzw. tkm

Fahrzeugtyp	Pro Fahrzeug-Kilometer		Pro Verkehrsleistung	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	g / Fzg-km	g / Fzg-km	g / Pkm bzw. g / tkm	g / Pkm bzw. g / tkm
Personenverkehr				
Pkw insgesamt	14,2	15,5	9,5	10,4
Pkw klein	14,7	17,5	9,8	11,7
Pkw mittel	13,6	16,1	9,1	10,7
Pkw groß	15,4	18,1	10,2	12,1
Linienbus	72,2	77,6	5,0	5,4
Reisebus	47,1	50,6	1,8	1,9
Güterverkehr				
Solo-Lkw 3,5-7,5 t	22,9	24,9	22,5	24,4
Solo-Lkw 7,5-12 t	19,3	21,0	11,4	12,3
Solo-Lkw > 12 t	21,8	23,7	5,8	6,3
Last- und Sattelzug <= 28 t	62,3	67,7	16,7	18,1
Last- und Sattelzug 28-34 t	29,0	31,5	3,7	4,1
Last- und Sattelzug 34-40 t	24,3	26,4	2,1	2,3

Quelle: eigene Berechnungen.

3.4 Ergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Treibhausgasemissionen für folgende Bereiche des Straßenverkehrs ermittelt:

- Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur,
- Betrieb der Straßeninfrastruktur und
- Fahrzeugherstellung.

Die Allokation der in den vorhergegangenen Kapiteln berechneten Gesamtemissionen auf die verschiedenen Fahrzeugkategorien wurde auf Basis der Brutto-Tonnen-Kilometer durchgeführt. Lediglich bei den Emissionen durch den Bau der Tankstellen und dem Betrieb der Infrastruktur wurde davon abweichend auf Basis der Energieverbräuche in den Fahrzeugkategorien (Tankstellenbau) und der Fahrleistung (Betrieb der Infrastruktur) allokiert. Die Allokationsschlüssel sind im Anhang in Tabelle 95, Tabelle 96, Tabelle 97 und Tabelle 98 dokumentiert. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der

vorangegangenen Betrachtungen zusammengefasst und um die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen des Fahrbetriebs aus TREMOD 5.25 ergänzt.

Die leichten Nutzfahrzeuge (LNF) sind nicht in den untenstehenden Ergebnissen enthalten, da die im TREMOD-Modell enthaltenen Kennzahlen zur Transportleistung nicht zu sinnvollen Ergebnissen bezogen auf die Verkehrsleistung (in tkm gemessen) führen. Eine Berücksichtigung findet aber bei der Berechnung des Allokationsschlüssels statt, d. h., es werden nicht 100 % der Emissionen auf die untenstehenden Fahrzeugkategorien aufgeteilt¹⁰ sondern der sich für die Nutzfahrzeuge ergebene Anteil wird davon ausgenommen.

Tabelle 25 zeigt die Ergebnisse für den Personenverkehr. Für den Pkw-Verkehr ergeben sich bei Berücksichtigung aller emissionsrelevanten Bereiche CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 166 g/Pkm. Durch den Fahrbetrieb werden dabei 147 g/Pkm emittiert. Der Einbezug der Infrastruktur und Fahrzeuge führt somit zu weiteren Emissionen in Höhe von 19 g CO₂e/Pkm. Den größten Anteil an diesen zusätzlichen Treibhausgasemissionen ist auf den Bau der Fahrzeuge zurückzuführen. Die Gesamtemissionen liegen bei den Linienbussen auch unter Einbezug der Infrastruktur und Fahrzeugherstellung mit 89 g CO₂-Äquivalente pro Pkm deutlich unter denen der Pkw. Insgesamt ist der Anteil von Infrastruktur und Fahrzeugherstellung mit 14 % etwas größer als bei den Pkw, jedoch hat der Bau- und Unterhalt der Infrastruktur eine größere Bedeutung. Bei den Reisebussen entfallen von den CO₂-Äquivalent-Emissionen von 38 g/Pkm rund 7 g/Pkm bzw. 18 % auf die Infrastruktur und die Fahrzeugherstellung, wobei letztgenanntes aufgrund der hohen Auslastung und Fahrleistung eher gering ausfällt.

¹⁰ Ausgehend von einem Fahrzeuggewicht von 1,9 t erbringen die LNF 3,7 % der gesamten Btkm.

Tabelle 25: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Straßenpersonenverkehrs in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Straßeninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge

	Personenverkehr					
	Pkw		Linienbus		Reisebus	
	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	162,6	100%	87,2	100%	37,4	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	144,7	89%	75,6	87%	30,9	83%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	7,6	5%	6,5	7%	4,7	13%
Betrieb Infrastruktur	0,8	0%	0,1	0%	0,0	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	9,5	6%	5,0	6%	1,8	5%
CO₂-Äquivalente insgesamt	165,8	100%	88,7	100%	38,1	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	146,6	88%	76,3	86%	31,1	82%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	8,1	5%	7,0	8%	5,0	13%
Betrieb Infrastruktur	0,8	1%	0,1	0%	0,0	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	10,4	6%	5,4	6%	1,9	5%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

Bild 10 stellt die Ergebnisse in einem Balkendiagramm dar. Es wird deutlich, dass die zusätzlich zum Fahrbetrieb betrachteten Emissionen zwar einen größeren relativen Anteil besitzen, absolut gesehen verändert sich der Umweltvergleich durch diese umfassendere Betrachtungsweise jedoch zu Ungunsten der Pkw, d.h. die Differenz der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen zu den Bussen nimmt zu.

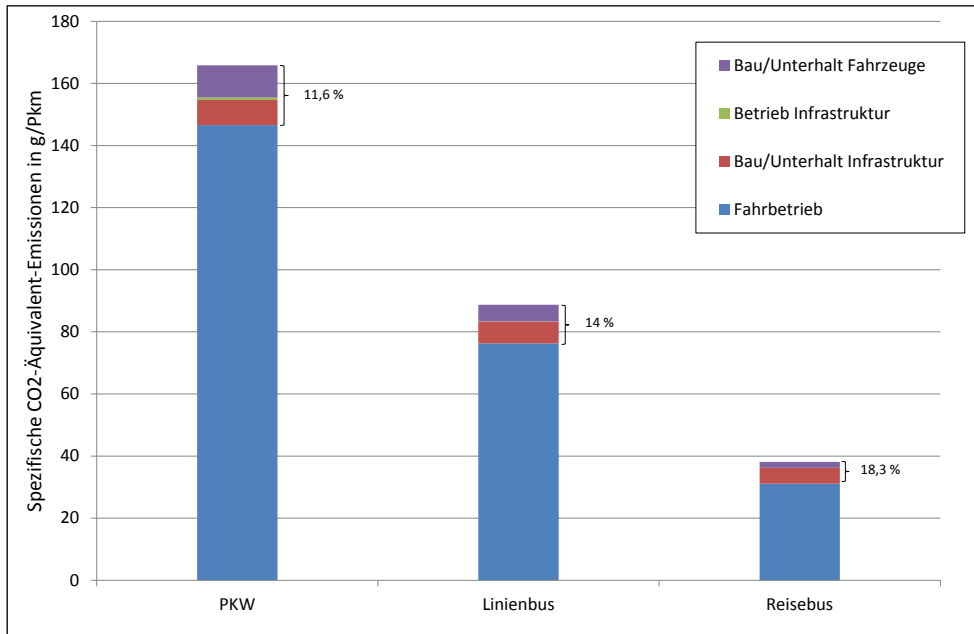


Bild 10: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrzeugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Straßeninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 [TREM0D 5.25; eigene Berechnungen]

Bild 10 zeigt die spezifischen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Güterverkehrs. Auf den Fahrbetrieb entfallen bei den Solo-Lkws zwischen 85 bis 88 % der CO₂-Äquivalent-Emissionen von 428 g CO₂e/tkm (zGG <7,5 t), 351 g CO₂e/tkm (zGG 7,5 t - 12 t) und 231 g CO₂e/tkm (zGG >12t) (siehe Tabelle 26). Auf den Bau und Unterhalt der Infrastruktur entfallen jeweils rund 9 % der Emissionen. Bild 11 verdeutlicht dabei, dass der absolute, durch den Bau und Unterhalt der Infrastruktur verursachte Beitrag zu den CO₂-Äquivalent-Emissionen (rot) dabei aber bei den Solo-Lkw mit einem zGG >12 t mit rund 22 g CO₂e/tkm etwa halb so hoch ausfällt wie bei den Solo-Lkw > 7,5 t. Der Betrieb der Infrastruktur ist dagegen bei allen betrachteten Fahrzeugen vernachlässigbar. Während die Fahrzeugherstellung bei den Lkw mit einem zGG von unter 7,5 t zu Emissionen in Höhe von 24 g CO₂e/tkm (6 %) führt, nimmt der Einfluss mit zunehmender Fahrzeuggröße sowohl absolut (12 g CO₂e bei einem zGG von 7,5 t bis 12 t bzw. 6 g CO₂e bei den Solo-Lkw > 12 t) als auch relativ (6 % bzw. 3 %) ab.

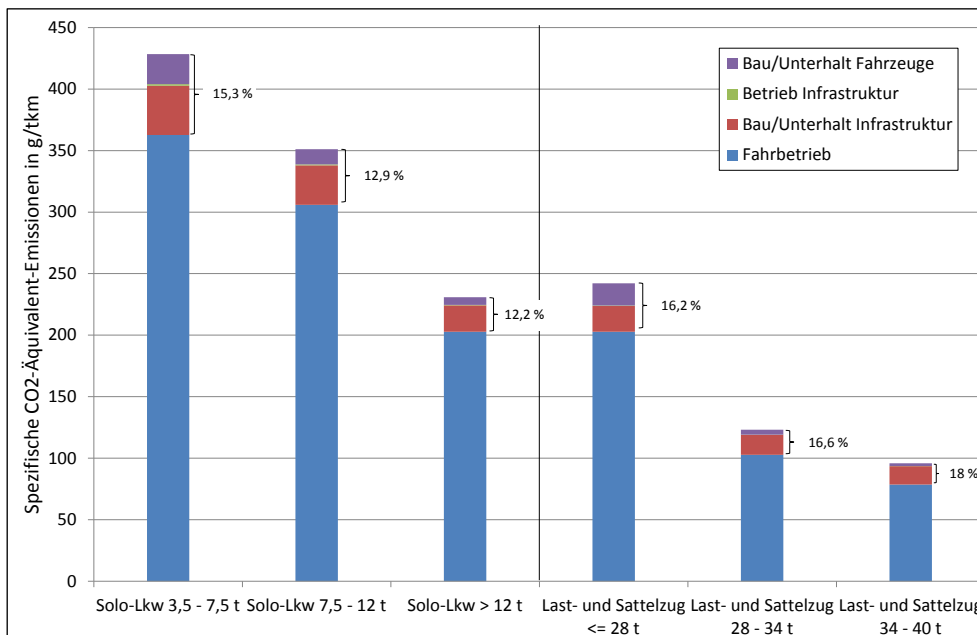


Bild 11: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrzeugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Straßeninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen]

Hinsichtlich des Betriebs der Infrastruktur und der Fahrzeugherstellung ergibt sich bei der Betrachtung der Last- und Sattelzüge ein ähnliches Bild (siehe Tabelle 27). Der Betrieb der Infrastruktur ist vernachlässigbar, der Einfluss der Fahrzeugherstellung nimmt mit steigender Fahrzeuggröße ab. Bei den Last- und Sattelzügen mit einem zGG 34-40 t, welche fast 90 % der Transportleistung erbringen, wird aber deutlich, wie wichtig der Einbezug von Bau und Unterhalt der Infrastruktur in den Umweltvergleich ist: Sie tragen mit 14,9 g CO₂e/tkm zu rund 15 % der Gesamtemissionen bei.

Tabelle 26: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Güterverkehrs der Solo-Lkw in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Straßeninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge

	Güterverkehr Solo-Lkw					
	Solo-Lkw 3,5-7,5 t		Solo-Lkw 7,5-12 t		Solo-Lkw > 12 t	
	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	420,5	100%	345,5	100%	226,9	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	359,4	85%	303,5	88%	200,6	88%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	37,5	9%	30,0	9%	20,1	9%
Betrieb Infrastruktur	1,2	0%	0,7	0%	0,3	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	22,5	5%	11,4	3%	5,8	3%
CO₂-Äquivalente insgesamt	428,4	100%	351,1	100%	230,9	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	362,7	85%	306,0	87%	202,7	88%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	40,1	9%	32,1	9%	21,5	9%
Betrieb Infrastruktur	1,2	0%	0,7	0%	0,3	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	24,4	6%	12,3	4%	6,3	3%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

Tabelle 27: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Güterverkehrs der Last- und Sattelzüge in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Straßeninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge

	Güterverkehr Last- und Sattelzüge					
	Last- und Sattelzug <= 28 t		Last- und Sattelzug 28 - 34 t		Last- und Sattelzug 34 - 40 t	
	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	237,6	100%	120,7	100%	93,6	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	201,1	85%	101,6	84%	77,5	83%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	19,5	8%	15,2	13%	13,9	15%
Betrieb Infrastruktur	0,3	0%	0,2	0%	0,1	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	16,7	7%	3,7	3%	2,1	2%
CO₂-Äquivalente insgesamt	242,1	100%	123,2	100%	95,9	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	202,8	84%	102,7	83%	78,6	82%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	20,9	9%	16,2	13%	14,9	15%
Betrieb Infrastruktur	0,3	0%	0,2	0%	0,1	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	18,1	7%	4,1	3%	2,3	2%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

Dem Vorgehen in Schmied/Mottschall [2013] folgend, welches sich an den PCR for Railways [PCR 2009] orientiert, wurde in dieser Studie für langlebige Infrastrukturbestandteile, wie die Gebäude, eine Lebensdauer von 60 Jahren angesetzt. Um zu berücksichtigen, welche Auswirkungen potentiell längere Lebensdauern haben, wurde im Rahmen dieser Studie eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, bei der die langlebigen Bereiche der Infrastruktur wie für Straßenunterbau, Brücken und Tunnel, sowie für die Gebäude der Rast- & Autohöfe, Werkstätten und Tankstellen eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen wurde. Die prozentuale Veränderung der Höhe der CO₂-Äquivalent-Emissionen durch eine längere Lebensdauer der Gebäude von 100 anstatt von 60 Jahren zeigt Bild 12 (-40 % Gebäude; -2,5 % Bau und Unterhalt gesamt). Wie die Abbildung zeigt, ist der Einfluss der angenommenen Lebensdauer der Gebäude auf das Gesamtergebnis für den Verkehr gering (zwischen 0,2 – 0,3 %).

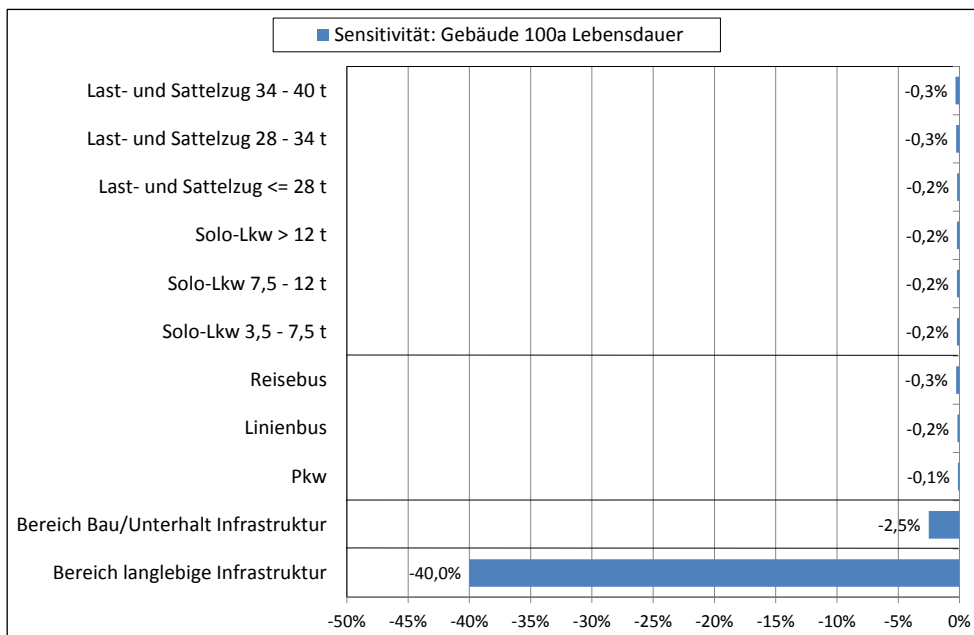


Bild 12: Sensitivitätsanalyse zur Annahme der Lebensdauer langlebiger Infrastrukturbereiche beim Straßenverkehr (100a gegenüber 60a) [eigene Berechnungen]

Wie beschrieben, erfolgte die bisherige Darstellung angelehnt an die PCR for Railways [PCR 2009] auf Basis einer Allokation anhand der Brutto-Tonnen-Kilometer. In der Praxis führt eine zunehmende Achslast bei den Fahrzeugen jedoch zu einer nicht linear ansteigenden Schädigung der Straße. Der AASHO Road Test von der American Association of State Highway and Transportation Officials hat untersucht, in welchem Maße der Verkehr zur Schädigung und Alterung des Straßenkörpers beiträgt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Maß der Schädigung der Deckschicht von der vierten Potenz der Achslast abhängt. Dies bedeutet, dass die Schädigung der Deckschicht bei einer Verdopplung der

Achslast um das 16-Fache und bei einer Vervierfachung um das 256-Fache steigt. Deutsche ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen kommen zu einem Ergebnis zwischen 2,5 und 6 für diesen Wert und bestätigen im Mittel den Wert des AASHO Road Test [DIW 2009]. Diese Berechnungsmethodik ist weit verbreitet zur Berechnung der variablen Kosten in der Wegekostenrechnung und wird in vielen Ländern zur Kostenallokation benutzt [DIW 2009]. Ein Vorschlag nach Rommerskirchen et al. [2007] zeigt eine 100-prozentige Allokation des Erhalts der Deckschicht nach diesem Prinzip (siehe Bild 42 im Anhang). Auch wenn Rommerskirchen et al. [2007] einen Wert von 3 für den Exponenten ermittelt haben, lässt dieser Ansatz starke Abweichungen in der Zuordnung vermuten.

Aufgrund dieser starken Abhängigkeit von der Achslast wird nachfolgend eine Sensitivitätsanalyse für eine Allokation durchgeführt, bei der der stärkere Einfluss der Achslasten berücksichtigt wird. Dafür werden die durch Bau und Unterhalt der Deckschichten verursachten Emissionen entsprechend der AASHO-Methodik allokiert. Dabei wird vereinfachend vorgegangen, indem Annahmen zu der Achslast bei den verschiedenen Fahrzeugkategorien getroffen wurden (siehe Tabelle 103). Dies ist ein stark vereinfachtes Vorgehen, da in der Praxis bestimmte Achslasten auf angetriebenen Achsen aufliegen müssen. Zudem berücksichtigt dieses Vorgehen bei den Lkw weder die Leerfahrten, bei denen die Achslast deutlich niedriger ausfallen, noch die Fahrten mit überdurchschnittlicher Beladung, welche aufgrund der Potenz einen hohen Einfluss besitzen. Für eine grobe Abschätzung ist das Vorgehen jedoch ausreichend.

In der Sensitivitätsanalyse wird betrachtet, wie sich die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen verändern, wenn die Allokation entsprechend der AASHO-Methodik (Achslast in 4ter Potenz) durchgeführt wird. Den Einfluss auf die Gesamtergebnisse verdeutlichen Bild 13 für den Personenverkehr und Bild 14 für den Güterverkehr. Die Abbildungen zeigen die prozentuale Veränderung gegenüber der oben gewählten Vorgehensweise bei der Allokation bezogen auf die Deckschicht (blau), den Bereich Bau und Unterhalt der Infrastruktur (rot) und die Gesamtemissionen der verschiedenen Fahrzeuge einschließlich des Fahrbetriebs.

Es zeigt sich, dass es erwartungsgemäß zu einer Verschiebung der Emissionen von den leichteren zu den schwereren Fahrzeugen kommt. Den Pkw sind nach dieser Allokationsmethode nahezu keine Emissionen durch die Deckschicht zuzurechnen. Die gesamten spezifischen Emissionen der Pkw sinken dadurch um rund 2 %.

Bei den Bussen hingegen erhöhen sich die Gesamtemissionen um 3 % bzw. 5 %. Die spezifischen Emissionen durch den Bau der Deckschicht steigen dabei jedoch um mehr als das Doppelte (+127 %).

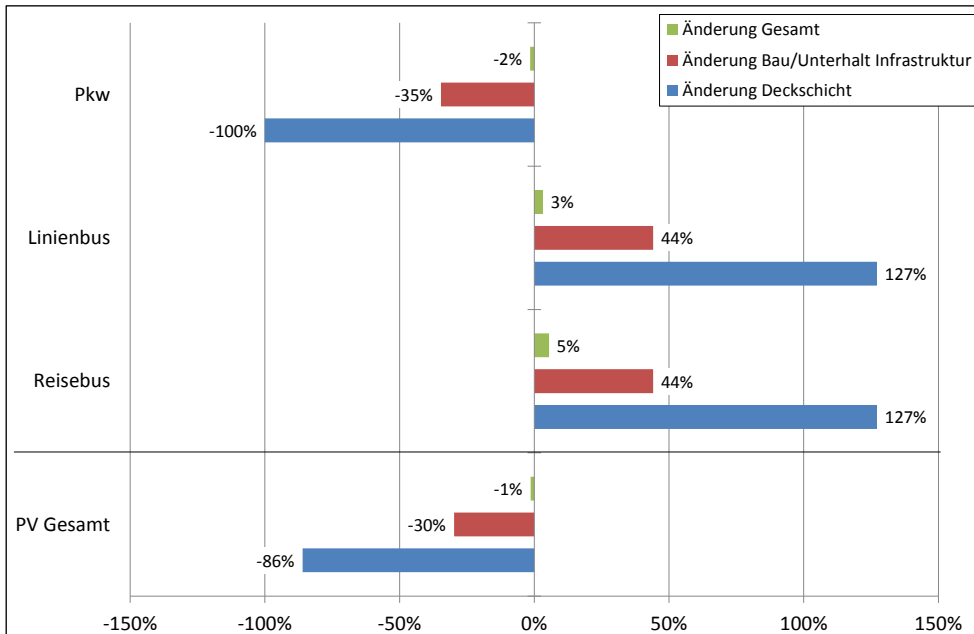


Bild 13: Veränderung der gesamten spezifischen THG-Emissionen des Personenverkehrs in Prozent durch Allokation der Deckschichten nach AASHO Road Test [Berechnungen Öko-Institut]

Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Güterverkehr, auch hier steigen die Emissionen bei den großen und schweren Fahrzeugen stark an (siehe Bild 14).

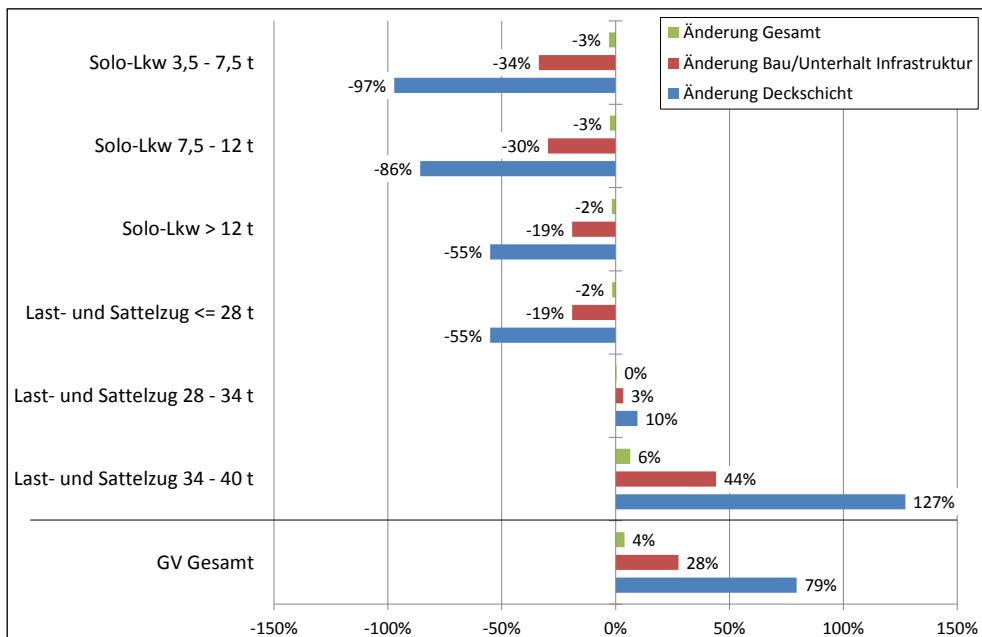


Bild 14: Veränderung der gesamten spezifischen THG-Emissionen des Güterverkehrs in Prozent durch Allokation der Deckschichten nach AASHO Road Test [Berechnungen Öko-Institut]

Die Wahl der Allokationsmethode besitzt demnach einen großen Einfluss auf die Verteilung der Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Deckschicht. Am Beispiel der Pkw lässt sich aber gut erkennen, dass auch dieses Vorgehen nicht sinnvoll ist, da dem Pkw-Verkehr in diesem Fall praktisch keine Emissionen aus diesem Bereich zugerechnet werden. Letztlich sollte ein geeignetes Allokationsverfahren sowohl die Schädigung als auch die Nutzung der Infrastruktur einbeziehen.

4 Luftverkehr

Der Bau-, Unterhalt und Betrieb der Flughäfen sowie die Materialverbräuche der Flugzeugherstellung führen zu CO₂- bzw. CO₂-Äquivalentemissionen, die bislang in Verkehrsmittelvergleichen unberücksichtigt bleiben.

Das TREMOD-Modell für den Luftverkehr betrachtet beispielsweise die LTO-Emissionen (Landing-Take-Off cycle), die durch alle Aktivitäten im Bereich des Flughafens unterhalb einer Höhe von 3.000 Fuß (914 Metern) einschließlich der Taxi-Verkehre am Boden, der Leerlaufverbräuche sowie der Start- und Landephase verursacht werden. Neben den LTO-Emissionen werden die Emissionen der Steig- und Sinkphase und der Reiseflugphase über 914 Metern betrachtet, welche als CCD (climb, cruise, descend) bezeichnet werden [Knörr et al. 2010].

Beim Luftverkehr besteht eine Besonderheit darin, dass bis auf die Start- und Landephase große Teile des Transports in hohen Höhen durchgeführt werden. Neben den bei der Verbrennung entstehenden CO₂-Emissionen haben die Abgase der Flugzeuge weitere verschiedene Wirkungen auf das Klima. Diese weiteren Auswirkungen können im TREMOD-Modell optional durch einen frei wählbaren EWF (Emission Weighting Factor) berücksichtigt werden¹¹. Dieser Faktor wird auf die direkten CO₂-Emissionen über neun Kilometern Höhe bezogen und beschreibt die höhere Klimawirksamkeit von Flugemissionen in Reiseflughöhe. Im TREMOD-Modell ist ein EWF von 2,4 voreingestellt [Knörr et al. 2010]. Die Auswirkungen dieses EWF werden in Kapitel 4.4 in einer Sensitivitätsanalyse dargestellt.

Nicht im TREMOD-Modell betrachtet werden hingegen sonstige Energieverbräuche am Flughafen wie bspw. Kraftstoffverbräuche der Flugzeugschlepper oder Stromverbräuche der Gepäckförderanlagen sowie Bau- und Unterhalt des Flughafens und der Flugzeuge.

Der Luftverkehr besitzt im Gegensatz zu den anderen Verkehrsmitteln die Besonderheit, dass auf weiten Teilen eines Fluges keine Infrastruktur wie bspw. Straßen oder Schienen benötigt werden. Nur an den Flughäfen, wo die Flugzeuge starten und landen kommt es zu zusätzlichen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen. Aus diesem Grund ist auch die bislang umgesetzte Allokationsmethode auf Basis der Bruttotonnenkilometer für den Luftverkehr ungeeignet, da sonst die spezifischen Emissionen pro Passagierkilometer oder Tonnenkilometer unabhängig von der Flugdistanz gleich hoch ausfallen würden. Dies bedeutet, dass einem Langstreckenflug größere Anteile des Energieverbrauchs zugerechnet würden als einer Kurzstrecke. Deshalb wird für den Bereich Luftverkehr – wie in Kapitel 2.3 beschrieben – für die Luftverkehrsinfrastruktur ein Allokationsverfahren auf Basis der Verkehrseinheiten verwendet.

¹¹ Dieser der Faktor wird häufig auch als „Radiative Forcing Index“ (RFI) bezeichnet.

Im Folgenden wird untersucht, wie hoch die CO₂- und CO₂-Äquivalentemissionen durch den Bau, Unterhalt (Kapitel 4.1) und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur (Kapitel 4.2) ausfallen. Kapitel 4.3 betrachtet die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen der Flugzeugherstellung. Die Ergebnisse für den Bereich Luftverkehr werden in Kapitel 4.4 dargestellt.

4.1 Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur

Im Folgenden werden die CO₂-Emissionen und die CO₂-Äquivalent-Emissionen bestimmt, die durch Bau und Unterhalt der Flughäfen verursacht werden. Dabei werden die notwendigen Materialmengen ermittelt und mit den in Kapitel 2.4 beschriebenen THG-Emissionsfaktoren verknüpft (siehe Tabelle 86 im Anhang).

Unter der Luftverkehrsinfrastruktur werden in der vorliegenden Studie die Flughäfen verstanden, welche im Jahr 2008 in der Verkehrsstatistik des statistischen Bundesamtes zu den ausgewählten Flugplätzen gezählt werden (siehe Tabelle 116 im Anhang). Nicht berücksichtigt wird jedoch der Flughafen Berlin-Tempelhof, da dieser im Oktober 2008 geschlossen wurde.

Für den Bau und Unterhalt der Flughäfen werden die Gebäude berücksichtigt, wobei zwischen Terminalgebäuden und sonstigen Gebäuden unterschieden wird. Neben den Gebäuden werden folgende asphaltierten bzw. betonierte Flächen berücksichtigt:

- die Start- und Landebahnen,
- die Schulterflächen (Seitenstreifen),
- das Vorfeld und die Rollbahnen und
- sonstigen Verkehrsflächen wie bspw. die Parkplätze.

Materialverbräuche der asphaltierten und betonierte Flächen

Der grundsätzliche Aufbau der asphaltierten bzw. betonierte Flächen entspricht den in Kapitel 3.1 beschriebenen Straßen. Auf ein Planum folgt eine Frostschuttschicht mit einem geringen Feinkornanteil, deren Aufgabe es ist, Frostschäden zu verhindern. Die Frostschuttschicht kann aus verschiedenen Baumaterialien wie beispielsweise Kies, Hochofenschlacke oder Betonbruch bestehen. In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass sie aus Kies besteht. Auf die Frostschuttschicht folgt eine gebundene Tragschicht sowie Deck- und Bindschichten, wobei in dieser Studie davon ausgegangen wird, dass die letztgenannten Schichten entweder aus Asphalt oder Beton bestehen. Die Deck- und Bindschicht unterscheiden sich von den gebundenen Tragschichten insbesondere durch die Korngröße, den Bindemittelgehalt und durch die veranschlagte Lebensdauer. In der vorliegenden Studie wurden dem konservativen Ansatz folgend die bituminösen Tragschichten wie Asphalt- und hydraulisch gebundenen Tragschichten wie Betonschichten behandelt.

Flächen mit hohen Belastungen wie die Start- und Landebahnen sowie Flächen mit Verkehrsbelastung durch Flugzeuge und Flugzeugschlepper weisen deutlich größere

Schichtdicken für die Deckschicht und gebundene Tragschicht und damit größere Materialverbräuche pro m² auf als weniger stark beanspruchte Flächen wie z. B. die Parkplätze.

Die Flughäfen verfügen über bis zu drei **Start- und Landebahnen**, welche aus Beton, Asphalt oder einer Kombination von beidem gefertigt sind¹².

Der Regelquerschnitt der 3. Start- und Landebahn des Planfeststellungsverfahrens für den Flughafen München weist eine Gesamtdicke des Oberbaus von 100 cm auf, wovon 36 cm auf die Betondecke, 20 cm auf die hydraulisch gebundene Tragschicht und mindestens 44 cm auf die Frostschutzschicht entfallen [Muc 2007]. Bild 15 zeigt dagegen verschiedene Beispiele für den konstruktiven Aufbau einer Start- und Landebahn für Großraumflugzeuge nach Eisenmann und Leykauf [2003]. Demnach liegen die Schichtdicken für die Deck-, Binde- und Tragschichten bei Betonausführung zwischen 60 cm und 78 cm und bei Asphaltausführung bei 70 bis 80 cm. Daneben wird auch eine Ausführung aufgeführt, bei der auf eine hydraulisch gebundene Tragschicht (75 bis 85 cm) eine Deckschicht aus Asphalt (25 cm) folgt. Eine Frostschutzschicht führen Eisenmann und Leykauf [2003] lediglich für eine Betonbahn auf HGT auf. In der vorliegenden Studie werden die mittleren Schichtdicken von Eisenmann und Leykauf veranschlagt, jedoch um eine Frostschutzschicht ergänzt, so dass die Dicke des gesamten Oberbaus 110 cm beträgt (Tabelle 29). Entsprechend der Erneuerung der Start- und Landebahn Berlin Schönefeld wurde für Asphaltschichten davon ausgegangen, dass die Deckschicht aus den oberen 12 cm Asphalt besteht [Kreide 2004].

¹² Seit November 2011 verfügt der Flughafen Frankfurt am Main über vier Start- und Landebahnen.

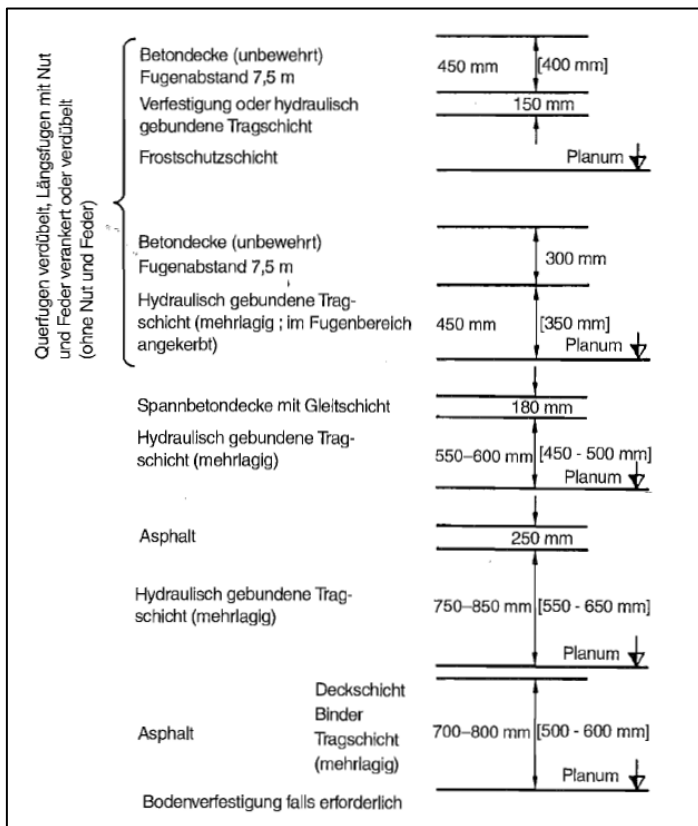


Bild 15: Beispiele für den konstruktiven Aufbau einer Start- und Landebahn für Großraumflugzeuge [Eisenmann/ Leykauf 2003]

Aus den Unterlagen zum Planfeststellungsverfahren für den Ausbau Flughafen Frankfurt/Main gehen zwei Varianten für den Deckenaufbau von **Flugbetriebsflächen** hervor, die mit Verkehrslasten durch Luftfahrzeuge oder Flugzeugschlepper beaufschlagt werden wie Vorfeld und Rollbahnen, [Dorsch Consult 2006]. Für Flächen in Asphaltbauweise ergeben sich Deck- und Tragschichten von 30 cm aus Bitumen über einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT) (20 cm) und einer Frostschuttschicht. Die Betonbauweise besteht hingegen aus einer 36 cm starken Deckschicht auf einer 20 cm starken HGT und einer Frostschuttschicht (siehe Tabelle 28). Diese Werte werden den Berechnungen zu Grunde gelegt.

Tabelle 28: Deckenaufbau Flugbetriebsflächen Flughafen Frankfurt am Main

Asphaltbauweise		Betonbauweise	
4 cm	Splittmastixasphalt	36 cm	Beton B45 (C40/50)
8 cm	Asphaltbinder 0/22	20 cm	HGT bzw. Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln
18 cm	Bituminöse Tragschicht		
20 cm	HGT bzw. Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln		
Frostschuttschicht bis -110cm		Frostschuttschicht bis -110cm	

Quelle: [Dorsch Consult 2006]

An die Start- und Landebahnen, die besonders hohen Belastungen durch die Flugzeuge standhalten müssen, sind weitere versiegelte Flächen angeschlossen, die als **Landebahn- und Rollbahnschultern** bezeichnet werden. Diese Schulterstreifen dienen dem Schutz gegen das Ansaugen von Steinen oder sonstigen Objekten durch die Flugzeuge, dem Schutz gegen Erosion infolge Triebwerksblast sowie der Befahrbarkeit durch Rettungs- und Löschfahrzeuge [Dorsch Consult 2006]. An diese versiegelten Schultern können unversiegelte Schultern anschließen, die im Weiteren nicht betrachtet werden. In Muc [2006] wird von einer 4 cm starken Deckschicht aus Bitumen, einer 8 cm starken bituminierten Tragschicht sowie einer 88 cm starken Frostschuttschicht ausgegangen. Dorsch Consult [2006] verwenden eine 10 cm starke bituminöse Tragschicht und sehen eine ungebundene Tragschicht sowie Frostschuttschicht bis in 90 cm Tiefe vor. In der vorliegenden Studie werden die Werte von Dorsch Consult [2006] herangezogen, jedoch wird angenommen, dass die Frostschuttschicht bis in eine Tiefe von 110 cm reicht. Damit soll sichergestellt werden, dass auch Flughäfen in Frosteinwirkungszone 2 und 3 abgedeckt werden (siehe Tabelle 29).

Unter den **sonstigen Flächen** werden alle weiteren versiegelten Flächen an den Flughäfen verstanden. Dazu gehören beispielsweise die Parkplätze einschließlich der privaten Verbindungsstraßen. Da keine Detailinformationen zum Aufbau dieser Flächen vorliegen wurde in der vorliegenden Studie angenommen, dass die Bauweise der von Kreisstraßen (Bauklasse 3) entspricht und diese Flächen asphaltiert sind. Demnach liegt die Stärke der Deck- und Bindschicht bei 8 cm, die der Tragschicht bei 10 cm (Asphalt) und die der ungebundene Tragschicht bei 20 cm. Zudem wird von einer Frostschuttschicht mit einer mittleren Stärke von rund 14 cm ausgegangen (vergleiche Kapitel 3.1).

Die in der vorliegenden Studie veranschlagten Materialien und Schichtdicken der verschiedenen betrachteten Flächen und Deckschichttypen sind in Tabelle 29 ausgewiesen.

Tabelle 29: Schichtdicken der Verkehrsflächen der Flughäfen nach Deckschichttyp und Material

Deckschichttyp	Deck- & Bindeschicht		Tragschicht		Frostschutzschicht
	Beton	Asphalt	Beton	Asphalt	Kies
	cm	cm	cm	cm	cm
Start- und Landebahnen					
Beton	30		45		35
Asphalt		12		63	35
Beton/Asphalt		12	80	13	5
Flugbetriebsflächen					
Beton	36		20		54
Asphalt		12	20	18	60
Schulterflächen					
Asphalt		4		10	96
Sonstige Flächen					
Asphalt		8		10	34

Quellen: [Dorsch Consult 2006; Eisenmann/ Leykauf 2003; Kreide 2004]

Die **Lebensdauer** der Flugbetriebsflächen beziffern Dorsch Consult [2006] mit 20 Jahren. Grundsätzlich werden jedoch die Deckschichten häufiger erneuert als die darunterliegenden Trag- und Frostschutzschichten. Dies erfolgt bei der Start- und Landebahn Süd des Flughafens Frankfurt am Main beispielsweise sukzessive in 15 m Abschnitten im laufenden Betrieb in den Nachtstunden [Baublatt 2006]. Auch bei der Erneuerung der Start- und Landebahn Schönefeld wurde allein eine 12 cm starke Asphalttschicht erneuert [Kreide 2004].

In der vorliegenden Studie wird deshalb für die Deckschicht der Start- und Landebahn sowie Flugbetriebsflächen unabhängig vom Baumaterial eine Lebensdauer von 20 Jahren veranschlagt. Für die Tragschicht und Frostschutzschicht werden hingegen 40 Jahre angenommen. Hinsichtlich der Lebensdauer der wenig beanspruchten Schulterflächen wurde davon ausgegangen, dass diese denen der Flugbetriebsflächen entspricht. Die sonstigen Flächen orientieren sich hingegen an den für den Straßenverkehr veranschlagten Lebensdauern aus Kapitel 3.1.

Für die Materialaufwände für die **Instandhaltung** der Deckschicht liegen keine Daten vor, nach strengen Wintern müssen die Frostschäden in Asphaltdeckschichten jedoch ausgebessert werden. Im Weiteren wird angenommen, dass dafür jährlich 0,1 % der Materialmenge der Deckschicht erneuert werden muss.

Aus den in Tabelle 29 aufgezeigten Schichtdicken unter Berücksichtigung der Lebensdauern der Schichten ergeben sich die in Tabelle 30 aufgeführten Materialverbräuche durch Bau und Unterhalt der versiegelten Flächen.

Tabelle 30: Materialverbrauch für Bau und Unterhalt der versiegelten Flächen differenziert nach Flächen- und Deckschichttyp

Deckschichttyp	Beton	Asphalt	Kies
	m ³ /(m ² a)	kg/(m ² a)	kg/(m ² a)
Start- und Landebahnen			
Beton	0,027		11,1
Asphalt		54,7	11,1
Beton/Asphalt	0,020	23,4	1,6
Flugbetriebsflächen			
Beton	0,023		17,1
Asphalt		26,6	19,0
Schulterflächen			
Asphalt		11,4	30,4
Sonstige Flächen			
Asphalt		18,5	11,7

Quellen: eigene Berechnungen

Errichtungsaufwand und Materialtransporte

Neben den Materialverbräuchen ergeben sich auch CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die **Baustellenenergie** und die **Materialtransporte** der asphaltierten und betonierten Flächen. Diese wurden in der vorliegenden Studie anhand der Energieverbräuche und Transporte beim Straßenbau aus Spielmann et al. [2007] abgeleitet (siehe Kapitel 3.1) und sind in Tabelle 31 aufgeführt.

Für die Start- und Landebahn und sonstige Flächen mit Verkehrslasten durch Luftfahrzeuge oder Flugzeugschlepper wurden dabei die Verbrauchswerte und Materialtransporte für die Autobahnen herangezogen und auf die Fläche bezogen. Da die Schichtdicken bei Start- und Landebahn wesentlich größer sind als bei einer Autobahn, wurde angenommen, dass die Aufwendungen in diesem Fall doppelt so groß sind. Bei den Flugbetriebsflächen hingegen wurden die Verbräuche und Transportleistungen ohne Anpassungen von den Autobahnen übernommen. Für die Schulterstreifen wurden die Verbrauchswerte der Klasse 3 Straßen, für die sonstigen Flächen die der Klasse 2 Straßen veranschlagt.

Tabelle 31: Energieverbrauch, Aushub und Materialtransporte für die Herstellung der versiegelten Flächen eines Flughafens pro Jahr

	Einheit	Start- & Landebahn	Flugbetriebsflächen	Schulterflächen	sonstige Flächen
Strom	MJ/(m ² a)	8,6	4,3	0,5	0,4
Diesel	MJ/(m ² a)	16,7	8,3	5,2	5,8
Aushub	M ³ /(m ² a)	0,17	0,09	0,02	0,03
Materialtransport	tkm/(m ² a)	1,4	0,7	0,5	0,6

Quelle: Berechnung des Öko-Instituts; [Spielmann et al. 2007]

Bau von Terminals und sonstigen Gebäuden

Zur Bilanzierung der Gebäude wurde der in Kapitel 2.1 beschriebene vereinfachte Ansatz gewählt. Dieser wurde bereits in Schmied/Mottschall [2013] zur Bilanzierung der Bahnhöfe herangezogen. Dabei werden die Materialien Beton und Bewehrungsstahl berücksichtigt, die sich durch einen hohen Materialanteil und eine hohe Relevanz bezüglich der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen auszeichnen. Zur Ermittlung der benötigten Mengen an Beton und Stahl wurde vereinfachend angenommen, dass die Grundfläche des Gebäudes aus einer 1 m starken Betonschicht und die Decken- und Geschossflächen aus 0,2 m starken Betonschichten bestehen. Bei Decken- und Geschossflächen wird weiterhin unterstellt, dass pro Quadratmeter rund 480 kg Beton und 16 kg Stahl verbaut wurden (Massenanteil des Stahls: 3,2 %). Bei der Bodenplatte wurde hingegen von einem geringeren Stahlanteil ausgegangen (1,6 %) [Buchert et al. 2004].

Auf den Flughäfen gibt eine sehr große Anzahl von Gebäuden, die sehr unterschiedlich ausgeführt sein können, wie beispielsweise großräumige Terminals, Hangars oder Verwaltungsgebäude. Eine genaue Analyse hierzu wurde aufgrund des hohen Aufwandes bei gleichzeitig relativ geringer Relevanz nicht durchgeführt und es wurde allein zwischen Terminals und sonstigen Gebäuden unterschieden, wobei bei den Terminals von drei und den sonstigen Gebäuden von vier Stockwerken ausgegangen wurde. Zur Bestimmung der jährlichen Materialmengen wurde analog zu Schmied/Mottschall [2013] von einer Lebensdauer von 60 Jahren ausgegangen und in einer Sensitivität eine Lebensdauer von 100 Jahren betrachtet.

Da keine Angaben zu den jährlichen Materialaufwänden von Instandhaltungsmaßnahmen vorlagen, konnten diese im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Neben den verbauten Materialien wurden auch die Materialtransporte zur Baustelle berücksichtigt. Die Transportdistanzen wurden analog zu Schmied/Mottschall [2013] angesetzt. Beton wird demnach über eine Strecke von 20 km mit einem Lkw mit zGG größer 26 t, Stahl hingegen über eine Entfernung von 300 km mit der Bahn transportiert.

Die sich daraus ergebenden Materialverbräuche und Verkehrsleistungen sind in Tabelle 32 aufgeführt.

Tabelle 32: Verbrauch an Beton und Stahl sowie Materialtransporte für den Bau der Flughafengebäude

	Einheit	Terminals	Sonstige Gebäude
Lebensdauer 60 Jahre			
Beton	m ³ /(m ² a)	0,027	0,030
Bewehrungsstahl	kg/(m ² a)	1,4	1,7
Materialtransporte Lkw	tkm/(m ² a)	0,4	0,5
Materialtransporte Bahn	tkm/(m ² a)	1,3	1,4
Lebensdauer 100 Jahre			
Beton	m ³ /(m ² a)	0,016	0,018
Bewehrungsstahl	kg/(m ² a)	0,8	1,0
Materialtransporte Lkw	tkm/(m ² a)	0,3	0,3
Materialtransporte Bahn	tkm/(m ² a)	0,8	0,9

Quelle: eigene Berechnungen

Herleitung der Gesamtflächen

Zur Berechnung der gesamten CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Materialverbräuche und die Errichtungsaufwendungen müssen die in Tabelle 30, Tabelle 31 und Tabelle 32 dargestellten, auf die Fläche bezogenen Werte mit den Flächendaten der 26 ausgewählten Flughäfen und mit den Emissionsfaktoren aus Tabelle 86 für die Materialien und Tabelle 89 für die Energieverbräuche verknüpft werden.

Die Flächen der **Start- und Landebahnen** der 26 ausgewählten Flughäfen wurden anhand der Detailinformationen der Internetseite www.airports.de [Airports 2012] zusammengestellt und sind einschließlich der Materialien des Oberbaus (Beton oder Asphalt) in Tabelle 114 im Anhang dokumentiert.

Insgesamt beträgt die Fläche der Start- und Landebahnen an den ausgewählten Flughäfen rund 5,1 Millionen m², wobei es sich bei einem Großteil davon um Betonbahnen handelt (51 %). 36 % der Fläche entfällt auf Asphaltbahnen und 13 % auf Start- und Landebahnen, die über einen Asphalt/Beton Oberbau verfügen (siehe Tabelle 33). Eine durchschnittliche Start- und Landebahn besitzt demnach eine Fläche von rund 131.000 m².

Tabelle 33: Gesamtfläche der Start- und Landebahnen der ausgewählten Flughäfen nach der Art der Deckschicht

Deckschichttyp	Fläche
	m ²
Beton	2.611.698
Asphalt	1.835.556
Beton/ Asphalt	680.421

Quelle: [Airports 2012]

De Neufville und Odoni [2003] geben eine Übersicht über die Breite von **Schulterflächen** an unterschiedlich breiten Start- und Landebahnen. Für die Start- und Landebahnen mit einer Breite von 30 m oder darüber liegt die Breite des Schulterstreifens bei jeweils 20 % der Breite der Start- und Landebahn. Die Fläche der Schultern entspricht demnach 40 % der Fläche der Start- und Landebahnen und beträgt damit 2.051.070 m².

Die Herleitung der Größe der **Flugbetriebsflächen, sonstigen Flächen** sowie **Flächen der Terminals** und **sonstigen Gebäuden** erfolgt zum einen auf Basis von in den Umwelt- und Nachhaltigkeitsbericht aufgeführten Angaben zu den versiegelten Flächen der Flughäfen (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Versiegelte Fläche ausgewählter Flughäfen

Flughafen	Versiegelte Fläche m ²	Quelle
Dortmund	550.000	FDG 2012
Dresden	800.000	Dresden Int. 2010
Frankfurt/Main	8.910.000	Fraport 2011
Friedrichshafen	345.210	GGs 2006
Hamburg	1.600.000	FHG 2011
Hannover	1.200.000	FHLG 2010
Köln/Bonn	3.500.000	FKBG 2012
München	6.280.000	FMG 2009
Stuttgart	2.000.000	FSG 2010

Daneben wurde anhand von Luftbildern auf der Internetseite „Google Maps“¹³ die Größe der verschiedenen Flächen (Flugbetriebsflächen, sonstige Flächen, Terminals und sonstige

¹³ Siehe www.maps.google.de

Gebäude) abgeschätzt. Dafür wurden die Luftbilder in hoher Auflösung aus Einzelbildern zusammengesetzt und die Flächen mit dem Programm Adobe Acrobat Pro markiert und ausgelesen. Tabelle 35 fasst die Ergebnisse für diese Abschätzung zu den verschiedenen Flächen zusammen.

Tabelle 35: Rechercheergebnisse zu Gebäudeflächen, Flugbetriebsflächen und sonstigen Flächen für ausgewählte Flughäfen

Flughafen	Sonstige Gebäude	Terminals	Flugbetriebsflächen	Sonstige Flächen
	m ²	m ²	m ²	m ²
Berlin-Schönefeld	70.400	28.600	620.100	83.900
Berlin-Tegel	73.500	36.700	801.100	62.900
Hahn	109.500	44.700	403.300	155.000
München	480.800	145.100	3.238.500	277.700
Nürnberg	98.500	35.000	393.300	124.900
Saarbrücken	22.500	10.000	157.100	28.200
Stuttgart	162.200	42.200	1.167.600	79.200

Quelle: Abschätzung des Öko-Instituts anhand von Luftbildern von Google Maps“

Für die Flughäfen München und Stuttgart liegen sowohl Angaben aus den Nachhaltigkeitsberichten als auch anhand von Luftbildern abgeschätzte Werte vor. Es zeigt sich, dass die publizierten Werte von den gemessenen Werten (unter Berücksichtigung von den Flächen der Start- und Landebahnen sowie der Schulterflächen) abweichen (München +30 %, Stuttgart -10 %). In diesen Fällen wurden für die Gesamtfläche die publizierten Werte veranschlagt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Gebäudeflächen korrekt bestimmt wurden und die Fehler bei den Flugverkehrsflächen sowie den sonstigen Flächen auftreten, da diese Bereiche bei der Abschätzung schwierig zuzuordnen sind.

Anhand der Luftbilder wurden die in Tabelle 36 aufgeführten durchschnittlichen, nach den erbrachten Verkehrseinheiten gewichteten Flächenanteile ermittelt und auf die gesamte versiegelte Fläche bezogen. Teilweise waren einzelne Größen aus den Nachhaltigkeits- und Umweltberichten bekannt, diese wurden dann berücksichtigt.

Tabelle 36: Durchschnittlicher Anteil der verschiedenen Flächentypen an der gesamten versiegelten Fläche der Flughäfen

Start- und Landebahn sowie Schulterflächen	Terminals	sonstige Gebäude	Flugverkehrsflächen	Sonstige Flächen
%	%	%	%	%
15,4%	2,7%	7,7%	63,8%	10,4%

Quelle: eigene Berechnungen

Insgesamt wurden durch diese Vorgehensweise die verschiedenen Flächen von 14 Flughäfen bestimmt. Diese decken jedoch einen Großteil der erbrachten Verkehrseinheiten ab (85 %). Anhand dieses Wertes wurden die Ergebnisse skaliert, um die gesamten CO₂- und CO₂-Äquivalentemissionen zu erhalten.

Insgesamt führt der Bau und Unterhalt der Luftverkehrsinfrastruktur zu Emissionen in Höhe von 322.791 Tonnen CO₂ bzw. 335.435 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr. Davon entfallen rund 99 % der Emissionen auf den Bau der Infrastruktur und rund 1 % auf die Instandhaltung, wobei diese bei den Gebäuden nicht berücksichtigt wurde. Bild 17 zeigt die Anteile der verschiedenen Baumaterialien, Baustellenaufwendungen und Materialtransporte sowie die Anteile der Verursachergruppen an den CO₂-Äquivalent-Emissionen.

Den größten Einfluss auf die jährlichen Emissionen besitzt Beton mit rund 200.000 Tonnen pro Jahr, gefolgt von Asphalt (rund 70.500 Tonnen pro Jahr). Die Materialien Stahl und Kies besitzen hingegen mit 2 % bzw. 1 % eine geringe Rolle (8.500 bzw. 2.500 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr). Die Baustellenaufwendungen, also der auf der Baustelle entstehende Strom- und Dieserverbrauch sowie die Emissionen durch Erdarbeiten führen zu 15 % bzw. rund 49.000 Tonnen der CO₂-Äquivalent-Emissionen. Bei den Verursachergruppen stechen die Flugverkehrsflächen mit rund 202.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten (60 %) und die Flächen der Start- und Landebahnen hervor mit rund 68.000 Tonnen (20 %). Die Gebäude verursachen 13 % der Emissionen (Terminals rund 10.000 Tonnen und sonstige Gebäude rund 33.500 Tonnen). Bau und Unterhalt der sonstigen Flächen führen zu rund 15.000 Tonnen und der Schulterflächen zu rund 6.500 Tonnen CO₂-Äquivalenten.

Anteile an den CO₂-Äquivalent-Emissionen

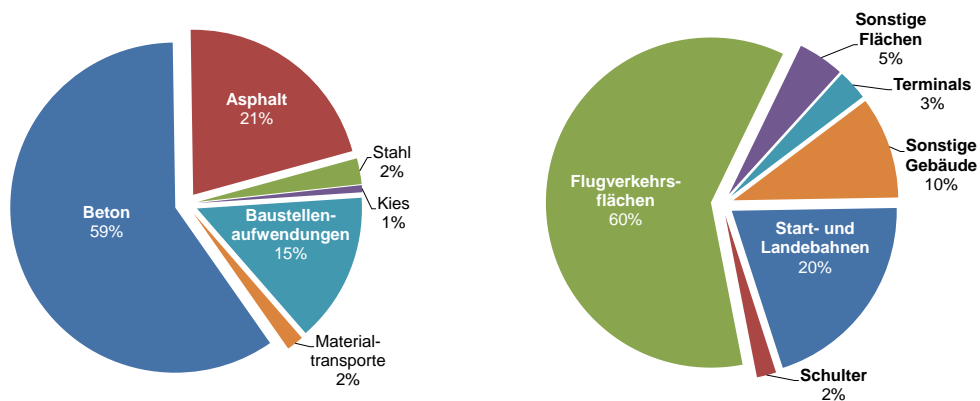


Bild 16: CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau- und Unterhalt der Flughäfen nach Baumaterial/Bauaufwendungen bzw. nach Verursacherguppen [eigene Berechnungen]

In einer Sensitivität soll betrachtet werden, wie es sich auswirkt, wenn für die Lebensdauer der Gebäude und dem Unterbau der sonstigen Flächen 100 statt 60 Jahren veranschlagt werden. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen liegen dann mit rund 318.000 Tonnen pro Jahr etwa 5 % niedriger.

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, werden die errechneten CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen auf Basis der Verkehrseinheiten den Flügen in der TREMOD-Entfernungskategorie zugerechnet und innerhalb dieser Kategorien auf Basis der erbrachten Verkehrsleistung auf Passagiere und Fracht allokiert. Die auf die Verkehrsleistung bezogenen spezifischen CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen sind in Tabelle 37 aufgeführt. Bei innerdeutschen Flügen werden durch Bau und Instandhaltung der Luftverkehrsinfrastruktur zwischen 5,2 und 7,5 g CO₂-Äquivalente pro Pkm verursacht. Bei internationalen Flugreisen liegen die spezifischen Emissionen zwischen 0,2 und 7,7 g CO₂-Äquivalenten pro Pkm, wobei die mittleren Emissionen 1,2 gCO₂-Äquivalente pro Pkm betragen. Die spezifischen Emissionen pro tkm für die Fracht sind jeweils um den Faktor 10 größer als die der Personenverkehrs.

Tabelle 37: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch Bau und Instandhaltung der Luftverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten und Entfernungskategorie

Entfernungskategorie	CO ₂			CO ₂ e		
		PV	GV		PV	GV
	t/a	g/Pkm	g/tkm	t/a	g/Pkm	g/tkm
Innerdeutsche Flüge	73.748	6,6	66	76.637	6,9	69
bis 500 km	58.498	7,2	72	60.790	7,5	75
größer 500 km	15.250	5,0	50	15.847	5,2	52
Grenzüberschreitende Flüge	249.043	0,9	9	258.798	1,0	10
bis 500 km	20.651	7,4	74	21.460	7,7	77
größer 500 bis 1.000 km	62.127	3,8	38	64.561	3,9	39
größer 1.000 bis 2.000 km	64.827	1,9	19	67.366	2,0	20
größer 2.000 bis 5.000 km	45.065	0,8	8	46.830	0,9	9
größer 5.000 bis 10.000 km	54.108	0,4	4	56.228	0,4	4
größer 10.000 km	2.265	0,2	2	2.354	0,2	2
Insgesamt	322.791	1,2	12	335.435	1,2	12

Quelle: eigene Berechnungen

4.2 Betrieb der Verkehrsinfrastruktur

Die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Betriebes der Luftverkehrsinfrastruktur werden aus den Energieverbräuchen der Flughäfen berechnet. Als Datenquelle werden Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte der ausgewählten Flughäfen herangezogen. Zwar werden in den Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsberichten der Flughäfen häufig auch die CO₂-Emissionen ausgewiesen. Da sich die Basisemissionsfaktoren z. B. für Strom und die Kraftstoffe von denen in der vorliegenden Studie unterscheiden, wurden auf Basis der Energieverbrauchsangaben die Treibhausgas-Emissionen erneut berechnet.

Neben den Energieverbräuchen (Strom, Kälte und Wärme) der Gebäude wie z. B. der Terminals oder Bürogebäude führen die für die Flugzeugabfertigung benötigten Fahrzeuge (bspw. Flugzeugschlepper, Gepächtschlepper und Flughafenbusse) zu Kraftstoffverbräuchen. Tabelle 38 zeigt die Energieverbrauchswerte von insgesamt neun der 26 ausgewählten Flughäfen. Nicht enthalten sind Kerosinverbräuche der Flugzeuge.

Tabelle 38: Energieverbrauch ausgewählter Flughäfen im Jahr 2008

Flughafen	Strom ²⁾	Wärme ³⁾	Fernkälte	Kraftstoffe ⁴⁾
	MWh	MWh	MWh	MWh, l bzw. t CO ₂
Berlin-Schönefeld	26.421	46.791		5.822 t CO ₂
Berlin-Tegel	39.247	43.614		
Frankfurt/Main	315.900	197.700	111.100	107.444
Friedrichshafen	2.859	2.748		1.296
Hamburg ¹⁾	34.215	122.928		1.223.641 l
Hannover	26.857	85.070		458.447 l
München	117.999	346.088		54.200
Münster/Osnabrück	9.633	7.976		474 t CO ₂
Stuttgart	47.800	37.700		1.680.000 l

1) Zusätzlich 188.170 kg CNG bei den Kraftstoffen; 2) Einschließlich Strom zur Kälteerzeugung, jedoch ohne selbst erzeugtem Strom. 3) Beinhaltet Heizöl, Erdgas und Fernwärme. 4) Diesel, Benzin; Erdgas, Biogas und Flüssiggas.

Quellen: [BBF 2010], [FFG 2009], [FHG 2011], [FHLG 2010], [FMG 2009], [FMOG 2009], [Fraport 2011], [FSG 2010], eigene Berechnungen

Für den Bereich „Kraftstoffe“ liegen für die Berliner Flughäfen sowie für den Flughafen Münster/Osnabrück lediglich Angaben zu den CO₂-Emissionen vor. In diesen beiden Fällen wurden die Werte übernommen und anhand der in der vorliegenden Studie verwendeten Emissionsfaktoren um die Emissionen der Vorkette ergänzt.

Die Trennung in die verschiedenen Bereiche findet in der Realität so nicht statt, da teilweise in Blockheizkraftwerken sowohl Strom als auch Gas erzeugt werden (bspw. in Hamburg). In diesem Fall sind die Emissionen dem Bereich Wärme zugerechnet.

Bild 17 stellt die Verteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen auf die verschiedenen Verursacherguppen dar. Mit rund 57 % trägt der Stromverbrauch der Flughäfen am meisten zu den Treibhausgasemissionen bei. Der Bereich „Heizung“ verursacht rund ein Drittel der CO₂-Äquivalent-Emissionen. Der Kraftstoffverbrauch der Vorfeldmobilität ist für 9 % und der Fernkältebezug für 2 % der Emissionen verantwortlich.

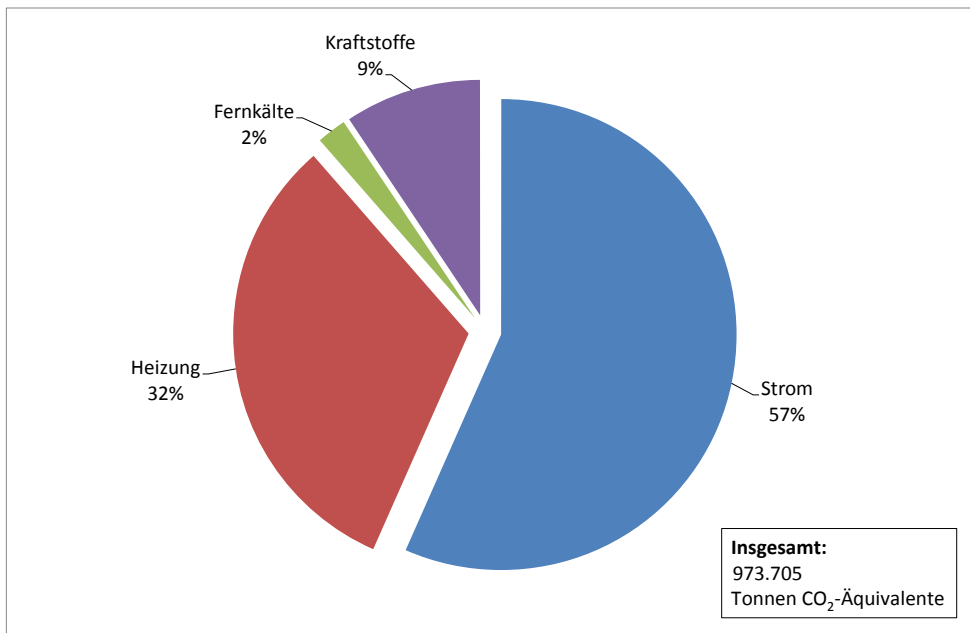


Bild 17: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Flughafenbetrieb im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen]

Die in der Tabelle 39 aufgeführten CO₂-Emissionen weichen von den in den jeweiligen Umweltberichten publizierten Werten ab. Dies liegt insbesondere an den unterschiedlichen Emissionsfaktoren für elektrische Energie. Während die vorliegende Studie mit dem deutschen Durchschnittsmix rechnet, verwenden die Flughäfen in der eigenen Bilanzierung häufig die Emissionsfaktoren aus der jeweiligen Stromkennzeichnung. Die von den Flughäfen verwendeten Emissionsfaktoren können über den in dieser Studie veranschlagten Faktoren (CO₂: 613,9 g/kWh; CO₂e: 639,6 g/kWh) liegen (bspw. bei den Berliner Flughäfen mit rund 662 gCO₂/kWh¹⁴), andere Flughäfen wie beispielsweise der Flughafen München verwenden dagegen niedrigere Emissionsfaktoren (590 gCO₂/kWh).

Im Mittel ergeben sich Emissionen in Höhe von 4,1 kg CO₂ bzw. 4,3 kg CO₂-Äquivalente pro Verkehrseinheit. Diese spezifischen Werte liegen auch deshalb über den von den Flughafenbetreibern genannten Werten (bspw. Frankfurt 2,86 kg/VE, Hamburg 2,72 kg/VE), da in diesen Werten nicht allein der Eigenverbrauch der Flughafenbetreiber berücksichtigt wird, sondern auch die Verbräuche von Dritten am Flughafen, wie beispielsweise Flughafenbetreiber-fremde Bodenverkehrsdienste oder Ladengeschäfte enthalten sind.

¹⁴ Die Emissionsfaktoren der Flughäfen wurden rechnerisch aus den in den Berichten publizierten Emissionen und Verbrauchszahlen ermittelt.

Tabelle 39: Gesamte und spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen für ausgewählte Flughäfen in 2008

Flughafen	CO ₂	CO ₂ e	CO ₂	CO ₂ e
	Tonnen/a	Tonnen/a	kg/VE	kg/VE
Berlin-Schönefeld	28.649	30.639	4,3	4,6
Berlin-Tegel	37.984	40.220	2,6	2,8
Frankfurt/Main	291.264	303.271	4,0	4,1
Friedrichshafen	2.846	2.977	4,6	4,8
Hamburg	52.974	57.345	4,0	4,4
Hannover	37.172	40.213	6,6	7,1
München	161.548	172.923	4,4	4,7
Münster/Osnabrück	8.196	8.668	5,4	5,7
Stuttgart	42.644	44.931	4,2	4,5
Insgesamt	663.278	701.188	4,1	4,3

Quelle: eigene Berechnungen

Auf den in Tabelle 39 ausgewerteten Flughäfen werden rund 72 % der Verkehrseinheiten abgewickelt. Die fehlenden 28 % werden mit den durchschnittlichen spezifischen Emissionen veranschlagt. Insgesamt wurden demnach in Deutschland in 2008 Emissionen in Höhe von 921.062 Tonnen CO₂ bzw. 973.705 Tonnen CO₂-Äquivalente durch den Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur verursacht.

Die Allokation der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen erfolgt analog zu Kapitel 4.1: Auf Basis der Verkehrseinheiten werden die Emissionen den TREMOD-Entfernungskategorien zugerechnet, wobei nicht zwischen Gütern und Passagieren unterschieden wird. Innerhalb der Entfernungskategorie erfolgt dann eine Allokation zwischen Gütern und Passagieren anhand der Verkehrseinheiten-Kilometer.

Die höchsten spezifischen Emissionen durch den Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur treten sowohl im innerdeutschen als auch im grenzüberschreitenden Verkehr mit rund 21 g CO₂ bzw. 22 g CO₂-Äquivalenten pro Verkehrseinheit bei den Kurzstrecken unter 500 km auf. Mit zunehmender Flugdistanz nimmt der Einfluss durch den Betrieb der Infrastruktur ab, so dass bei Langstrecken über 5.000 km Emissionen von nur noch rund 1 g pro Verkehrseinheit verursacht werden.

Tabelle 40: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten und Entfernungskategorie

Entfernungskategorie	CO ₂			CO ₂ e		
		PV	GV		PV	GV
	t/a	g/Pkm	g/tkm	t/a	g/Pkm	g/tkm
Innerdeutsche Flüge	210.436	18,9	189	222.463	19,9	199
bis 500 km	166.921	20,6	206	176.461	21,8	218
größer 500 km	43.515	14,3	143	46.002	15,1	151
Grenzüberschreitende Flüge	710.626	2,7	27	751.242	2,8	28
bis 500 km	58.926	21,1	211	62.294	22,3	223
größer 500 bis 1.000 km	177.275	10,7	107	187.408	11,3	113
größer 1.000 bis 2.000 km	184.978	5,5	55	195.550	5,8	58
größer 2.000 bis 5.000 km	128.590	2,4	24	135.939	2,5	25
größer 5.000 bis 10.000 km	154.394	1,0	10	163.218	1,1	11
größer 10.000 km	6.463	0,7	7	6.832	0,7	7
Insgesamt	921.062	3,3	33	973.705	3,5	35

Quelle: eigene Berechnungen

4.3 Herstellung und Wartung der Flugzeuge

Im folgenden Kapitel werden die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen ermittelt, die bei der Herstellung der Flugzeuge entstehen. Dabei werden vereinfachend folgende Flugzeugtypen untersucht:

- Personenverkehr
 - Passagierflugzeug (Inland)
 - Passagierflugzeug (grenzüberschreitend)
- Güterverkehr
 - Frachtflugzeug (Inland)
 - Frachtflugzeug (grenzüberschreitend).

Es werden ausschließlich die Emissionen, die bei der Produktion der eingesetzten Materialien entstehen, berücksichtigt. Verarbeitungsaufwand und Materialtransporte zu den Produktionsstätten werden in dieser orientierenden Stoffstrombilanz nicht berücksichtigt.

Abweichend vom Vorgehen im Kapitel 6.3 werden keine Materialmengen für die Wartung und Instandhaltung beispielsweise bei Revisionen berücksichtigt. Die Emissionen und Energieverbräuche für die Wartung und Instandsetzung sind teilweise in den in Kapitel 4.2 aufgeführten Werten enthalten, sofern die Wartung an den Flughäfen

durchgeführt wird und sich in den Systemgrenzen der Klimabilanzen der Flughafenbetreiber befindet. Letzteres wird beispielsweise bei den Kraftstoffverbräuchen der dafür benötigten Flugzeugschlepper im Gegensatz zu Kerosinverbräuchen der dabei in Betrieb befindlichen Turbinen der Fall sein.

Zur Bilanzierung der CO₂- und CO₂-Äquivalentemissionen durch die Flugzeugherstellung werden einerseits Informationen zur Materialzusammensetzung und andererseits zum Flugzeuggewicht benötigt.

Hinsichtlich der Materialzusammensetzung gingen in der Vergangenheit viele Studien vereinfachend davon aus, dass Flugzeuge zu 90 % aus Kunststoff und zu 10 % aus Aluminium bestehen [Maibach et al 1995; Spielmann et al. 2007; Knörr/Kutzner 2009]. Diese vereinfachte Vorgehensweise stammt aus Maibach et al. [1995] und wird damit begründet, dass der Einfluss aufgrund der hohen Verkehrsleistung vernachlässigbar klein ist. Mit einer aktuellen Ökobilanz eines A330-200 liegen heute jedoch für diesen Flugzeugtyp detaillierte Informationen zur Materialzusammensetzung vor [Lopes 2010]. Diese Materialzusammensetzung bezieht sich auf das Hersteller-Leergewicht (MEW-Manufacturer´s Empty Weight) des Flugzeuges – ständige Einbauten wie beispielsweise die Sitze und die Ausrüstung für das Catering sind unberücksichtigt. Lopes [2010] gibt in der Ökobilanz die Materialmengen der verschiedenen Flugzeugbestandteile an und kommt einschließlich der Turbinen und Fahrwerke auf ein Leergewicht des Flugzeuges von rund 106 Tonnen. Lopes zufolge besteht ein A330-200 zu rund 58 % aus Aluminium, zu 19 % aus Stahl und 9 % aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen (siehe Bild 18). Weitere verwendete Materialien sind Titan (8 %), Nickel (3 %) und Glasfaser-verstärkter Kunststoff (1 %) und sonstige, nicht weiter spezifizierte Materialien (2%).

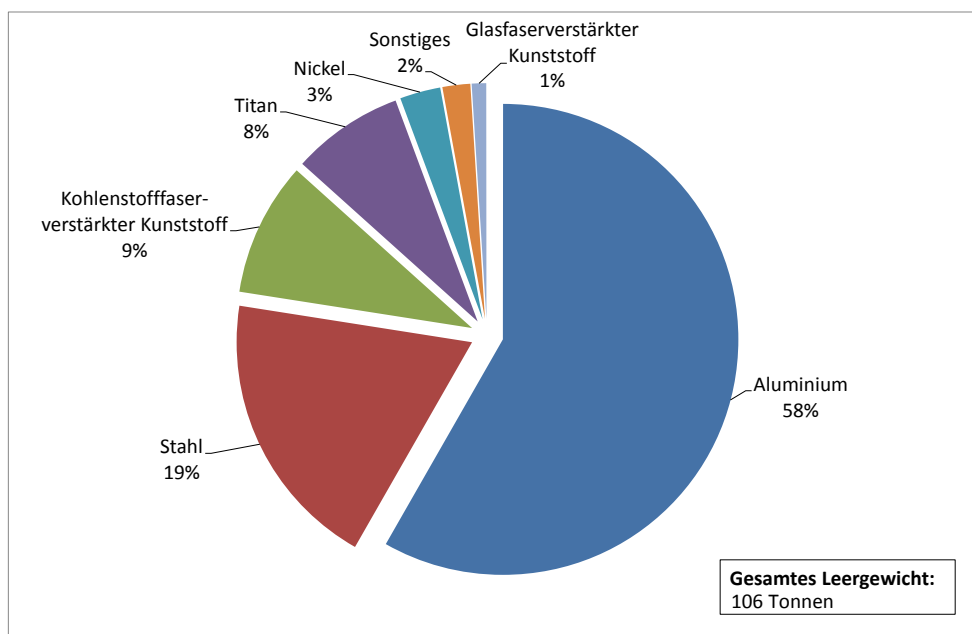


Bild 18: Materialzusammensetzung eines A330-200 [Lopes 2010]

Das Betriebsleergewicht (OWE – Operating Weight Empty) berücksichtigt die ständig eingebaute zusätzliche Ausrüstung. Für den A330-200 gibt Lopes ein OWE von rund 124 Tonnen an, was bedeutet, dass die Materialzusammensetzung von weiteren 18 Tonnen bzw. 17 % bezogen auf das MWE unbekannt ist. In der vorliegenden Studie wird deshalb angenommen, dass die ständigen Einbauten zu 50 % aus Kunststoffen (Polyethylene) und zu 50 % aus Aluminium bestehen.

Die Materialzusammensetzung des A330-200 wird dann auf das Betriebsleergewicht der Flugzeugtypen veranschlagt, die im Jahr 2008 in den oben beschriebenen Kategorien am häufigsten eingesetzt wurden.

Wie aus Tabelle 117 im Anhang hervorgeht, wurden im Jahr 2008 der innerdeutsche Personenverkehr als auch der innerdeutsche Güterverkehr (Fracht und Post) zu einem hohen Anteil (81 % der Pkm, bzw. 68 % der tkm) von Flugzeugen der Startgewichtsklasse 20 bis 75 Tonnen erbracht. Innerhalb dieser Klasse wurde beim Personenverkehr am häufigsten der Airbus A320-200-320 eingesetzt. Der Großteil der innerdeutschen Luftfracht wird als Beifracht transportiert, lediglich rund 19 % der Tonnenkilometer entfallen auf reine Frachtflugzeuge [Destatis 2009b]. Der dabei am häufigsten eingesetzte Flugzeugtyp war in 2008 der Airbus A300 F.

Die Verkehrsleistung im grenzüberschreitenden Luftverkehr wurde in 2008 dagegen mit größeren Flugzeugen der Startgewichtsklasse größer 175 Tonnen erbracht (Passagiere 56 %; Fracht 93 %). Beim Personenverkehr entfiel der größte Anteil davon auf die Boeing B 747-400-744, beim Gütertransport auf die Douglas MD11 F-M1F [Destatis 2009b].

Die Betriebsleergewichte und Kapazitäten dieser Flugzeuge werden den weiteren Berechnungen zu Grunde gelegt. Die Daten für die Auslastungsgrade, geflogene km und

die Lebensdauer wurden einer Studie des IFEU-Institutes entnommen, die im Auftrag des Öko-Institutes durchgeführt wurde [Knörr/Kutzner 2009]. Tabelle 41 fasst die Leistungsmerkmale zusammen.

Tabelle 41: Leistungsmerkmale verschiedener Flugzeugkategorien

	Leergewicht (OWE)	Kapazität	Auslastungsgrad	Jährliche Flug-km	Lebensdauer
	t	Plätze bzw. t	In %	km/a	a
Passagierflugzeug (Inland)	43	164	69%	2.235.000	25
Passagierflugzeug (GrÜb ¹⁾)	179	524	74%	2.235.000	25
Frachtflugzeug (Inland)	79	51	62%	2.235.000	25
Frachtflugzeug (GrÜb)	113	92	67%	2.235.000	25

¹⁾ Flugzeuge für grenzüberschreitende Flüge.

Quelle: [Knörr/Kutzner 2009]; [Aerosup 2012]; [Skyplan 2012];[Boeing 2012]

Während in den Frachtflugzeugen ausschließlich Güter transportiert werden, werden in den Passagierflugzeugen sowohl Güter als auch Passagiere befördert. Die durch die Flugzeugherstellung entstehenden Emissionen müssen in diesem Fall auf Güter und Passagiere allokiert werden. Die Allokation wurde auf Basis der Verkehrseinheiten durchgeführt, dies bedeutet, dass jeder Passagier mit einem Gewicht von 100 kg veranschlagt wurde. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die innerdeutsche Luftfracht zu 81 % [eigene Berechnungen auf Basis von Destatis 2009b] und die internationale Luftfracht im Jahr 2008 zu rund 56 % [Knörr et al. 2010] als Beifracht transportiert wurde. Demnach entfallen 3,8 % der Emissionen der Flugzeugherstellung eines Passagierflugzeugs (Inland) auf die Beifracht. Bei den Passagierflugzeugen (GrÜb) sind es 21,3 %.

Unter Berücksichtigung einer Lebensdauer von 25 Jahren und einer jährlich zurückgelegten Distanz von rund 2,2 Millionen km ergeben sich die in Tabelle 42 aufgeführten CO₂- und CO₂-Äquivalentemissionen pro Pkm bzw. tkm für den Bereich Herstellung der Flugzeuge. Es zeigt sich, dass die Emissionen bezogen auf die Verkehrsleistung sehr niedrig ausfallen. Bei der Passage fallen sowohl beim innerdeutschen Verkehr als auch beim grenzüberschreitenden Verkehr rund 0,03 g/Pkm CO₂-Äquivalente durch die Herstellung der Flugzeuge an.

Für den Bereich Luftfracht zeigt sich hingegen, dass die CO₂-Äquivalentemissionen für den innerdeutschen Verkehr mit 0,23 g/tkm rund 36 % über denen des grenzüberschreitenden Verkehrs liegen (0,17 g/tkm). Wird die Fracht als Beifracht in Passagiermaschinen befördert, liegen die CO₂-Äquivalentemissionen im internationalen Verkehr mit 0,34 g/tkm doppelt so hoch wie im Frachtflugzeug. Für Güterverkehre

innerhalb Deutschlands liegen die Emissionen durch die Flugzeugherstellung im Passagierflugzeug mit 0,34 g/tkm rund 46 % über denen im Frachtflugzeug.

Tabelle 42: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung der Flugzeuge pro Pkm bzw. pro tkm.

	CO ₂		CO ₂ -Äquivalente	
	Passage	Fracht	Passage	Fracht
	g/Pkm	g/tkm	g/Pkm	g/tkm
Passagierflugzeug (Inland)	0,02	0,22	0,03	0,34
Passagierflugzeug (GrÜb ¹⁾)	0,02	0,22	0,03	0,34
Frachtflugzeug (Inland)		0,15		0,23
Frachtflugzeug (GrÜb)		0,11		0,17

1) Grenzüberschreitender Luftverkehr

Quelle: eigene Berechnungen

4.4 Ergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Treibhausgasemissionen für folgende Bereiche des Luftverkehrs ermittelt:

- Bau und Unterhalt der Luftverkehrsinfrastruktur,
- Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur und
- Bau und Unterhalt der Flugzeuge.

Die Allokation zwischen Güter- und Personenverkehr wurde dabei anhand der auf den Flughäfen abgefertigten Verkehrseinheiten durchgeführt, ein Passagier wurde demnach mit 100 kg Fracht gleichgesetzt. Dafür wurde dem Öko-Institut eine Abfrage durch Destatis zur Verfügung gestellt, aus der für jeden der ausgewählten Flughäfen die Anzahl der abgehenden Passagiere, Fracht und Post nach Zielflughafen hervorgingen [Walter 2012]. Anhand dieser Detailinformationen konnten die abgehenden Verkehrseinheiten den TREMOD-Entfernungskategorien zugeordnet werden. Innerhalb dieser Entfernungskategorien erfolgte dann eine Allokation auf Basis der Verkehrsleistung aus TREMOD 5.25, wobei die Passagiere und Fracht in Verkehrseinheiten (VE) umgerechnet wurden (1 Pkm=1 VEkm; 1 tkm=10 VEkm).

Es ist denkbar, dass dieses Vorgehen den Personenverkehr auf Kosten des Güterverkehrs bevorzugt, da beispielsweise die hohen Energieverbräuche der Gepäckförderanlagen oder die Parkplatzflächen gleichmäßig auf Fracht und Passage verteilt wurden. Das Vorgehen ist dennoch am bestmöglichen geeignet, da weder für die Energieverbräuche noch für die Gebäude und Flächen bekannt ist, zu welchen Anteilen sie der Fracht bzw. den Passagieren zuzurechnen sind. Oftmals gibt es auch Überschneidungen wie beispielsweise bei der in Passagiermaschinen transportierten Beifracht.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorangegangenen Betrachtungen zusammengefasst und um die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen des Flugbetriebs ergänzt. Diese werden dem TREMOD-Modell (Version 5.25) entnommen und sind in Tabelle 119 im Anhang dokumentiert.

Tabelle 43 zeigt die Ergebnisse für den Personenverkehr differenziert nach Flügen innerhalb Deutschlands und grenzüberschreitenden Flügen.¹⁵

Für den Personenverkehr innerhalb Deutschlands ergeben sich bei Berücksichtigung aller emissionsrelevanten Bereiche CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 261 g CO₂e/Pkm. Durch den Fahrbetrieb werden dabei 234 g CO₂e/Pkm emittiert. Der Einbezug der Infrastruktur und Fahrzeuge führt somit zu weiteren Emissionen in Höhe von 27 g CO₂e/Pkm. Beim grenzüberschreitenden Luftverkehr beträgt dieser Anteil ca. 4 g CO₂e/Pkm und liegt damit deutlich niedriger als bei innerdeutschen Flügen.

Wie aus Bild 19 deutlich wird, entsteht dieser große Unterschied durch die größeren Streckenlängen bei den internationalen Flügen. Ebenfalls verdeutlicht die Abbildung anschaulich, dass besonders der Betrieb der Flughäfen zu den CO₂-Äquivalent-Emissionen stark beiträgt. Auf Flügen unter 500 km fallen diese Emissionen, die bislang bei Verkehrsmittelvergleichen nicht berücksichtigt werden, mit 9 bzw. 11 % sehr hoch aus. Auf Langstrecken über 5.000 km ist der Beitrag zu den Gesamtemissionen mit rund 1 % eher gering.

¹⁵ Tabelle 121, Tabelle 122 und Tabelle 123 im Anhang zeigen die Detailergebnisse für die einzelnen Entfernungskategorien.

Tabelle 43: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen der Passagierluftfahrt in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge

	Personenverkehr			
	Innerdeutsche Flüge		Grenzüberschreitende Flüge	
	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	255,8	100%	123,1	100%
Flugbetrieb (inkl. Vorkette)	230,2	90%	119,5	97%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	6,6	3%	0,9	1%
Betrieb Infrastruktur	18,9	7%	2,7	2%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,02	0,01%	0,02	0,02%
CO₂-Äquivalente insgesamt	260,5	100%	124,9	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	233,7	90%	121,1	97%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	6,9	3%	1,0	1%
Betrieb Infrastruktur	19,9	8%	2,8	2%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,02	0,01%	0,02	0,02%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

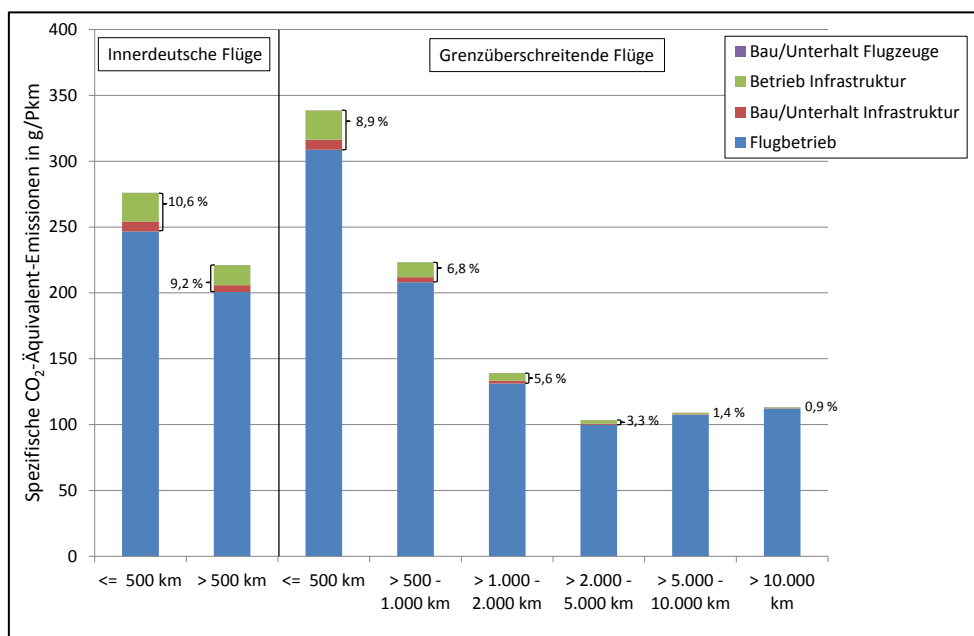


Bild 19: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Flugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Flugzeuge in Deutschland 2008 [TREM0D 5.25; eigene Berechnungen]

Beim Güterverkehr tragen Infrastruktur und Fahrzeuge mit 269 g CO₂-Äquivalenten pro tkm (Innerdeutsche Flüge) bzw. 38 g CO₂-Äquivalenten pro tkm (Grenzüberschreitende Flüge) bei. Die Emissionen des Flugbetriebs in Deutschland erhöhen sich damit von 2.129 g/tkm auf 2.397 g/tkm (siehe Tabelle 44)¹⁶.

Tabelle 44: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen der Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge

	Luftfracht			
	Innerdeutsche Flüge		Grenzüberschreitende Flüge	
	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	2.352,4	100%	931,5	100%
Flugbetrieb (inkl. Vorkette)	2.097,2	89%	895,1	96%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	66,3	3%	9,4	1%
Betrieb Infrastruktur	188,7	8%	26,8	3%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,21	0,01%	0,18	0,02%
CO₂-Äquivalente insgesamt	2.397,4	100%	945,5	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	2.128,8	89%	907,2	96%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	68,9	3%	9,8	1%
Betrieb Infrastruktur	199,5	8%	28,3	3%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,23	0,01%	0,19	0,02%

Quellen: [TREM0D 5.25; eigene Berechnungen]

¹⁶ Die Detailergebnisse für den Güterverkehr sind im Anhang in Tabelle 124, Tabelle 125 und Tabelle 126 dokumentiert.

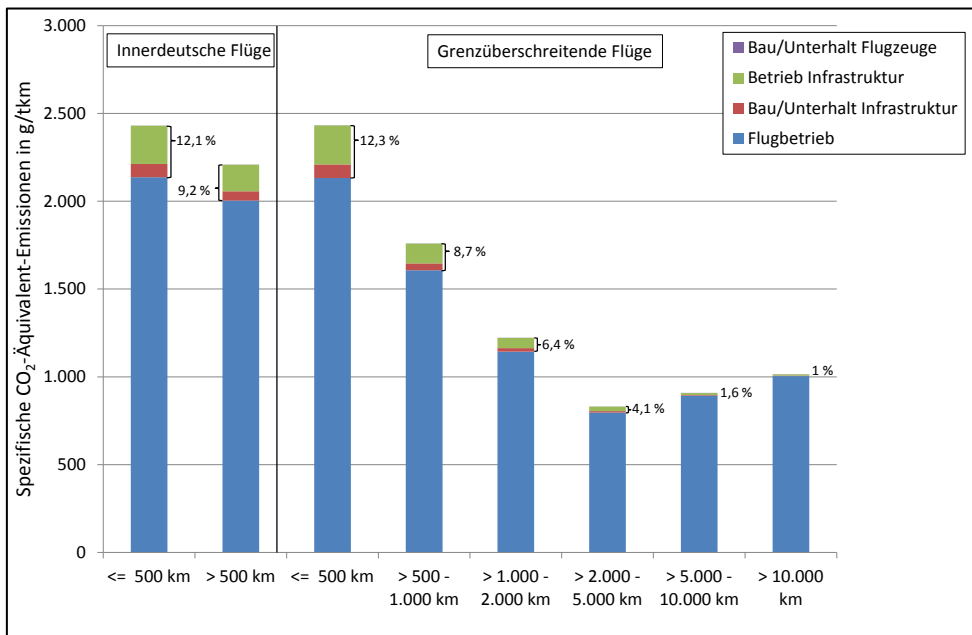


Bild 20: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Flugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Flugzeuge in Deutschland 2008 [TREMOD 5.25; eigene Berechnungen]

Bei den innerdeutschen Flügen entfallen damit 10 bis 11 % der Gesamtemissionen auf die Luftverkehrsinfrastruktur, bei den grenzüberschreitenden Flügen sind es dagegen nur 3 bis 4 %. Der Bau und Unterhalt der Flugzeuge spielen bei allen Verkehrsarten kaum eine Rolle und sind mit 0,01 % bis 0,02 % vernachlässigbar.

Entsprechend dem Vorgehen in Schmied/Mottschall [2013], welches sich an den PCR for Railways [PCR 2009] orientiert, wurde für langlebige Infrastrukturbestandteile wie die Gebäude eine Lebensdauer von 60 Jahren angesetzt. Um den Einfluss einer längeren Lebensdauer zu berücksichtigen, wurde im Rahmen dieser Studie eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, bei der für die Gebäude und den Unterbau der sonstigen Flächen eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen wurde. Bild 21 zeigt die prozentuale Veränderung der Höhe der CO₂-Äquivalent-Emissionen durch eine Lebensdauer der Gebäude von 100 anstatt von 60 Jahren auf die langlebige Infrastrukturbestandteile (-40 %) und auf die gesamten Bereich Bau und Unterhalt der Infrastruktur (-5 %). Wie die Abbildung zeigt, ist der Einfluss auf das Gesamtergebnis für den Personenverkehr gering (0,4 gCO₂e/Pkm innerdeutsche und 0,1 gCO₂e/Pkm grenzüberschreitend), liegt jedoch innerhalb der Größenordnung der Flugzeugherstellung. Gleiches gilt für den Güterverkehr.

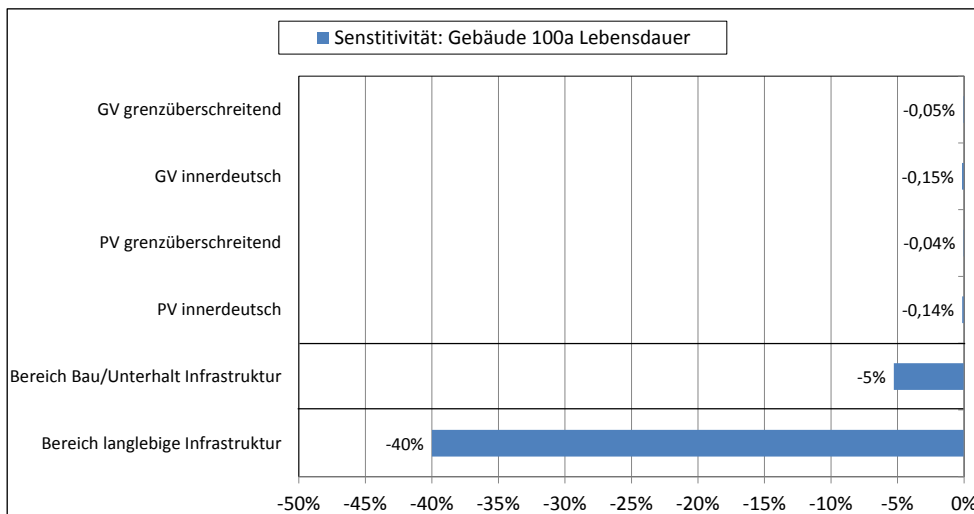


Bild 21: Sensitivitätsanalyse zur Annahme der Lebensdauer bei langlebigen Infrastrukturbestandteilen (100 Jahre gegenüber 60 Jahre) [eigene Berechnungen]

4.5 Klimawirksamkeit in Reiseflughöhe

Beim Luftverkehr besteht eine Besonderheit darin, dass bis auf die Start- und Landephase große Teile des Transports in hohen Höhen durchgeführt werden. Neben den bei der Verbrennung entstehenden CO₂-Emissionen haben die Abgase der Flugzeuge weitere verschiedene Wirkungen auf das Klima. Einige Emissionen und vom Flugverkehr verursachte atmosphärische Prozesse haben einen erwärmenden Effekt (NO_x bzw. daraus entstehendes Ozon, Wasserdampf, Rußpartikel, Kondensstreifen aus Eispartikeln, Bildung zusätzlicher Zirruswolken), wogegen andere Prozesse einen abkühlenden Effekt besitzen (Minderung der Methankonzentration und Emission von Sulfataerosolen). UBA [2012] zufolge dürfte der erwärmende Effekt auf den sog. Strahlungsantrieb überwiegen. Dies spiegelt sich im Radiative Forcing Index (RFI) bzw. Emission Weighting Faktor (EWF) wieder, der sich auf die flugverkehrsbedingten CO₂-Emissionen bezieht. In der vorliegenden Studie wurde diese höhere Klimawirksamkeit bislang nicht berücksichtigt. In einer Sensitivitätsanalyse wird in diesem Kapitel jedoch betrachtet, wie sich eine Berücksichtigung eines EWF von 2,4 auf die Ergebnisse auswirkt. Der Wert von 2,4 entspricht den Standardeinstellung des TREMOD-AV Modells, wobei die Verwendung eines EWF optional ist. Der Faktor von 2,4 wird auf die direkten CO₂-Emissionen in hohen Höhen ab 9.000 m angewendet. Bezogen auf die gesamten direkten CO₂-Emissionen ergibt sich dadurch ein entfernungsabhängiger Wert, der bei Langstrecken größer ist als bei Kurzstreckenflügen, da bei Langstrecken ein größerer Anteil der gesamten direkten CO₂-Emissionen auf Reiseflughöhe emittiert werden. Bezogen auf die gesamten direkten CO₂-Emissionen des Flugverkehrs liegen die Emissionen dann doppelt so hoch [Knörr et al. 2010].

Bild 22 zeigt die Veränderung gegenüber den oben dargestellten Ergebnissen auf den Flugbetrieb sowie auf die gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen, die sich unter

Berücksichtigung des EWF von 2,4 ergeben. Für den Flugverkehr innerhalb Deutschlands liegen die gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen rund 1 % (Güterverkehr) und 4 % (Personenverkehr) höher. Wesentlich größer ist der Einfluss auf die grenzüberschreitenden Flüge, bei denen die Emissionen im Mittel um rund 90 % (Personenverkehr) bzw. 102 % (Güterverkehr) höher ausfallen als ohne Berücksichtigung des EWF.

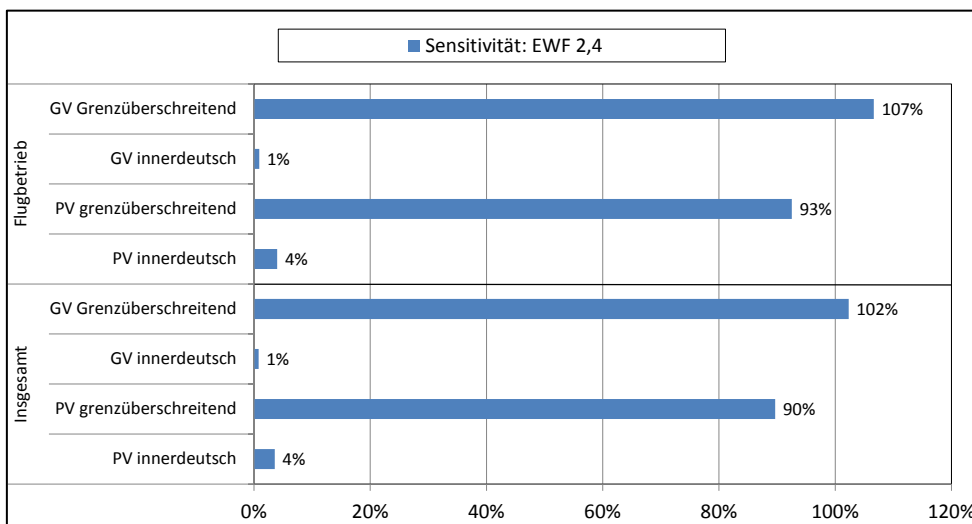


Bild 22: Sensitivitätsanalyse zur Berücksichtigung eines EWF von 2,4 [eigene Berechnungen]

Die Ergebnisse für den Personenverkehr unter Berücksichtigung der höheren Klimawirksamkeit sind in Bild 23 dargestellt. Insgesamt ergeben sich für den innerdeutschen Personenverkehr CO₂-Äquivalent-Emissionen von 270 g/Pkm. Bei grenzüberschreitenden Flügen liegen die Gesamtemissionen in diesem Fall mit 237 g CO₂-Äquivalenten pro Pkm rund 90 % über der vorangegangenen Betrachtung ohne einen EWF. Da die Gesamtemissionen durch den EWF zunehmen, sinkt der Einfluss von Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur und der Fahrzeuge. Bild 23 zeigt deutlich, dass insbesondere bei Langstreckenflügen die Entscheidung, ob ein EWF-Faktor berücksichtigt wird bzw. wie hoch dieser Faktor angesetzt wird, einen wesentlich größeren Einfluss auf das Gesamtergebnis besitzt als die Berücksichtigung von Infrastruktur und Flugzeugherstellung. Bei kürzeren Flugdistanzen bis 1.000 km hingegen besitzen sowohl EWF als auch Herstellung, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur mit insgesamt 9 % bis 34 % einen großen Anteil an den CO₂-Äquivalent-Emissionen.

Die Ergebnisse für den Güterverkehr entsprechen denen des Personenverkehrs und sind im Anhang in Tabelle 126 dokumentiert.

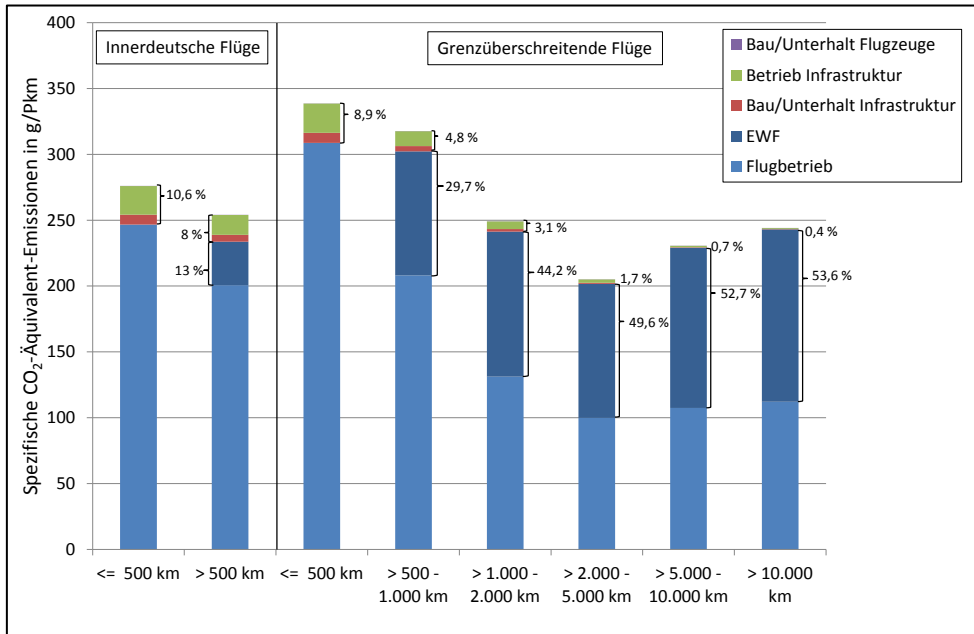


Bild 23: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Flugbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Flugzeuge in Deutschland 2008 unter Berücksichtigung eines EWF von 2,4 [TREMOD 5.25; eigene Berechnungen]

5 Binnenschifffahrt

Die Binnenschifffahrt findet in Deutschland auf staugeregelten, freifließenden natürlichen Gewässern und auf Kanälen statt, die im Weiteren als Binnenwasserstraßen bezeichnet werden. Bau, Instandhaltung sowie Betrieb dieser Wasserstraßen sowie der Binnenschiffe führen zu CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen, welche in Verkehrsmittelvergleichen bislang oftmals unberücksichtigt bleiben.

Eine Besonderheit für den Bereich der Binnenschifffahrt liegt darin begründet, dass es sich bei der Infrastruktur nicht allein um eine Verkehrsinfrastruktur handelt, sondern dass die Wasserstraßen eine Reihe von verkehrsfremden Funktionen erfüllen. Die Wasserstraßen werden beispielsweise zur Be- und Entwässerung, als Vorfluter und zur Energiegewinnung genutzt. Diese Funktionen werden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zum Straßen- Schienen und Luftverkehr ist es bei der Binnenschifffahrt auch schwierig, den Personenverkehr durch die Fahrgastschifffahrt sinnvoll zu berücksichtigen. Zum einen liegt dafür keine geeignete Datengrundlage vor, zum anderen bestehen Abgrenzungsprobleme zu anderen Nutzungsformen (z. B. Freizeitnutzung, Nutzung für den Wassersport). In der vorliegenden Studie wird deshalb keine Allokation der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen auf die verschiedenen Nutzungsformen durchgeführt. Es wird angenommen, dass die Emissionen allein durch den Güterverkehr entstehen. Die Ergebnisse für den Bereich Binnenschifffahrt besitzen aus diesem Grund einen orientierenden Charakter.

Im Folgenden wird in Kapitel 5.1 untersucht, wie hoch die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Binnenschifffahrtsinfrastruktur ausfallen. Kapitel 5.2 betrachtet den Betrieb der Infrastruktur und Kapitel 5.3 untersucht die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung der Binnenschiffe. Die Ergebnisse für den Bereich Binnenschifffahrt werden in Kapitel 5.4 dargestellt.

5.1 Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur

Zur Berechnung der CO₂-Emissionen bzw. der CO₂-Äquivalent-Emissionen durch Bau und Unterhalt der Binnenschifffahrtsinfrastruktur werden im Folgenden die notwendigen Materialmengen und -transporte betrachtet und mit den in Tabelle 86 und Tabelle 88 aufgeführten THG-Emissionsfaktoren verknüpft. Dabei werden bei allen Teilen lediglich die Materialmengen zum Bau betrachtet. Zusätzliche Materialien durch den Unterhalt der Infrastruktur werden nicht berücksichtigt. Der Unterhalt der Infrastruktur ist insofern nur über die Berücksichtigung der Lebensdauer enthalten.

Unter der Infrastruktur der Binnenschifffahrt wird im Weiteren neben den rund 6.545 km umfassenden Binnenwasserstraßen (Tabelle 45) die Schleusen, Kanalbrücken und die Binnenhäfen verstanden. Neben den Materialverbräuchen beim Bau werden keine zusätzlichen Materialverbräuche durch den Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur gesondert aufgeführt. Materialverbräuche durch den Unterhalt werden demnach

lediglich über die Erneuerungen nach den veranschlagten Lebensdauern berücksichtigt. Die für den Unterhalt notwendige Nassbaggerei wird dem Betrieb zugerechnet und wird deshalb in Kapitel 5.2 betrachtet.

Tabelle 45: Länge der Binnenwasserstraßen in Deutschland im Jahr 2005

	Kanäle	Flüsse
	km	km
Binnengewässer	1.747	5.607
davon Binnenschifffahrt	1.631	4.914

Quelle: [WSV 2011]

Uferbefestigung

Die Ufer der Binnenwasserstraßen werden in Deutschland fast durchgehend gegen Erosion geschützt, wobei Steger et al. [2011] zufolge verschiedene Typen von Uferbefestigungen wie durchlässiges/loses Deckwerk, dichtes Deckwerk, Deckwerk über Asphalt, Spundwände oder Betonmauern zu finden sind.

Da weder die Materialmengen der verschiedenen Befestigungstypen noch die Verteilung der verschiedenen Bauweise an den deutschen Binnenwasserstraßen bekannt ist, wird in der vorliegenden Studie auf den Materialbestand aus Steger et al. [2011] aus dem Projekt MaRes¹⁷ zurückgegriffen.

Die Berechnungen werden dabei den in Tabelle 45 aufgeführten Längen der Binnenwasserstraßen in Deutschland zugrunde gelegt, wobei diese sich nicht auf das Bezugsjahr der vorliegenden Studie (2008), sondern auf das Jahr 2005 beziehen. Es kann aber davon ausgegangen, dass sich der Bestand innerhalb dieser Zeitspanne nicht wesentlich verändert hat. Diese unterscheiden sich von den in Steger et al. [2011] aufgeführten Werten, da lediglich die Binnenschifffahrtsstraßen betrachtet werden und die Seeschifffahrtsstraßen nicht enthalten sind. Die veranschlagten Materialmengen wurden Steger et al. [2011] entnommen und anhand der Längen der Wasserstraßen skaliert.

¹⁷ <http://ressourcen.wupperinst.org/>

Tabelle 46: Länge und Materialbestand der der Wasserstraßen in Deutschland

	Einheit	MaRes Projekt ¹⁾	Diese Studie (Binnen- wasserstraßen)
Länge der Wasserstraßen	km	7.354	6.545
Materialmenge			
Sand & Kies	1.000 t	6.291	5.538
Schotter & Splitt	1.000 t	6.702	5.915
Schüttsteine, Wasserbausteine	1.000 t	21.994	19.506
Schlacke, Grandgeröll	1.000 t	2.740	2.530
Mastixverguss	1.000 t	1.201	1.072
Geotextilien	1.000 m ²	11.186	9.803
Asphaltbeton	1.000 t	310	272
Bitumensand	1.000 t	224	196
Beton	1.000 t	1.290	1.131
Stahlspundwand	1.000 t	3.512	3.151
1) Ressourceneffizienz Papier 2.3			

Quellen: [Steger et al. 2011]; [WSV 2011]; eigene Berechnungen

In den Berechnungen wurde eine Lebensdauer der Uferbefestigung von 60 Jahren veranschlagt. Baustellenaufwendungen werden aufgrund fehlender Daten für die Uferbefestigung nicht berücksichtigt.

Kanäle

Bei den Kanälen handelt es sich um künstliche Gewässer, die oftmals mit Ton oder Asphalt abgedichtet sind oder mittels Folien vom Grundwasser abgetrennt werden. Neben den abdichtenden Schichten aus Ton oder Asphalt verfügen die Kanäle über Schichten aus dem Abtragsmaterial sowie verschiedene Gesteinsschichten. Im Anhang wird der Aufbau der verschiedenen Kanaltypen aus der Fachliteratur mit den entsprechenden Materialien und Schichtdicken in Bild 45 und Bild 46 dargestellt (siehe Anhang 10.4.1). Den dort aufgeführten Materialien und Schichtdicken sind die weiteren Berechnungen zu Grunde gelegt.

Neuere Kanäle wurden bevorzugt mit Asphalt abgedichtet und im Trapezprofil errichtet [Steger et al. 2011]. Für diese neueren, mit Asphalt abgedichteten oder mit Folien ausgekleideten Kanäle wurde ein Trapezprofil mit einer Breite von 31 m an der Kanalsole, 55 m an der Gewässeroberkante und 61 m insgesamt veranschlagt [Strobl 2006].

Ältere Kanäle wurden Steger et al. [2011] zufolge hingegen mit Ton abgedichtet. Zudem weisen ältere Kanäle überwiegend ein rechteckiges Profil auf (siehe Bild 44 im Anhang).

Daraus ergeben sich die in Tabelle 47 aufgeführten Materialmengen pro Meter Kanal.

Tabelle 47: Materialmenge für die verschiedenen Kanaltypen pro Kanalmeter

Material	Tondichtung in Rechteckprofil	Asphalt-dichtung in Trapezprofil	Geosynth. Dichtung im Trapezprofil
	t/m	t/m	t/m
Asphaltbeton		14	
Bitumensand		5	
Ton	54		
Schüttsteine	11	29	101
Steinbruchabfall	35	18	
Filtermatten			0,05
PVC Folie			0,06
Abtragmaterial	29	7	

Quellen: [Lattermann 2010]; [Stroble 2006]; eigene Berechnungen

Hinsichtlich der Verteilung der verschiedenen Kanaltypen im Bestand wird auf im MaRes-Projekt enthaltene Abschätzungen zurückgegriffen. Steger et al. [2011] zufolge verfügen rund 38 % der Kanäle über eine Asphaltabdichtung, 43 % sind mit Ton abgedichtet. Für 19 % der Kanäle wird davon ausgegangen, dass sie nicht abgedichtet sind, jedoch mit Filtermatten und Kunststofffolien ein Aufschwemmen verhindert wird. In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass sich die Kanaltypen der Binnenwasserstraßen dieser Verteilung entsprechen.

Maibach et al. [1995] gibt auf Basis der Abschätzung der Enquetekommission eine Lebensdauer von Kanälen von 118 Jahren an. In der vorliegenden Studie wird jedoch in Anlehnung an die PCR für die Schieneninfrastruktur mit einer Lebensdauer von 60 Jahren gerechnet. Zusätzlich wird in einer Sensitivität eine Kanallebensdauer von 100 Jahren veranschlagt.

Neben dem Einsatz der verwendeten Materialien werden in der vorliegenden Studie Baustellenaufwendungen berücksichtigt. Da für diesen Bereich keinerlei Informationen vorliegen, werden lediglich die ausgebagerten Materialmengen mit den entsprechenden Emissionsfaktoren verknüpft. Bei Kanälen mit Rechteckprofil liegt der rechnerische Aushub bei rund 275 m³ pro Kanalmeter und bei Kanälen mit Trapezprofil bei 253 m³ pro Kanalmeter.

Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 48 aufgeführten Materialmengen und Erdbewegungen durch den Bau der Kanäle pro Jahr.

Tabelle 48: Materialmenge und -aushub durch den Bau der Binnenwasserstraßen in Deutschland pro Jahr

	Einheit	Insgesamt
Asphaltbeton	1.000 t/a	166
Bitumensand	1.000 t/a	56
Ton	1.000 t/a	562
Schüttsteine	1.000 t/a	985
Steinbruchabfall	1.000 t/a	567
Filtermatten	1.000 t/a	0,2
PVC Folie	1.000 t/a	0,3
Abtragsmaterial	1.000 t/a	385
Aushub	1.000 m ³ /a	7.108

Quellen: eigene Berechnungen

Schleusen

Zur Bestimmung der Materialverbräuche sowie der bei der Errichtung durchgeführten Erdbewegungen der im Jahr 2008 im deutschen Binnenschifffahrtsnetz befindlichen 326 Schleusen [WSV 2011] wurden die in Tabelle 48 aufgeführten Kennzahlen von neun verschiedenen Schleusen recherchiert und ausgewertet. Dabei wurde auf Fachliteratur wie „Beton für Bauwerke an Wasserstraßen“ [Bayer et al. 1990] sowie Veröffentlichungen im Internet [NBA-H 2012; WNA-M 2012a] zurückgegriffen.

Für den Fall, dass in den publizierten Materialdaten der untenstehenden Schleusen keine Unterscheidung zwischen Konstruktionsbeton und Bewehrungsstahl, sondern nur der insgesamt verbaute Stahlbeton angegeben wurde, ist in der Tabelle ein relativ hoher Stahlanteil von 10 % angenommen worden. Dieser spiegelt den Mittelwert für jene Schleusen wieder, für welche eine Differenzierung angegeben war. Materialmengen für den Stahlwasserbau, also die Errichtung der Tore und Verschlüsse, waren nur bei fünf Schleusen angegeben. Für den Aushub und die Erdbewegungen ist die Datengrundlage mit 4 bzw. 3 Schleusen ebenfalls nicht besonders hoch.

Der Materialverbrauch einer mittleren Schleuse beträgt demnach rund 141.811 Tonnen Beton, 15.189 Tonnen Bewehrungsstahl und 1.862 Tonnen Stahl für den Stahlwasserbau. Diese Materialmengen weichen von den in Steger et al. [2011] veranschlagten Werten von (155.000 t Beton, 4.500 t Stahl) ab, welche jedoch auch die Länge und Höhe der Schleusen berücksichtigen. Da aus den eigenen Recherchen ein deutlich höherer Stahlanteil bezogen auf den gesamten Materialeinsatz hervorgeht und zudem Informationen zu den Erdbewegungen verfügbar sind, werden die Berechnungen dennoch den in Tabelle 49 fettgedruckten Werten der eigenen Recherche zugrunde gelegt. Nicht berücksichtigt werden in der vorliegenden Studie zusätzliche Materialverbräuche für den Unterhalt der Schleusen.

Tabelle 49: Menge an Stahl und Beton zum Bau von Schleusen in Deutschland sowie die Menge der Erdbewegungen und des Aushubs

	Erd- bewegung	Aushub	Beton- verbrauch	Stahlverbrauch (Bewehrung)	Stahlverbrauch (Stahl- wasserbau)
	1.000 m ³	1.000 m ³	t	t	t
Sparschleuse Eckersmühlen ¹⁾	-	850	205.000	16.000	214
Sparschleuse Henrichenburg ¹⁾	-	-	90.000	10.000	-
Staustufe Mettlach ¹⁾	-	-	112.500	12.500	-
Schleuse Uelzen II ²⁾	-	-	241.000	33.500	-
Schleuse Rothensee ²⁾	1.900	-	170.000	16.500	-
Schleuse Hohenwarthe ²⁾	2.210	-	310.000	32.900	5.800
Schleuse Suelfeld ²⁾	-	-	85.500	9.500	880
Schleuse Wusterwitz ³⁾	200	170	45.000	5.000	117
Niedrigwasserschleuse Magdeburg ³⁾	58,2	196,3	8.300	800	2.300
Mittelwert	1.092	405,4	140.811	15.189	1.862
Median	1.050	196,3	112.500	12.500	880
Minimum	58,2	170	8.300	800	117
Maximum	2.210	850	310.000	33.500	5.800

1) Bayer et al. 1990; 2) NBA-H 2012; 3)WNA-M 2012a

Quelle: Recherchen des Öko-Instituts.

Bei den Schleusen handelt es sich nach Selle [2003] zufolge um langlebige Bauwerke, die die in den DIN Normen zum Stahlwasserbau geforderten Lebensdauern von mindestens 70 Jahren nur bei entsprechender Wartung erreichen. Diese Studie veranschlagt deshalb eine Lebensdauer von 60 Jahren.

Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 50 aufgeführten Materialmengen und Erdbewegungen durch den Bau der Schleusen pro Jahr.

Tabelle 50: Materialmenge und Erdbewegung durch den Bau der Schleusen in Deutschland pro Jahr

	Einheit	Insgesamt
Beton	1.000 t/a	765
Bewehrungsstahl	1.000 t/a	83
Konstruktionsstahl	1.000 t/a	10
Erdbewegungen	1.000 m ³ /a	8.136

Quelle: eigene Berechnung

Kanalbrücken

In Deutschland gibt es 10 Kanalbrücken [WSV 2012], bei denen ein Kanal in einer Trogbrücke ein tiefer gelegenes Objekt wie beispielsweise eine Bahntrasse oder ein anderes Gewässer überquert. Straßen oder Eisenbahnbrücken über Kanäle werden hingegen in den Kapiteln 3.1 und 6.1 betrachtet.

Zur Bestimmung der Materialverbräuche durch den Bau der Kanalbrücken wurde eine Internetrecherche durchgeführt. Dabei konnten lediglich für zwei der zehn Brücken Materialmengen zusammengetragen werden (siehe Tabelle 51). Kennzahlen hinsichtlich der Brückenfläche liegen jedoch für sechs Kanalbrücken vor.

Tabelle 51: Menge an Stahl und Beton zum Bau von Kanalbrücken in Deutschland sowie Länge und Breite der Kanalbrücken

	Stahlbeton	Beton	Bewehrungs- stahl	Konstruktions- stahl	Länge	Breite
	m ³	t	t	t	m	m
Kanalbrücke Magdeburg	68.000	159.687	10.193	24.000	918	43
Kanalbrücke Minden II	22.000	51.663	3.298	7.800	398	42
Kanalbrücke Alte Fahrt					70	15
Kanalüberführung Münster-Gelmer					70	52
Kanalbrücke Minden I					380	42
Kanalbrücke Rednitztal					219	36

Quellen: [WNA-M 2012a; WSA-M 2012; WNA-D 2012; Internetrecherche¹⁸]

Über die vorhandenen Materialdaten wurde jeweils für Beton, Bewehrungs- und Konstruktionsstahl der durchschnittliche Materialverbrauch pro Quadratmeter Brückenfläche errechnet. Da die Angaben über den Verbrauch von Stahlbeton in Kubikmetern angegeben sind, musste eine Aufspaltung nach Beton und Bewehrungsstahl vorgenommen werden. Bei einer Dichte von 2,4 t/m³ für Beton und 7,86 t/m³ für den Bewehrungsstahl und einem Massenanteil von 6% des Bewehrungsstahls, welcher dem Stahlanteil für Verbundbrücken aus dem Straßenbau entspricht, ergibt sich eine Dichte von 2,5 t/m³ für den Stahlbeton. Der daraus resultierende Materialverbrauch liegt für Beton bei 3,8 t, für Bewehrungsstahl bei 0,2 t und für Konstruktionsstahl bei 0,6 t pro Quadratmeter Brückenfläche.

¹⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Kanalbr%C3%BCcke_Alte_Fahrt, abgerufen Juli 2012; <http://www.karl-gotsch.de/Lexikon/Kanalbr.htm>, abgerufen Juli 2012; <http://www.brueckenweb.de/2content/datenbank/bruecken/2brueckenblatt.php?bas=2578>, abgerufen Juli 2012;

Weiterhin wurde aus den Angaben über Länge und Breite der Brücken ein Durchschnittswert gebildet und anhand der flächenbezogenen mittleren Materialmengen eine Durchschnittsbrücke errechnet (siehe Tabelle 52).

Tabelle 52: Materialmengen und Kennzahlen einer durchschnittlichen Kanalbrücke in Deutschland

	Beton	Bewehrungs- stahl	Konstruktions- stahl	Länge	Breite
	t	t	t	m	m
mittlere Kanalbrücke	49.383	3.152	7.430	343	38

Quelle: eigene Berechnungen

Über diese Werte kann der Materialverbrauch auf die Anzahl der Kanalbrücken hochgerechnet werden. Hinsichtlich der Lebensdauer der Kanalbrücken wird anlehnend an die PCR für die Schieneninfrastruktur von 60 Jahren ausgegangen. Die jährlichen Materialmengen durch den Bau der Kanalbrücken sind in Tabelle 53 aufgeführt.

Tabelle 53: Materialmenge durch den Bau der Kanalbrücken in Deutschland pro Jahr

	Einheit	Insgesamt
Beton	1.000 t/a	8,2
Bewehrungsstahl	1.000 t/a	0,5
Konstruktionsstahl	1.000 t/a	1,2

Quelle: eigene Berechnung

Da keine Informationen über Aushub und Erdbewegungen vorlagen, konnten diese Bereiche ebenso wie zusätzliche, durch den Unterhalt von Kanalbrücken entstehende Materialverbräuche, in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden.

Binnenhäfen

Steger et al [2012] zufolge gibt es in Deutschland mehr als 100 öffentliche See- und Binnenhäfen. Die Bilanzierung der durch Bau und Unterhalt der Binnenhäfen entstehenden Materialmengen ist laut Steger et al. aufgrund der Inhomogenität der Anlagen mit größeren Schwierigkeiten verbunden. Dennoch werden im MaRes-Projekt die Materialverbräuche der Kaianlagen, Uferbefestigungen, Eisenbahngleise, Lagerhallen, Silos, Tanks und Kräne der 32 größeren Binnenhäfen bilanziert. Nicht betrachtet werden hingegen Straßen und Flächen dieser Häfen. Steger et al. betonen jedoch, dass die in Tabelle 54 aufgeführten Werte lediglich einen Anhaltspunkt für eine Größenordnung bieten, da die Bilanzierung auf den Arbeiten von Stiller aus dem Jahr 1995 beruht, und keine Aktualisierung stattfand. Steger et al. zufolge dürfte es in den vergangenen 15 Jahren jedoch eine erhebliche Ausweitung der Umschlaganlagen stattgefunden haben, die Werte unterschätzen demnach die Materialverbräuche.

Dennoch wird dieser Materialbestand den Berechnungen in der vorliegenden Studie zu Grunde gelegt, da als Alternative die Auswertung anhand von Luftbildern einen erheblichen Aufwand bedeutet hätte – bei gering verbesserter Genauigkeit. Abweichend von Steger et al. [2012] ließ man die Gleisanschlüsse jedoch nicht in die Bilanzierung einfließen, um eine Doppelzählung mit dem Bereich der Schieneninfrastruktur zu vermeiden. Mit einer unterstellten Lebensdauer von 60 Jahren ergeben sich die in Tabelle 55 aufgeführten Materialmengen pro Jahr.

Tabelle 54: Materialbestand und Anlagengröße der Binnenhäfen in Deutschland

	Spundwandkai	sonst. Ufer	Gleise	offene Lager	gedeckte Lager	Tank	Gesamt Maress
Anlagen Einheit	1.000 m	1.000 m	1.000 m	1.000 m ²	1.000 m ²	1.000 m ³	in 1.000 t
Anlagen Menge	145	63	377	7.883	3.603	6.846	
Material Einheit	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t	
Beton	13,8	2,3		0,2	1,2		8.099
Kies, Schotter, Stein	6,8	6,8	1,9	0,5	0,5		7.978
Asphaltbeton				0,1			907
Wasserbausteine		4,0					253
Betonstahl	0,3	0,1	0,1		0,1	0,0	661
Stahlspundwand	17	1,3					328
Insgesamt							18.226

Quelle: [Steger et al. 2011]

Tabelle 55: Materialmenge durch den Bau der Binnenhäfen in Deutschland pro Jahr

	Insgesamt
	1.000 t/a
Beton	135,0
Kies, Schotter, Stein	121,0
Asphaltbeton	15,1
Wasserbausteine	4,2
Bewehrungsstahl	10,4
Stahlspundwand	5,5

Quelle: Berechnung des Öko-Instituts.

Materialtransporte

Für die Berechnung der CO₂ bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen wurden neben den Emissionen durch die Bereitstellung der Baumaterialien auch die Materialtransporte

berücksichtigt. Da keinerlei Informationen zu den Transportentfernungen und eingesetzten Fahrzeugen vorlagen, wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die Schüttgüter wie Ton, Sand, Kies, Geröll, aber auch Schuttsteine und Wasserbausteine mit dem Binnenschiff über eine Entfernung von 200 km transportiert wurden (siehe Tabelle 127 im Anhang). Für den Transport von Stahl wurde hingegen analog zu Schmied/Mottschall [2013] von einer Transportentfernung von 200 km per Güterzug ausgegangen. Der Transport von Beton und Asphalt wurde mit 20 km per Lkw veranschlagt. Für Folien und Fliese wurde ebenfalls von einem Lkw-Transport ausgegangen, jedoch eine Transportentfernung von 300 km veranschlagt.

Da der Aushub im Wasserbau häufig nahe der Baustelle bspw. für den Hochwasserschutz weiterverwendet wird, wurde in diesem Fall eine Transportentfernung von lediglich 5 km unterstellt.

Die sich daraus ergebenden Verkehrsleistungen sind differenziert nach dem Verkehrsmittel und Verursacherbereich in Tabelle 56 aufgeführt.

Tabelle 56: Verkehrsleistung durch die Materialtransporte durch Bau der Binnenschifffahrtsinfrastruktur nach Bereich und Verkehrsmittel

	Binnenschiff	Bahn	Lkw	Insgesamt
	1.000 tkm	1.000 tkm	1.000 tkm	1.000 tkm
Uferbefestigung	111.630	15.754	939	128.324
Kanäle	422.699		20.741	443.441
Schleusen		27.793	88.528	116.322
Kanalbrücken		529	165	694
Binnenhäfen	25.049	39.425	3.002	67.476
Insgesamt	559.378	83.502	113.375	756.256

Quelle: eigene Berechnungen

CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen

Insgesamt führt der Bau der Infrastruktur der Binnenschifffahrt zu Emissionen in Höhe von rund 465.400 Tonnen CO₂ bzw. 491.200 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr (siehe Tabelle 128 im Anhang). Davon entfallen rund 90 % der Emissionen auf die Bereitstellung der verbauten Materialien, rund 8 % auf die Materialtransporte. Die Baustellenenergie, die für die Erdbewegungen beim Bau der Kanäle und Schleusen verbraucht wird, führt lediglich zu rund 1 % der Emissionen.

Bild 17 zeigt die Anteile der verschiedenen Verursacherbereiche an den CO₂-Äquivalent-Emissionen. Den Berechnungen zufolge verursachen die Schleusen mit rund 287.200 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr 58 % der gesamten Treibhausgasemissionen der Infrastruktur. Mit rund 21 % (102.900 Tonnen CO₂e) tragen die Materialverbräuche und

-transporte durch den Bau der Uferbefestigung am zweitmeisten zu den Gesamtemissionen bei.

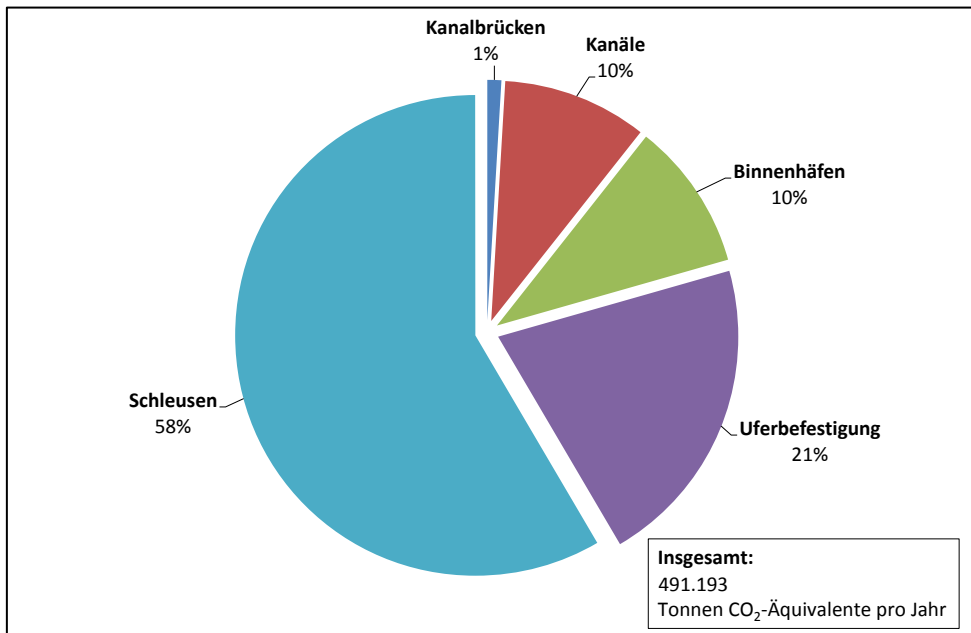


Bild 24: CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch den Bau der Binnenschifffahrtsinfrastruktur nach Verursacherbereichen [eigene Berechnungen]

Die Anteile der verschiedenen Materialien sowie Erdbewegungen und Transporte an den Gesamtemissionen durch den Bau der Schleusen, die für einen Großteil der Emissionen der Infrastruktur verantwortlich sind, sind in Bild 25 dargestellt. Rund die Hälfte der Emissionen wird durch den verbauten Bewehrungsstahl verursacht (rund 141.600 Tonnen CO_{2e} pro Jahr). Mit rund 103.200 Tonnen trägt der Beton zu 36 % der CO₂-Äquivalent-Emissionen bei. Der Konstruktionsstahl, welcher für den Stahlwasserbau eingesetzt wird, führt ebenso wie die Transporte der Baumaterialien zu rund 7 % der THG-Emissionen. Die Emissionen der Erdbewegungen sind hingegen mit rund 3.100 Tonnen pro Jahr gering.

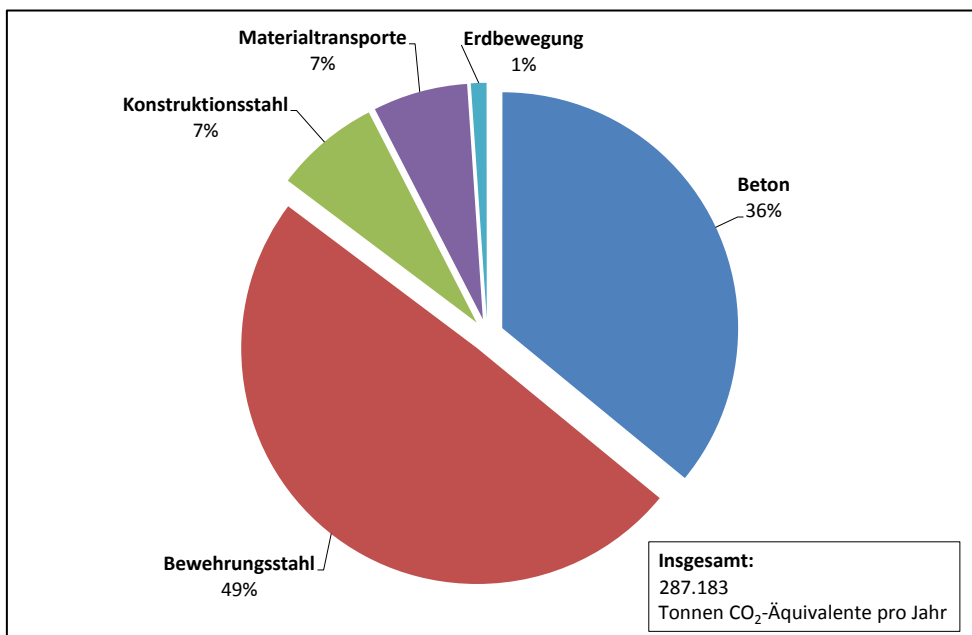


Bild 25: CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau- und Unterhalt der Schleusen nach Baumaterial/Baufwendungen [eigene Berechnungen]

Zur Ermittlung der spezifischen Emissionen in gCO₂- bzw. gCO₂-Äquivalente pro Tonnenkilometer werden die Gesamtemissionen in Tabelle 57 durch die im Jahr 2008 erbrachte Verkehrsleistung dividiert. Aus dem TREMOD-Modell (5.25) geht für das Jahr 2008 eine gesamte Verkehrsleistung von rund 64 Mrd. Tonnenkilometern durch die Binnenschifffahrt hervor. Somit ergeben sich rund 7,3 g CO₂- bzw. 7,7 g CO₂-Äquivalente pro Tonnenkilometer durch den Bau und Unterhalt der Infrastruktur. Dabei wurden die gesamten Emissionen der Güterschifffahrt zugeschlagen, eine Berücksichtigung von verkehrsfremden Funktionen erfolgt nicht. Die Ergebnisse sollten demzufolge als orientierend verstanden werden.

Tabelle 57: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau/ Unterhalt der Binnenschifffahrtsinfrastruktur im Jahr 2008

	CO ₂		CO ₂ e	
	t/a	g/tkm	t/a	g/tkm
Bau/Unterhalt der Infrastruktur	465.366	7,3	491.193	7,7
Kanalbrücken	4.295	0,1	4.587	0,1
Kanäle	46.801	0,7	47.716	0,7
Binnenhäfen	46.224	0,7	48.835	0,8
Uferbefestigung	95.567	1,5	102.873	1,6
Schleusen	272.480	4,3	287.183	4,5

Quelle: eigene Berechnungen

In einer Sensitivität soll betrachtet werden, wie es sich auswirkt, wenn für die Lebensdauer der langlebigen Bauten 100 statt 60 Jahre veranschlagt werden. Die gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Infrastruktur liegen dann mit rund 294.700 Tonnen pro Jahr etwa 40 % niedriger. In diesem Fall ergäben sich spezifische Emissionen in Höhe von 4,4 g CO₂ bzw. 4,6 g CO₂-Äquivalente pro Tonnenkilometer.

5.2 Betrieb der Verkehrsinfrastruktur

Für die Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Verkehrsinfrastruktur werden neben den Energieverbräuchen der Kanäle die Nassbaggeraktivitäten berücksichtigt, die notwendig sind, um die Wasserstraßen schiffbar zu halten. Unberücksichtigt bleiben in der vorliegenden Studie aufgrund fehlender Daten hingegen die Energieverbräuche der Flüsse und der Binnenhäfen.

Den wohl größten Anteil am Stromverbrauch des Betriebs der Wasserstraßen tragen die Kanäle. Im Gegensatz zu beschrifteten Flussläufen haben Kanäle keine native Quelle, sondern müssen aus umgebenden Gewässern bespeist werden. Bei Kanälen findet teilweise an der Scheitelhaltung, also dem höchstgelegenen Abschnitt eines Kanals, eine Wasserzufuhr statt. Um den für die Schifffahrt nötigen Wasserstand zu erhalten, wird dort Wasser durch Pumpwerke und Speicherseen eingepumpt. Zusätzlich werden zur Höhenüberwindung Schleusen eingesetzt, deren Stromverbrauch ebenfalls bedeutend sein kann.

Der gesamte Energieverbrauch durch die Schleusen in Deutschland in 2008 konnte im Rahmen der vorliegenden Studie nicht bestimmt werden. Teilweise wird argumentiert, dass die Wasserstraßen auch zur Energiegewinnung genutzt würden und die Menge des erzeugten Stroms den Eigenverbrauch decken würde. Die Stromerzeugung wird jedoch in Abstimmung mit dem Auftraggeber im Weiteren nicht gutgeschrieben.

Im Lehrbuch „Wasserbau, Aktuelle Grundlagen – neue Entwicklungen“ [Strobl 2006] wird der Stromverbrauch eines Schleusvorgangs bei Bergfahrt für eine Schleuse mit einem Kammervolumen von 20.000 m³ mit 700 kWh angegeben. Anhand dieser konkreten Angaben zum Stromverbrauch lassen sich jedoch keine Gesamtverbräuche ermitteln, da der Verbrauch verschiedener Schleusen sehr unterschiedlich ausfallen kann. Der benötigte Energieverbrauch hängt stark von den jeweiligen Gegebenheiten wie beispielsweise Hubhöhe und Kammervolumen ab. Zudem existieren Sparschleusen, welche den Stromverbrauch eines Schleusvorgangs um bis zu 60 % reduzieren können. Auch die detaillierten Betriebsdaten für einen Bottom-Up Ansatz liegen nicht vor, so dass zur Bestimmung des Energieverbrauchs der Kanäle vereinfachend auf Kennwerte aus Maibach et al. [1995] zurückgegriffen wurde, welche ursprünglich von der Enquete Kommission aus 1994 stammen. Maibach et al. [1995] geben einen Verbrauch von 12,3 MJ pro Kanalmeter und Jahr an, welcher mehrheitlich vom Schleusenbetrieb stammt. Daraus ergibt sich ein Stromverbrauch von 5.573 MWh/a durch die Kanäle. Die

Schleusvorgänge auf den sonstigen Wasserstraßen werden in der vorliegenden Studie ebenso wie die an den Laufwasserkraftwerken erzeugte Energie nicht berücksichtigt.

Für den Unterhalt der Wasserstraßen werden weiterhin regelmäßig Sedimentablagerungen insbesondere in den Mündungen von Flüssen ausgebaggert, um Untiefen zu beseitigen und die Wasserstraßen schiffbar zu halten. Für die Berechnung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen wird auf die Broschüre des Bundesministeriums für Verkehr-, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) „Nassbaggerstrategien in Deutschland“¹⁹ zurückgegriffen. Die jährlichen Unterhaltungsbaggermengen betragen demnach insgesamt 3.000.000 m³/a an deutschen Binnengewässern und 1.000.000 m³/a an Binnenhäfen [BMVBS 2004]. Diese Werte wurden in der vorliegenden Studie verwendet. Der Energieverbrauch für die Nassbaggerei ist unbekannt. Es wird im Weiteren angenommen, dass er dem Baggern an Land entspricht. Zudem wurden die Transporte der Sedimente mit 50 km unter der Dichte von rund 1,8 t/m³ per Binnenschiff veranschlagt.

Tabelle 58: Spezifischer Energieverbrauch, Mengen Baggergut und Transportleistung für den Betrieb der Wasserstraßen

Bereich	Einheit	Wert
Stromverbrauch Kanäle	MJ/(m*a)	12,3
Baggergut	Millionen m ³ /a	4,0
Transportleistung	Millionen tk/a	360

Quellen: [Maibach et al. 1995]; [BMVBS 2004]; eigene Berechnungen

Die sich durch den Betrieb der Infrastruktur ergebenden CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen werden in dieser Studie allein der Binnenschifffahrt zugerechnet, andere verkehrsfremde Funktionen und die Freizeitnutzung bleiben unberücksichtigt (siehe Kapitel 5). Insgesamt ergeben sich daraus CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von rund 14.800 Tonnen im Jahr 2008 (siehe Bild 26). Davon entfällt mit 66 % der Großteil der Emissionen mit rund 9.755 Tonnen auf die Transporte des Baggerguts. Der Stromverbrauch der Kanäle verursacht rund 3.564 Tonnen CO₂-Äquivalente und trägt damit zu 24 % zu den Emissionen bei, die Nassbaggerei besitzt mit 1.533 Tonnen CO₂e einen Anteil von 10 % der Emissionen.

¹⁹ <http://www.dredging-in-germany.de/sites/deutsch/deutsch.html>

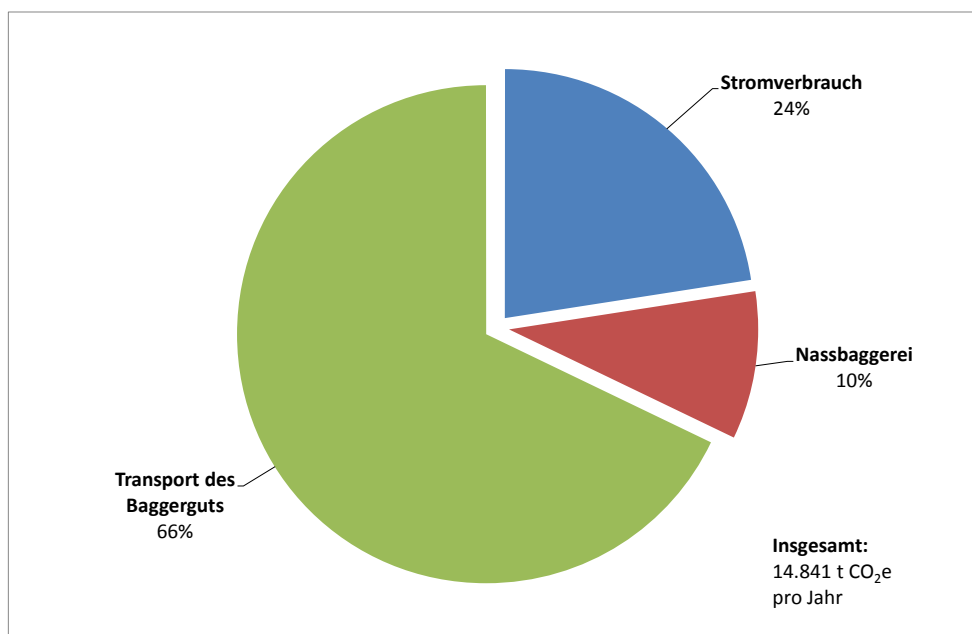


Bild 26: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Binnenschifffahrtsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [eigene Berechnungen]

Bezogen auf die gesamte Verkehrsleistung von rund 64 Mrd. Tonnenkilometern, welche das TREMOD-Modell (5.25) für das Jahr 2008 ausweist, ergeben sich spezifische Emissionen in Höhe von 0,2 g CO₂/tkm (siehe Tabelle 59).

Tabelle 59: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Binnenschifffahrtsinfrastruktur im Jahr 2008

	CO ₂		CO ₂ e	
	t/a	g/tkm	t/a	g/tkm
Insgesamt	14.625	0,2	14.841	0,2

Quelle: eigene Berechnungen

5.3 Herstellung und Wartung der Schiffe

Die Verkehrsleistung der Binnenschifffahrt wird mit einer Vielzahl unterschiedlicher Schiffstypen erbracht, wobei diese sich stark voneinander unterscheiden. Im Jahr 2010 wurde beispielsweise der größte Anteil der Verkehrsleistung von Gütermotorschiffen erbracht (rund 64 %). Mit 21 % der erbrachten Verkehrsleistung tragen die Tankmotorgüterschiffe am zweitmeisten zur Verkehrsleistung bei. Den größten Anteil der Ladungsart stellten dabei mit 57 % feste Schüttgüter dar [Knörr et al. 2011].

Da jedoch keine Materialmengen für die unterschiedlichen Schiffstypen vorliegen, wird die Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen vereinfachend anhand eines beispielhaften Binnenschiffs durchgeführt. Als Datengrundlage zur

Materialzusammensetzung wird der Bericht „Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Binnenschiffen, Flugzeugen und Schienenfahrzeugen“ aus dem Renewbility-Projekt herangezogen (siehe Bild 27) [Knörr/Kutzner 2010].

Demnach bestehen die Binnenschiffe mit 314 Tonnen zu einem Großteil aus Stahl (95 %). Neben Kunststoffen (4,8 Tonnen), Holz (3,1 Tonnen), Kupfer (2,4 Tonnen) und Aluminium (0,2 Tonnen) wurden weitere Materialmengen wie Glas, Mineralfaser, Keramik und Zement (5,1 Tonnen) berücksichtigt.

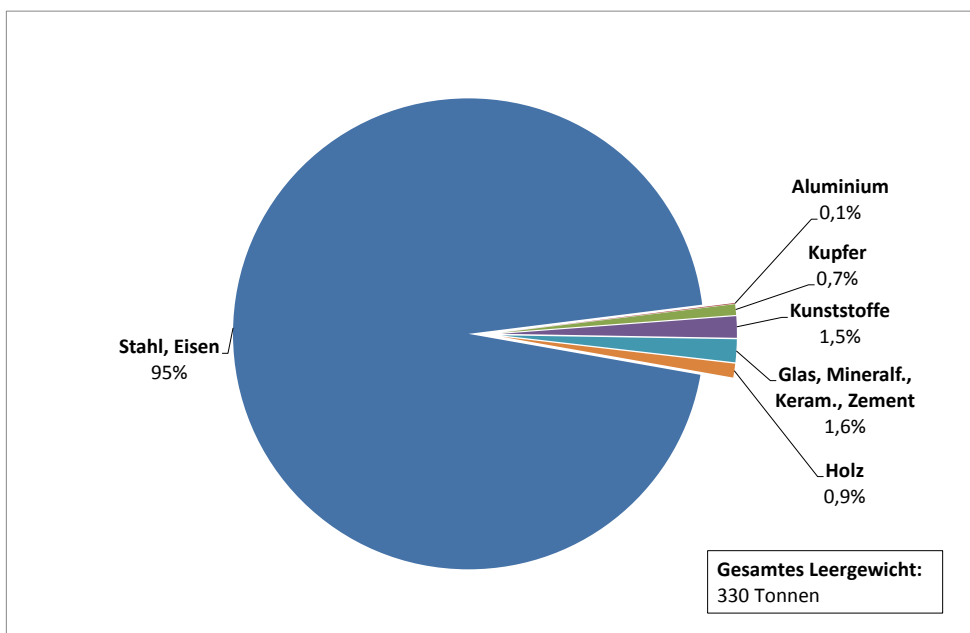


Bild 27: Materialzusammensetzung eines Binnenschiffs [Knörr/Kutzner 2010]

Bei der Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen wurden hingegen der Energieverbrauch der Produktion sowie die Materialtransporte nicht berücksichtigt. Ebenfalls bleiben aufgrund fehlender Daten die zusätzlichen Materialverbräuche durch die Instandhaltung der Binnenschiffe unberücksichtigt.

Die in Berechnungen veranschlagten Leistungsmerkmale der Binnenschiffe wie Kapazität, Auslastungsgrad, Fahrleistung und Lebensdauer wurden ebenfalls Knörr/Kutzner [2009] entnommen und in Tabelle 60 zusammengefasst.

Tabelle 60: Leistungsmerkmale der Binnenschiffe

	Leergewicht	Kapazität	Auslastungsgrad	Jährliche Fahrleistung	Lebensdauer
	Tonnen	Tonnen	In %	km/a	a
Binnenschiff	330	1.350	50%	30.000	47

Quelle: Knörr/Kutzner 2008

Unter Berücksichtigung einer Lebensdauer von 47 Jahren und einer jährlich zurückgelegten Distanz von rund 30.000 km ergibt sich eine gesamte jährliche Verkehrsleistung von rund 20 Millionen tkm, durch welche die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen dividiert werden, um die spezifischen Emissionen pro tkm zu erhalten. Eine Allokation zwischen Güter- und Personenverkehr findet bei der Binnenschifffahrt nicht statt.

Die spezifischen Emissionen liegen demnach bei 0,59 gCO₂-Äquivalente pro Tonnenkilometer (siehe Tabelle 61).

Tabelle 61: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung der Binnenschiffe pro tkm.

	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	g/tkm	g/tkm
Binnenschiff	0,54	0,59

Quelle: eigene Berechnungen

5.4 Ergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Treibhausgasemissionen für folgende Bereiche der Binnenschifffahrt ermittelt:

- Bau und Unterhalt der Binnenschifffahrtsinfrastruktur,
- Betrieb der Binnenschifffahrtsinfrastruktur und
- Bau und Unterhalt der Binnenschiffe.

Der Bereich der Binnenschifffahrt unterscheidet sich dabei von den anderen Verkehrsmitteln, da hier wie oben beschrieben keine Allokation der Emissionen auf den Personen- und Güterverkehr durchgeführt wird sondern allein der Güterverkehr betrachtet wird. Weiterhin erfüllen die Wasserstraßen eine Reihe von verkehrsfremden Funktionen (bspw. als Vorfluter, für die Be- und Entwässerung oder zur Freizeitnutzung), welche in dieser Studie unberücksichtigt bleiben. Demzufolge werden der Binnenschifffahrt die vollständigen CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen zugerechnet, die Ergebnisse sollten deshalb als orientierend verstanden werden.

In Tabelle 62 werden die Ergebnisse der vorangegangenen Betrachtungen zusammengefasst und um die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen des Betriebs der Binnenschiffe ergänzt. Diese werden abweichend vom Vorgehen bei den anderen Verkehrsmitteln nicht dem TREMOD-Modell entnommen, da sie dort überschätzt werden. Wie eine aktuelle, vom IFEU-Institut in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut erstellte Studie zeigt, liegen die Kraftstoffverbräuche in Deutschland rund 10 % unter den Werten aus TREMOD 5.25. Im Mittel über die verschiedenen Schiffstypen und Ladungsarten liegen sie bei 8,5 g Kraftstoff pro Tonnenkilometer [Knörr et al. 2011]. Unter Berücksichtigung der in TREMOD verwendeten CO₂-Emissionsfaktoren für Diesel

(83,9 g CO₂/MJ) und Biodiesel (42,0 g CO₂/MJ) sowie den jeweiligen Heizwert (Diesel: 42,96 MJ/kg, Biodiesel: 37,242 MJ/kg) und einer Beimischungsquote von 4,7 % im Jahr 2008 ergeben sich spezifische CO₂-Emissionen für die Binnenschifffahrt in Höhe von 29,7 g/tkm einschließlich der Emissionen der Vorkette [Knörr et al. 2011b; eigene Berechnungen]. Knörr et al. [2011] führen keine Emissionen für Methan und Lachgas auf, weshalb für diese Treibhausgase auf die Daten aus TREMOD 5.25 zurückgegriffen werden musste. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen liegen in diesem Fall bei 29,8 g CO₂e/tkm.

Für den Güterverkehr mit dem Binnenschiff innerhalb Deutschlands ergeben sich bei Berücksichtigung aller emissionsrelevanten Bereiche CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 38 g/tkm, wobei rund 78 % der Emissionen auf den Schiffsbetrieb entfallen (siehe Tabelle 62). Der Einbezug der Infrastruktur und Binnenschiffe führt zu weiteren Emissionen in Höhe von rund 9 g/tkm. Während der Bau der Infrastruktur mit fast 8 g CO₂-Äquivalenten pro Tonnenkilometer und mit 20 % einen hohen Anteil der Gesamtemissionen besitzt, ist der Einfluss von Betrieb der Infrastruktur und Herstellung der Binnenschiffe eher gering.

Tabelle 62: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Binnenschifffahrtsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Binnenschiffe

	Binnenschifffahrt	
	g/tkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	37,8	100%
Schiffsbetrieb (inkl. Vorkette)	29,7	79%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	7,3	19%
Betrieb Infrastruktur	0,2	1%
Bau/Unterhalt Schiffe	0,5	1%
CO₂-Äquivalente insgesamt	38,3	100%
Schiffsbetrieb (inkl. Vorkette)	29,8	78%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	7,7	20%
Betrieb Infrastruktur	0,2	1%
Bau/Unterhalt Schiffe	0,6	2%

Quellen: [Knörr et al. 2011]; eigene Berechnungen

An das Vorgehen in Schmied/Mottschall [2013] angelehnt wurde für langlebige Infrastrukturbestandteile wie die Schleusen eine Lebensdauer von 60 Jahren angesetzt. Um den Einfluss einer längeren Lebensdauer zu berücksichtigen, wurde im Rahmen dieses Kapitels eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, bei der für die Bauten eine Lebensdauer von 100 Jahren unterstellt wurde. Bild 28 zeigt die prozentuale Veränderung der Höhe der CO₂-Äquivalent-Emissionen durch eine Lebensdauer von 100 statt 60 Jahren. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen fallen dann rund 3 g tkm niedriger aus. Für den Bereich

Bau/Unterhalt der Infrastruktur bedeutet dies eine Verringerung der CO₂-Äquivalent-Emissionen um 40 %. Bezogen auf die gesamten CO₂-Äquivalente einschließlich Schiffsbetrieb, Bau und Unterhalt von Infrastruktur und Schiffen sowie Betrieb der Infrastruktur führt die veränderte Annahme hinsichtlich der Lebensdauer zu um 8 % verringerten Emissionen. Die Auswirkungen dieser Annahme sind also relativ groß, und übersteigen die Emissionen durch den Betrieb der Infrastruktur und den Bau und Unterhalt der Schiffe. In zukünftigen Forschungsvorhaben sollte diesem Bereich deshalb eine größere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

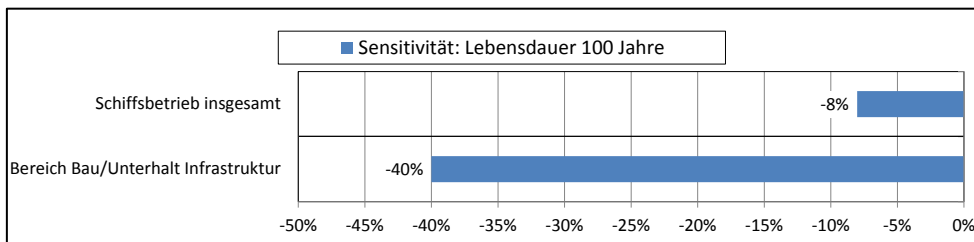


Bild 28: Sensitivitätsanalyse zur Annahme der Lebensdauer der langlebigen Bauten (100 Jahre gegenüber 60 Jahren) [eigene Berechnungen]

6 Schienenverkehr

Die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schienenverkehrsinfrastruktur sowie durch die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge wurden in einer Studie des Öko-Instituts im Jahr 2010 detailliert für die Verkehrsarten Personennahverkehr (PNV), Personenfernverkehr (PFV) und den Güterverkehr (GV) berechnet [Schmied/Mottschall 2013]. Dies erfolgte in Kooperation mit dem Umweltzentrum der Deutschen Bahn AG, wodurch eine sehr detaillierte Vorgehensweise möglich wurde. Dem Öko-Institut wurden dabei Detaildaten für das Netz der Deutschen Bahn AG zur Verfügung gestellt [DB 2009a]. Die Daten lagen differenziert für insgesamt 7.500 Einzelstreckenabschnitte vor (z. B. Flensburg bis Flensburg Süd: Streckenlänge 1.686 m). Die Besonderheit an diesem Datensatz liegt daran, dass dieser nicht nur die benötigten Infrastrukturangaben, sondern auch dazu passend Angaben zur Zugbelegung der einzelnen Streckenabschnitte enthielt. Mit Hilfe dieser Daten konnten dann für jeden Streckenabschnitt die Zug-Kilometer sowie die Brutto-Tonnenkilometer differenziert nach den drei betrachteten Zugarten – Personennah-, Personenfern-, sowie Güterverkehr – berechnet werden. Damit war eine Berechnung der Emissionen auf Ebene der einzelnen Strecken möglich. Auf diese Darstellung wird in der vorliegenden Studie jedoch verzichtet und auf Schmied/Mottschall [2013] verwiesen. Nicht berücksichtigt wurde die Infrastruktur der S-Bahnen in Berlin und Hamburg sowie der U- und Stadtbahnen.

6.1 Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur

Folgende Bereiche wurden bei der Berechnung der CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Schienenverkehrsinfrastruktur berücksichtigt:

- Schienentrasse (Planum, Erdarbeiten),
- Oberbau der Schienentrasse (Schienen, Schwellen, Befestigung auf den Schwellen, Schotter, feste Fahrbahn),
- Brücken (Talbrücken, Betonbrücken über Straßen, Stahlbrücken),
- Tunnel (Tunnel in bergmännischer und in offener Bauweise)
- Energieversorgung (Fahrdraht und Aufhängung, Oberleitungsmasten, Unterwerke, Energieerzeugung und Verteilung bis Unterwerk, Bereitstellung von Dieselkraftstoff),
- Signaltechnik und Telekommunikation (Signale, Kabel, Kabelkanal, Linienzugbeeinflussung, Stellwerke) und
- Gebäude (Personenbahnhöfe, Werke, Güterbahnhöfe).

Dieses Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der Vorgängerstudie [Schmied/Mottschall 2013]. Dabei stehen die Herkunft der verwendeten Daten und die Ergebnisse im Vordergrund. Details zu den Materialmengen werden in diesem Vorhaben nicht erneut explizit dargestellt, sind aber im Anhang dokumentiert (siehe Anhang Kapitel 10.5.1).

Schienenstrasse

Die Daten zum Bestand des Schienennetzes in Deutschland stammen aus dem von der Deutschen Bahn AG zur Verfügung gestellten Datensatz [DB 2009a], von der Bundesnetzagentur und aus den VDV-Statistiken [VDV 2009]. Detailinformationen (Elektrifizierung, Schwellentyp, Schienentyp usw.) lagen jedoch nur für das DB-Netz vor. Von den insgesamt rund 73.000 Kilometern Gleisen (ohne S-Bahn Berlin und Hamburg sowie U- und Straßenbahnen) wurden zum Berechnungszeitpunkt 87 % von der DB AG betrieben (Stand: 31.12.2008) [DB 2009d; StBA 2009, Bundesnetzagentur 2010].²⁰ Rund 11 % bzw. 7.800 km werden aber von anderen öffentlichen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) betrieben und von nichtbundeseigenen Bahnen (NE-Bahnen) genutzt (Stand: 31.12.2007) [Bundesnetzagentur 2010]. Für dieses Netz wurden Angaben zur Länge und zu den Verkehrsleistungen des Personen- und Güterverkehrs von der Bundesnetzagentur zur Verfügung gestellt [Bundesnetzagentur 2010]. Die restlichen Gleislängen von rund 2 % bzw. 1.900 km sind nichtöffentliche Eisenbahnnetze (z. B. Gleisanschlüsse von Unternehmen; Stand: 31.12.2008) [VDV 2009]. Streckenlängen und Verkehrsleistungen lagen über die VDV-Statistik vor [VDV 2009]. Für die Netze der anderen EIU sowie für die nichtöffentlichen Netze und damit für 13 % des deutschen Schienennetzes standen damit für die Berechnung der Infrastruktur-bedingten THG-Emissionen keine Detaildaten analog zum DB-Netz zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden in dem Gutachten in einem ersten Schritt die THG-Emissionen für das DB-Netz detailliert ermittelt. In einem zweiten Schritt wurden dann die Ergebnisse des DB-Netzes auf das restliche Schienennetz übertragen, wobei die Angaben zu den auf diesen Netzen erbrachten Verkehrsleistungen berücksichtigt wurden.

²⁰ Unberücksichtigt blieben die S-Bahnen Berlin und Hamburg, die eigene Streckennetze besitzen und im Rahmen der Studie nicht berücksichtigt wurden (rund 850 Gleis-km) [DB 2009d].

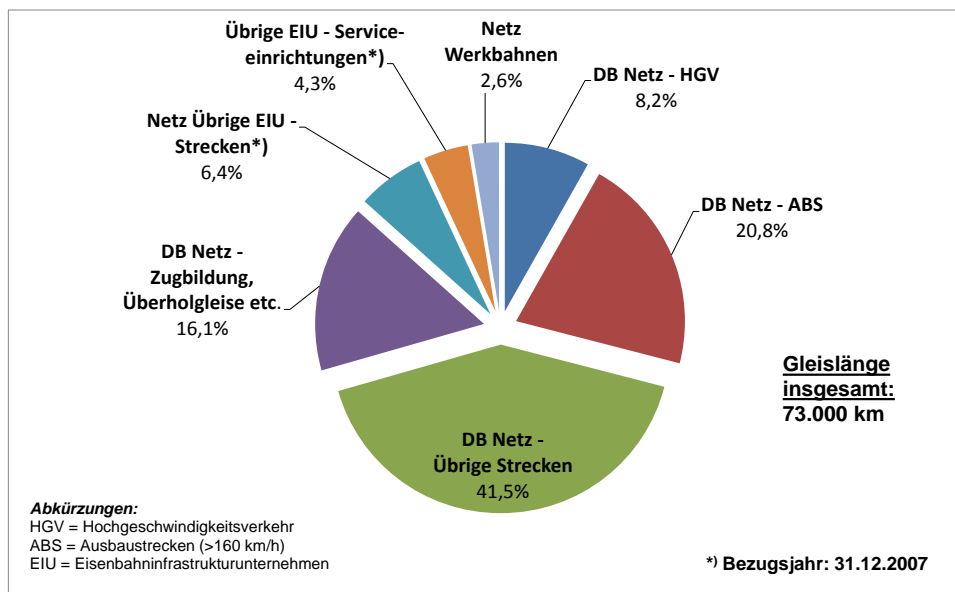


Bild 29: Gleislängen der Schieneninfrastruktur in Deutschland (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg) zum 31.12.2008 (öffentliches Netz der übrigen EIU: 31.12.2007) [Schmied/Mottschall 2013]

Zur Bestimmung der im Anhang befindlichen Materialmengen wurde eine umfangreiche Recherche durchgeführt. Für das Planum und die Erdarbeiten (Tabelle 129) basieren die Werte auf Fiedler [2005], Köser et al. [2002] und Werner [2008].

Für den Oberbau der Schienentrasse, also die Schienen (Tabelle 130) und deren Befestigung, Schwellen und den Schotter (Tabelle 131) bzw. die Feste Fahrbahn (Tabelle 132) wurde zusätzlich auf Fendrich [2007], DB [2009a], Kirchner [2005], ThyssenKrupp [2006] und ein Berechnungstool der Deutschen Bahn AG zum Bettungsquerschnitt zurückgegriffen. Auf die Materialmengen zum Bau und Unterhalt des Unter- und Oberbaus der Schienentrassen inkl. Schwellen und Schienen wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Die verwendeten Werte sind im Anhang dokumentiert, das genaue Vorgehen kann Schmied/Mottschall [2013] entnommen werden.

Ingenieurbauwerke

In dem Datensatz der DB AG waren auch Daten zu **Brückenlängen** einschließlich der Angaben zur Kategorie der Brücke enthalten (siehe Tabelle 63). Detaillierte Informationen zur jeweiligen Bauausführung der Brücke konnten jedoch nicht zur Verfügung gestellt werden. Daher wurde grundsätzlich mit drei Brückentypen gerechnet, welche folgenden Einsatzbereichen zugeordnet wurden:

- Talbrücken: Eisenbahnbrücken über Täler,
- Stahlbrücken: Brücken über Wasserläufe, Kanäle etc.,
- einfache Betonbrücken: für alle anderen Brücken.

Straßenbrücken über Bahntrassen wurden hierbei nicht berücksichtigt, sie sind in der vorliegenden Studie dem Straßenverkehr zugerechnet. Die verwendeten Brückendaten sind in Tabelle 63 dokumentiert.

Tabelle 63: Anzahl der Brücken und deren Länge im aktiven Netz der Deutschen Bahn AG im Jahr 2008 (ohne S-Bahn Berlin und Hamburg)

	Anzahl der Brücken	Anteil an der Anzahl	Gesamtlänge der Brücken	Anteil an der Gesamtlänge	Durchschnittl. Länge
	Anzahl	in %	km	in %	m/Brücke
Talbrücken	174	0,6%	49,7	8,1%	286
Brücken über Wasserläufe, Kanäle, Seen	7.940	29,5%	207,5	34,0%	26
Brücken über Straßen	12.435	46,2%	244,6	40,0%	20
Brücken über Gleise	1.161	4,3%	50,6	8,3%	44
Brücken über Rad-/Fußwege	2.196	8,2%	13,1	2,1%	6
Brücken über Wege für Reisende, Gepäck	2.355	8,7%	20,4	3,3%	9
Übrige Brücken	683	2,5%	25,1	4,1%	37
Insgesamt	26.944	100,0%	611,1	100,0%	23

Quellen: [Schmied/Mottschall 2013]

Hinsichtlich der Materialien der Talbrücken wurde eine Analyse von 15 verschiedenen Brücken an den Neubaustrecken Hannover-Würzburg, Köln-Rhein/Main, Mannheim-Stuttgart und Nürnberg-Erfurt durchgeführt.²¹ Für die Betonbrücken über Straßen etc. lagen hingegen keine Detaildaten vor. Da diese materialeitig vergleichbar sind mit dem Überbau großer Talbrücken, wurden diese Materialmengen herangezogen (Analyse von Materialmengen von sechs Brücken). Auch für die Stahlbrücken wurde vom Öko-Institut eine Internetrecherche durchgeführt und die Materialmengen von fünf ausgewählten Eisenbahnbrücken in Deutschland analysiert.²² Die Ergebnisse befinden sich in Anhang 10.5.1.

Weiterhin wurde der Dieserverbrauch für Maschinen für den Bau der Brücken berücksichtigt (8,4 Liter pro zweigleisigen Brückenkilometer) [Köser et al. 2002].

Im Netz der Deutschen Bahn AG gab es im Jahr 2008 598 **Tunnel** mit einer Gesamtlänge von 452 km [DB 2009d]. Zusätzliche Angaben zur Bauform der Tunnel waren nicht

²¹ Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>, www.arge-nbs.de und www.baustellen-doku.info.

²² Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite> und www.muengstener-bruecke.de.

vorhanden. Da sich die Bauaufwendungen und Materialverbräuche für die verschiedenen Bauweisen merklich unterscheiden, wurde ein durchschnittlicher Tunnel der zu 25 % in offener und 75 % in geschlossener Bauweise erstellt ist, angenommen. Für die Materialverbräuche wurden 15 Tunnel in überwiegend geschlossener Bauweise und 4 Tunnel in offener Bauweise untersucht und als Grundlage für die Annahmen zum Materialverbrauch verwendet (siehe Anhang 10.5.1).

Neben den Materialmengen wurden bei den Tunneln die Baustellenaufwendungen berücksichtigt (Geschlossene Bauweise: 2.200 kWh Strom und 140 Liter Dieselkraftstoff pro zweigleisigen Tunnelmeter, Offene Bauweise: 500 kWh und 100 Liter Dieselkraftstoff pro zweigleisigen Tunnelmeter) [Schmied/Mottschall 2013; Köser et al. 2002].

Zudem wurden für Brücken- und Tunnelbau folgende Transportentfernungen für die Materialien unterstellt:

- Beton 20 km mit Solo-Lkw zGG >26 t,
- Stahl 300 km mit der Bahn sowie
- Erdaushub von 26 m² pro Brückenmeter, 5 km mit einem 40-Tonnen-Lastzug .

Energieversorgung

Im Netz der DB AG sind von den 63.800 km Gleisen rund 48 % elektrifiziert (ohne Gleichstrom-S-Bahnen in Berlin und Hamburg) [DB 2009d]. Dafür wurden die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung und Instandhaltung der Oberleitungen (einschließlich Masten) und der rund 180 Unterwerke ermittelt. Die Berechnungen hinsichtlich der Materialmengen basieren auf Fendrich [2007]; Hillenbrand et al. [2005], Köser et al. [2002] und Steger et al. [2010]. Für die Bilanzierung der Unterwerke wurde zusätzlich auf UIC [2010] und Kiewert et al. [2009] zurückgegriffen (siehe Anhang 10.5.1 zu den Materialmengen). Weiterhin wurde anhand des Stoffstrommodells Gemis (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.5) die Materialvorleistung durch die Bereitstellung vom Strom und Dieselkraftstoff abgeschätzt. Weiterhin wurden die Materialbedarfe der 188 Tankstellen für Schienenfahrzeuge (jeweils 12 t Stahl für einen 80.000-Liter-Tank, 6 t Stahl für Gebäude und Auffangwannen unter den Gleisen sowie rund 40 m² Beton für das Fundament) anhand der Tankanlagen der DB Energie GmbH in Chemnitz und Limburg abgeschätzt. Die daraus resultierenden CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen wurden dann, abweichend von den bisher beschriebenen Bereichen, nicht den Streckenabschnitten zugerechnet, sondern anhand des Strom- und Kraftstoffverbrauches den Verkehrsarten aufgeschlagen. Details können Schmied/Mottschall [2013] entnommen werden.

Signaltechnik und Telekommunikation

In die Bilanzierung der Materialverbräuche durch die Signale sind Daten aus Köser et al. [2002] eingeflossen. Diese wurden für die Kabel für Signale um Informationen aus UIC [2010] und Fendrich [2007] ergänzt. Die Betonmengen, die durch den Bau und Unterhalt der Kabelkanäle verursacht werden, basieren dagegen auf einer Auswertung des Öko-

Instituts zu verschiedenen Konfigurationen der Kabelkanäle [BFL 2006]. Für die Bilanzierung der Linienzugbeeinflussung wurde auf Matthews [2007] zurückgegriffen.

Die Materialverbräuche der rund 4.480 Stellwerke werden anhand von Daten von Kellenberger et al. [2007] und Köser et al. [2002] abgeschätzt und um den ecoinvent-Datensatz „Gebäude, mehrstöckig“ ergänzt. Die Stellwerke können nicht den einzelnen Streckenabschnitten zugeordnet werden, weshalb die daraus entstehenden Emissionen auf einen Gleiskilometer bezogen werden (siehe Tabelle 143 im Anhang).

Gebäude

Bei den Gebäuden werden in Schmied/Mottschall [2013] neben den Personenbahnhöfen der verschiedenen Bahnhofskategorien die Werke und Werkstätten sowie die Güterbahnhöfe berücksichtigt.

Dabei wurde zur Ermittlung der benötigten Mengen an Beton und Stahl der 5.182 **Personenbahnhöfe** (ohne S-Bahn Berlin und Hamburg) [DB 2009c] vereinfachend angenommen, dass die Grundfläche des Gebäudes aus einer 1 m starken Betonschicht, Decken- und Geschossflächen aus 0,2 m starken Betonschichten und Bahnsteige aus einer 0,5 m starken Betonschicht bestehen. Zur Bestimmung der entsprechenden Flächen konnte das Öko-Institut auf einen Datensatz der Deutschen Bahn zurückgreifen [DB 2009a]. Bei der Allokation wurde berücksichtigt, dass auch auf den Bahnhöfen des Personenfernverkehrs ein Großteil des Verkehrs dem Nahverkehr zuzurechnen sind (siehe Tabelle 64).

Tabelle 64: Anteil des Personennahverkehrs an den Zughalften in Bahnhöfen der Kategorie 1 bis 3

Kategorie	Bahnhofsart	Anteil Nahverkehr	Anzahl Stichproben
		In %	Anzahl
1	Fernverkehrsknoten	70 %	4
2	Fernverkehrssystemhalt	70 %	6
3	Regionalknoten mit möglichem Fernverkehrshalt	90 %	15

Quelle: [DB 2009f].

In den **Werken und Werkstätten** der DB werden Schienenfahrzeuge gewartet, repariert und modernisiert. Zudem findet Innen- und Außenreinigung statt. Für die Deutsche Bahn AG betreibt die DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH 15 Werke (nach Internetrecherchen des Öko-Instituts je fünf für Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr), die DB Fernverkehr AG 15 Werke, die DB Regio AG 48 Werkstätten und die Schenker Rail Deutschland AG 29 Werke [DB 2010e]. Die für die Errichtung benötigten Materialmengen an Beton und Stahl wurden für die Werke nach dem gleichen Ansatz wie bei den

Personenbahnhöfen errechnet. Da für die Werke keine Daten zu den Gebäudeflächen vorlagen, wurden diese anhand von Satellitenfotos mit der Software „Google Earth“²³ abgeschätzt. Ähnlich wurde bei der Bestimmung der Anzahl der Stockwerke vorgegangen; dabei wurde auf Luftbilder des Internet-Tools „Bing Maps“²⁴ zurückgegriffen. Detailergebnisse der Recherchen können Schmied/Mottschall [2013] entnommen werden, die sich dabei ergebenden Materialmengen sind im Anhang dokumentiert (siehe Tabelle 146).

Für die **Güterbahnhöfe** wurde auf den einheitlichen Entfernungszeiger für den internationalen Güterverkehr zurückgegriffen, welcher für Deutschland 44 so genannte UTI-Terminals²⁵, 278 Ladestellen bei Bestimmungsbahnhöfen und 445 Bahnhöfe, die nicht zur Infrastruktur der Deutschen Bahn AG gehören, auflistet. Aufgrund von Überschneidungen der aufgeführten Statistikdaten sind 296 Terminals und Abladestellen der DB AG und 445 Unternehmen oder anderen Bahnunternehmen zuzuordnen [DIUM 2009]. Die Berechnung der Materialmengen erfolgte analog zu den Personenbahnhöfen, dafür wurden die Gebäudeflächen von 36 Güterbahnhöfen per Luftbilder durch das Öko-Institut abgeschätzt.

Die Transportdistanzen wurden bei den Gebäuden analog zu der Errichtung von Brücken und Tunneln angesetzt. Beton wird demnach über eine Strecke von 20 km mit einem Lkw mit zGG größer 26 t, Stahl hingegen über eine Entfernung von 300 km mit der Bahn transportiert.

CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen

Die sich aus den oben beschriebenen Bereichen ergebenden CO₂-Äquivalent-Emissionen sind in Bild 30 dargestellt. Insgesamt führt der Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur zu rund 1,6 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr. Mit rund einem Drittel der Emissionen entfällt der größte Bereich auf die Gleise, gefolgt vom restlichen Oberbau (28 %). Die Ingenieurbauten führen in Summe zu rund 15 % der Treibhausgas-Emissionen. Diese Größe bezieht sich auf das gesamte Netz und kann sich zwischen den einzelnen Streckenabschnitten durch die unterschiedliche Topografie stark unterscheiden. Der Unterbau führt ebenso wie die Gebäude und Energieversorgung zu 6 bis 7 % der Emissionen.

²³ Siehe <http://earth.google.de/download-earth.html>.

²⁴ Siehe www.bing.com/maps.

²⁵ UTI-Terminals sind zur Verladung von Großcontainern, Sattelaufliegern, Wechselbehältern und Transportmitteln, die hinsichtlich der ladedienstlichen Behandlung einem Container gleichgestellt werden können, geeignet [DIUM 2009].

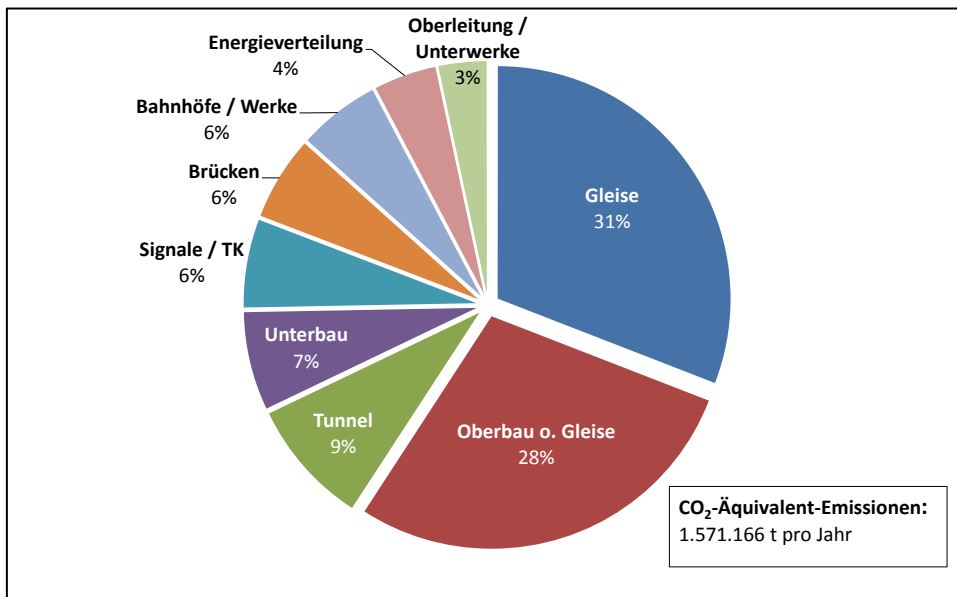


Bild 30: CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau- und Unterhalt der Schienenverkehrsinfrastruktur nach Baumaterial/Bauaufwendungen bzw. nach Verursachergruppen [Schmied/Mottschall 2013]

Werden die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen anhand der Bruttotonnenkilometer allokiert und auf die auf den Streckenabschnitten erbrachte Verkehrsleistung bezogen (mit Ausnahmen der Materialvorleistung von Diesel und Strom, welche anhand der Energieverbräuche aufgeschlagen werden), ergeben sich die in Tabelle 65 aufgeführten spezifischen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen für die drei betrachteten Verkehrsträger.

Tabelle 65: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch Bau und Instandhaltung der Schienenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten

	CO ₂		CO ₂ -Äquivalente	
	t/a	g/Pkm bzw. tkm	t/a	g/Pkm bzw. tkm
Personennahverkehr	423.382	14,4	461.300	15,3
Personenfernverkehr	301.442	8,1	307.698	8,7
Güterverkehr	584.725	6,0	625.257	6,4

Quelle: [Schmied/Mottschall 2013]

6.2 Betrieb der Verkehrsinfrastruktur

Die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur wurden in Schmied/Mottschall [2013] aus dem Energieverbrauch, der von der DB AG nicht für den Fahrbetrieb benötigt wurde, berechnet. Diese Angaben beziehen sich somit auf das Netz der DB AG, unabhängig davon, ob das Netz von der DB AG bzw. von einer

NE-Bahn genutzt wurde. Vereinfachend wurden die Energieverbrauchsdaten des DB-Netzes auf die übrigen Netze übertragen.

Der Energieverbrauch für den Betrieb des DB-Netzes umfasst im Wesentlichen

- die Bürogebäude,
- die Personenbahnhöfe,
- die Instandhaltungswerke sowie
- die Weichenheizungen.

Insgesamt benötigte die Deutsche Bahn AG im Jahr 2008 rund 2.500 GWh Energie für den stationären Bereich (inkl. S-Bahnen und Dritte, die das DB-Netz befahren). Davon entfallen mit 1.500 GWh rund 60 % auf den Stromverbrauch und 40 % auf den Wärmebedarf (davon 37 % Erdgas, 34% Fernwärme, 28% Heizöl und 1% sonstige Energieträger) [DB 2009b]. In Bild 31 ist die Verteilung des Gesamtenergieverbrauchs und der daraus resultierenden THG-Emissionen auf die entsprechenden Bereiche aufgezeigt. Insgesamt wurden in 2008 dadurch CO₂-Emissionen in Höhe von 1,14 Mill. Tonnen bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 1,20 Mill. Tonnen verursacht. Schätzungen zeigen, dass rund 40 % des Gesamtenergieverbrauchs auf die Bürogebäude entfallen. Mit rund 30 % und 20 % tragen die Personenbahnhöfe und Werke zum Gesamtenergieverbrauch bei. Knapp über 10 % sind auf die Weichenheizungen zurückzuführen [DB 2009b] (siehe Bild 31).

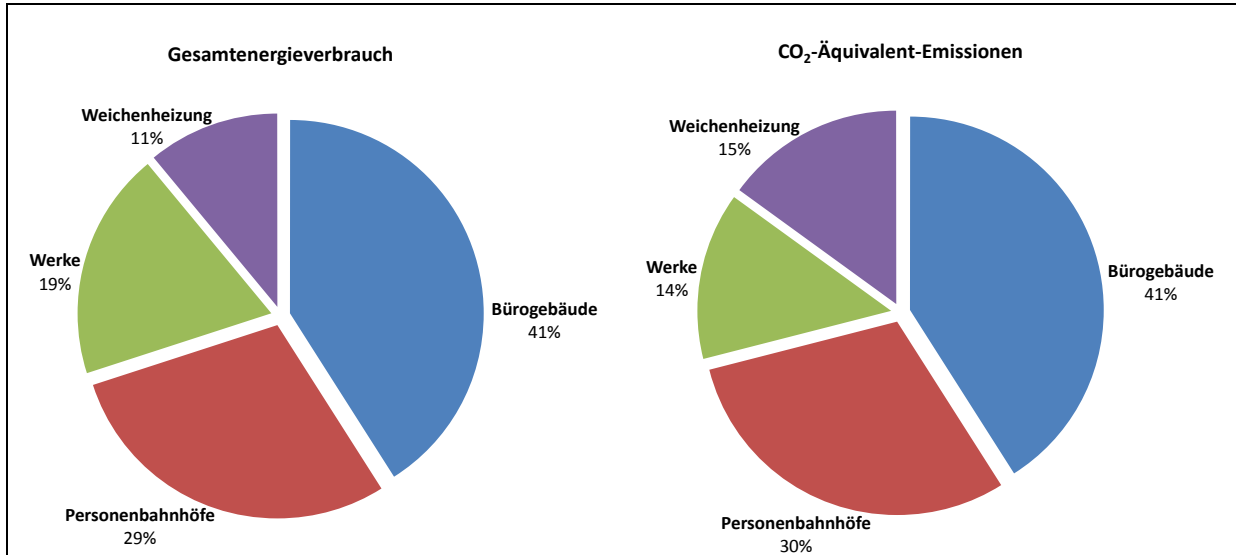


Bild 31: Gesamtenergieverbrauch und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den stationären Bereich der DB AG im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [Schmied/Mottschall 2013]

Für den Betrieb der Schieneninfrastruktur der DB AG im Jahr 2008 ergaben sich für den Personennahverkehr Gesamt-CO₂-Emissionen in Höhe von 0,50 Mill. Tonnen und für den Personenfernverkehr von 0,38 Mill. Tonnen. Die entsprechenden Emissionen beim Güterverkehr liegen mit 0,26 Mill. Tonnen CO₂ deutlich niedriger als beim Personenverkehr [Schmied/Mottschall 2013].

In Tabelle 66 sind die Emissionswerte bezogen auf die Verkehrsleistung abgebildet. Dabei wurden für den Personennah- (einschließlich S-Bahnen) und Personenfernverkehr Verkehrsleistungen von 45,5 Mrd. Pkm bzw. 35,6 Mrd. Pkm zugrunde gelegt. Für den Güterverkehr wurden 114,6 Mrd. tkm für die Berechnungen verwendet.

Tabelle 66: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur im Jahr 2008 nach Verkehrsarten

Verkehrsart	Einheit	CO ₂ -Emissionen	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen
Personennahverkehr	g/Pkm	11,1	11,6
Personenfernverkehr	g/Pkm	10,8	11,3
Güterverkehr	g/tkm	2,2	2,3

Quelle: [Schmied/Mottschall 2013]

Bild 32 zeigt die Aufteilung der spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Personen- und Güterverkehr auf die Verursachergruppen. Diese Gegenüberstellung zeigt – auch wenn es sich um unterschiedliche Einheiten handelt (g/Pkm versus g/tkm) – die Bedeutung der unterschiedlichen Verursacher an den Gesamtemissionen. Beim Güterverkehr dominiert mit mehr der Hälfte der Emissionen die Verwaltung. Beim Personenverkehr entfallen rund 35-40 % der Emissionen auf die Bahnhöfe, also einen Bereich, der beim Güterverkehr nicht vorhanden ist.

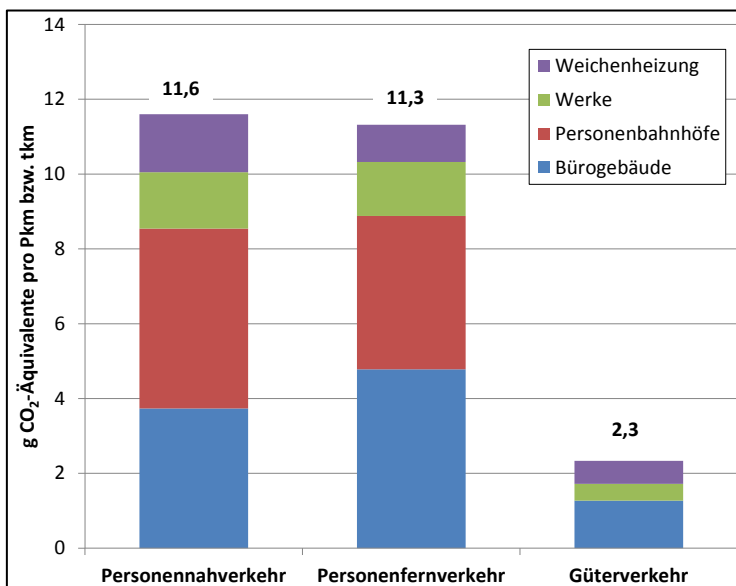


Bild 32: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur, differenziert nach Verkehrsart und Verursachergruppen im Jahr 2008 [Schmied/Mottschall 2013]

6.3 Herstellung und Wartung der Fahrzeuge

Im folgenden Kapitel wird die Berechnung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen, die für die Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge und Waggons in Schmied/Mottschall [2013] ermittelt wurde, vorgestellt. Dabei wurden gesamte Züge bilanziert, d. h. Loks einschließlich der Waggons. Konkret wurden folgende Zugkonfigurationen untersucht:

- *Personenverkehr*
 - Triebfahrzeuge: ICE 1 und ICE 2
 - lokbespannter Fernverkehrszug (Lokomotive und Waggons)
 - lokbespannter Nahverkehrszug (Lokomotive und Waggons)
- *Güterverkehr*
 - lokbespannter Güterzug (Lokomotive und Waggons)

Die konkreten Leistungsmerkmale für diese Zugkonfigurationen sind in Tabelle 67 aufgeführt. Die Daten sind mit Ausnahme der Daten zu den Leergewichten und Kapazitäten der ICE-Typen einer Studie des IFEU-Institutes, die im Auftrag des Öko-Instituts durchgeführt wurde, entnommen [Knörr/Kutzner 2009]. Die Daten zum ICE entstammen der Studie von Köser et al. [2002].

Tabelle 67: Leistungsmerkmale verschiedener Zugkonfigurationen

Fahrzeugkategorie	Leergewicht	Kapazität	Auslastungsgrad	Jahresfahrleistung	Lebensdauer
	t	Plätze bzw. t	ln %	km/a	a
ICE 1 (Triebfahrzeug)	782	669	44%	500.000	40
ICE 2 (Triebfahrzeug)	744	684	44%	500.000	40
lokbespannter Fernverkehrszug	600	700	44%	250.000	40
lokbespannter Nahverkehrszug	200	250	21%	170.000	40
lokbespannter Güterzug	524	1.160	37%	40.000	40

Quelle: [Knörr/Kutzner 2009]; [Köser et al. 2002]; [ecoinvent 2009].

Die den Berechnungen zu Grunde gelegten Materialmengen für den Bau und die Instandhaltung der verschiedenen Zugkonfigurationen werden im Anhang (Kapitel 10.5.3) aufgeführt.

Für den ICE1 und ICE 2 stammen diese aus Köser et al. [2002]. Die Materialmengen für lokbespannte Nah- und Fernverkehrszüge sowie der lokbespannten Güterzüge wurden hingegen einer Studie des IFEU-Institutes entnommen [Knörr/Kutzner 2009]. Die Angaben zu den Instandhaltungsaufwendungen für die lokbespannten Züge sind einer Umwelterklärung von Bombardier für eine Lok der BR 185 entnommen [Bombardier 2003]. Wartungsaufwände für die Waggons konnten aufgrund fehlender Daten beim Personenverkehr nicht berücksichtigt werden. Bei den Waggons der Güterzüge wurde jedoch der Bedarf an eisenhaltigen Bremsklötzen, der bei einer Lebensdauer von 30 Jahren Spielmann et al. [2007] zu Folge bei 3,5 Tonnen pro Waggon liegt, berücksichtigt.

Berechnet wurden bei der Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge ausschließlich die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen, die bei der Produktion der eingesetzten Materialien entstehen. Emissionen, die durch den Energieverbrauch beim Bau der Fahrzeuge und Waggons entstehen wurden nicht berücksichtigt. Weiterhin nicht betrachtet wurden Transporte von den Produktionsstätten der Materialien bis zu den Schienenherstellern. Die Emissionen und Energieverbräuche der Werke, in denen die Wartungen der Schienenfahrzeuge durchgeführt werden, wurden bereits beim Betrieb der Schieneninfrastruktur (siehe Kapitel 6.2) erfasst.

Die durch die Herstellung und Wartung über die gesamte Einsatzdauer der Schienenfahrzeuge aufsummierten Materialmengen wurden dann mit Hilfe der Lebensdauer auf die jährlichen Mengen umgerechnet. Als Lebensdauer wurde für alle Zugkonfigurationen 40 Jahre angesetzt (siehe Tabelle 67). Unter Berücksichtigung der jährlichen Fahrleistung und Auslastungsgrade aus Tabelle 67 ergeben sich die in Tabelle 68 aufgeführten spezifischen CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Zug-Kilometer bzw. pro Pkm und tkm. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Zugkilometer und Jahr sind bei den lokbespannten Nahverkehrszügen mit 88 g am geringsten, bei den Güterzügen

mit 814 g am höchsten. Die Werte für Züge beim Fernverkehr liegen zwischen 141 und 177 g CO₂-Äquivalente pro Zugkilometer und Jahr. Da im Fernverkehr rund 70 % der Zugkilometer mit ICE und rund 30 % mit lokbespannten Zügen erbracht werden, ergibt sich im Durchschnitt ein CO₂-Äquivalent-Wert von rund 156 g pro Zugkilometer und Jahr [Schmied/Mottschall 2013].

Werden die Ergebnisse auf die Verkehrsleistung bezogen, ergibt sich ein anderes Bild. Aufgrund der geringeren Jahresfahrleistung und Auslastung sind die auf die Verkehrsleistung bezogenen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen der Nahverkehrszüge am höchsten. Mit 1,66 g CO₂-Äquivalenten pro Personenkilometer und Jahr liegen die Werte beim Nahverkehrszug um den Faktor 3 bis 3,5 höher als bei den beiden ICE-Varianten bzw. beim lokbespannten Fernverkehrszug. Beim Güterzug liegen die Emissionen pro Tonnenkilometer und Jahr bei 1,88 g (siehe Tabelle 68) [Schmied/Mottschall 2013].

Tabelle 68: Jährliche CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge einschließlich Waggons pro Zug-km sowie pro Pkm bzw. pro tkm

Zugtyp	Pro Zug-Kilometer		Pro Verkehrsleistung	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	g/Zug-km und a	g/Zug-km und a	g/Pkm/a bzw. g/tkm/a	g/Pkm/a bzw. g/tkm/a
ICE 1	150	163	0,51	0,55
ICE 2	129	141	0,43	0,47
Lokbespannter Fernverkehrszug	162	177	0,52	0,58
Durchschnittlicher Fernverkehrszug	142	156	0,47	0,51
Lokbespannter Nahverkehrszug	81	88	1,53	1,66
Lokbespannter Güterzug	751	814	1,73	1,88

Quelle: [Schmied/Mottschall 2013]

6.4 Ergebnisse

In den vorangegangenen Unterkapiteln wurde die Berechnung der Treibhausgasemissionen für folgende Bereiche des Schienenverkehrs vorgestellt:

- Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur,
- Betrieb der Schieneninfrastruktur und
- Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge einschließlich Waggons.

Für den Bereich Bau und Unterhalt der Infrastruktur wurden ausgehend von Detaildaten für das DB-Netz die Treibhausgasemissionen des gesamten deutschen Schienennetzes ermittelt. Für den Betrieb der Schieneninfrastruktur wurden ebenfalls detailliert für das DB-Netz die Treibhausgasemissionen ermittelt. Angaben zum Netz anderer

Infrastrukturbetreiber lagen nicht vor, weshalb die Angaben zum DB-Netz für das Gesamtnetz übernommen wurden. Da anzunehmen ist, dass die Treibhausgasemissionen, bedingt durch den Betrieb des Netzes der anderen Eisenbahninfrastrukturunternehmen, bezogen auf die Verkehrsleistungseinheit tendenziell höher liegen dürfte als im DB-Netz, führt diese Vorgehensweise voraussichtlich zu einer leichten Unterschätzung der betriebsbedingten Infrastrukturemissionen [Schmied/Mottschall 2013].

Tabelle 69: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Schienenverkehrs in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Schieneninfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Schienenfahrzeuge

	Personennahverkehr		Personenfernverkehr		Güterverkehr	
	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	103,8	100%	65,4	100%	33,6	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	76,9	74%	46,0	70%	23,7	71%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	14,4	14%	8,1	12%	6,0	18%
Betrieb Infrastruktur	11,1	11%	10,8	17%	2,2	7%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	1,5	1%	0,5	1%	1,7	5%
CO₂-Äquivalente insgesamt	110,9	100%	70,6	100%	36,0	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	82,3	74%	50,1	71%	25,4	71%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	15,3	14%	8,7	12%	6,4	18%
Betrieb Infrastruktur	11,6	10%	11,3	16%	2,3	6%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	1,7	2%	0,5	1%	1,9	5%

Quelle: [Schmied/Mottschall 2013]

Beim Bau und bei der Wartung der Schienenfahrzeuge wurden deutsche Durchschnittswerte verwendet, die im Güterverkehr für alle Eisenbahnunternehmen repräsentativ sein dürften. Da im Personennahverkehr nichtbundeseigene Eisenbahnen überdurchschnittlich oft Triebfahrzeuge einsetzen, kann – durch die für lokbespannte Nahverkehrszüge ermittelten Treibhausgasemissionen – die Situation bei NE-Bahnen leicht überschätzt worden sein. Aufgrund der geringen Bedeutung der fahrzeugbedingten Emissionen wurde aber auf eine weitergehende Differenzierung verzichtet und für alle Bahnen die Werte eines lokbespannten Nahverkehrszug zugrunde gelegt. [Schmied/Mottschall 2013]

Tabelle 69 zeigt das Ergebnis der Berechnungen für den Schienenverkehr 2008 in Deutschland für die Bereiche Bau/Unterhalt der Infrastruktur, Betrieb der Infrastruktur sowie Bau/Unterhalt der Fahrzeuge aus Schmied/Mottschall [2013]. Die errechneten CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen sind pro Pkm bzw. tkm für den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr dargestellt. Zusätzlich zu diesen Emissionen sind in Tabelle 69 die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen aus dem Fahrbetrieb dargestellt

(einschließlich der Vorketten-Emissionen durch die Bereitstellung der Energieträger) [Schmied/Mottschall 2013].

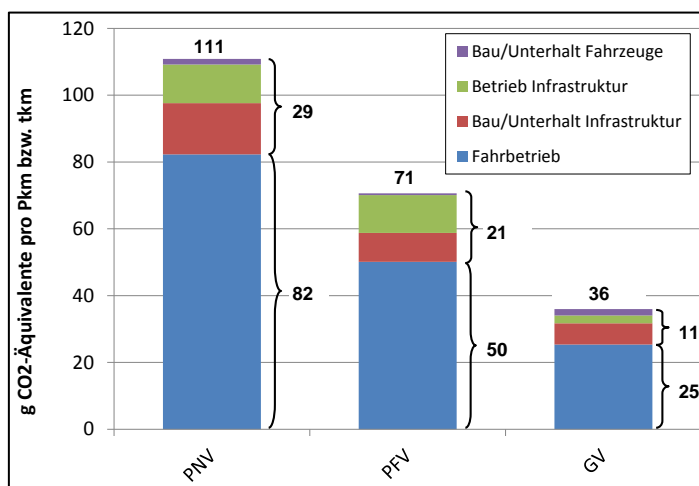


Bild 33: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge in Deutschland [Schmied/Mottschall 2013]

Für den Personennahverkehr ergeben sich laut Schmied/Mottschall [2013] bei Berücksichtigung aller emissionsrelevanten Bereiche CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 111 g/Pkm. Durch den Fahrbetrieb werden dabei 82 g/Pkm emittiert. Der Einbezug der Schienen- und Fahrzeug-Infrastruktur führt somit zu weiteren Emissionen in Höhe von 29 g/Pkm. Beim Personenfernverkehr beträgt dieser Anteil ca. 20 g/Pkm und liegt damit niedriger als beim Personennahverkehr. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen der Gesamtsumme von 70,6 g CO₂-Äquivalenten pro Pkm und dem Fahrbetrieb mit 50,1 g CO₂-Äquivalenten pro Pkm. Beim Güterverkehr tragen Infrastruktur und Fahrzeuge mit 11 g CO₂-Äquivalenten pro tkm bei. Die Emissionen des Fahrbetriebs erhöhen sich damit von 25 g/Pkm auf 36 g/Pkm (siehe Tabelle 69). Bei allen Verkehrsarten entfällt damit mehr als ein Viertel der Gesamtemissionen auf die Schienen- und Fahrzeuginfrastruktur.

Bild 33 zeigt für den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr die Gesamtemissionswerte aufgeteilt in die Bereiche Bau und Unterhalt der Infrastruktur, Betrieb Infrastruktur, Bau und Unterhalt der Fahrzeuge und Fahrbetrieb.

Sensitivitätsberechnung

Entsprechend den Vorgaben der PCR for Railways [PCR 2009] wurde für langlebige Infrastrukturbestandteile (z. B. Brücken, Tunnel, Bahnhöfe) eine Lebensdauer von 60 Jahren angesetzt. In bisherigen Studien wurden hierfür teilweise längere Lebensdauern angesetzt. So wird beispielsweise in der Öko-Bilanzdatenbank ecoinvent mit einer Lebensdauer von 100 Jahren gerechnet. Um den Einfluss einer längeren Lebensdauer zu berücksichtigen, wurde daher eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, bei der für alle

langlebigen Infrastrukturbestandteile eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen wurde. Für kurzlebige Bestandteile der Infrastruktur (z. B. Fahrdrähte) wurden weiterhin die entsprechend kürzeren Lebensdauern angenommen [Schmied/Mottschall 2013].

Bild 34 zeigt die Ergebnisse dieser Sensitivitätsberechnung für den Bereich Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur, differenziert nach den drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr. Beim Schienenpersonennahverkehr reduzieren sich durch die längere Lebensdauer die CO₂-Emissionen um 1,8 g/Pkm und die CO₂-Äquivalent-Emissionen um 1,7 g/Pkm. Beim Personenfernverkehr beträgt die Reduktion der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen 1,2 g/Pkm bzw. 1,4 g/Pkm. Die stärkere Reduktion der Treibhausgasemissionen beim Nah- gegenüber dem Fernverkehr ist auf den größeren Einfluss der Bahnhöfe und Werke zurückzuführen (siehe Bild 34), die beim Personennahverkehr zu Reduktionen von 0,7 g/Pkm CO₂-Äquivalente beitragen. Beim Personenfernverkehr hingegen liegt die Reduktion durch die längere Lebensdauer der Bahnhöfe und Werke bei unter 0,1 g/Pkm CO₂-Äquivalente. Den größten Anteil der Reduktion besitzt in diesem Fall die längere Lebensdauer der Tunnel, deren Einfluss mit 0,7 g/Pkm CO₂-Äquivalente deutlich größer ist als beim Nahverkehr (0,2 g/Pkm). Beim Güterverkehr hingegen beläuft sich die Minderung bei einer 100-jährigen Lebensdauer auf rund 0,6 g/tkm. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Lebensdauer auf die Emissionen eine ähnliche Größenordnung erreicht wie die gesamten Emissionen der Fahrzeugproduktion und -wartung (siehe Bild 33).

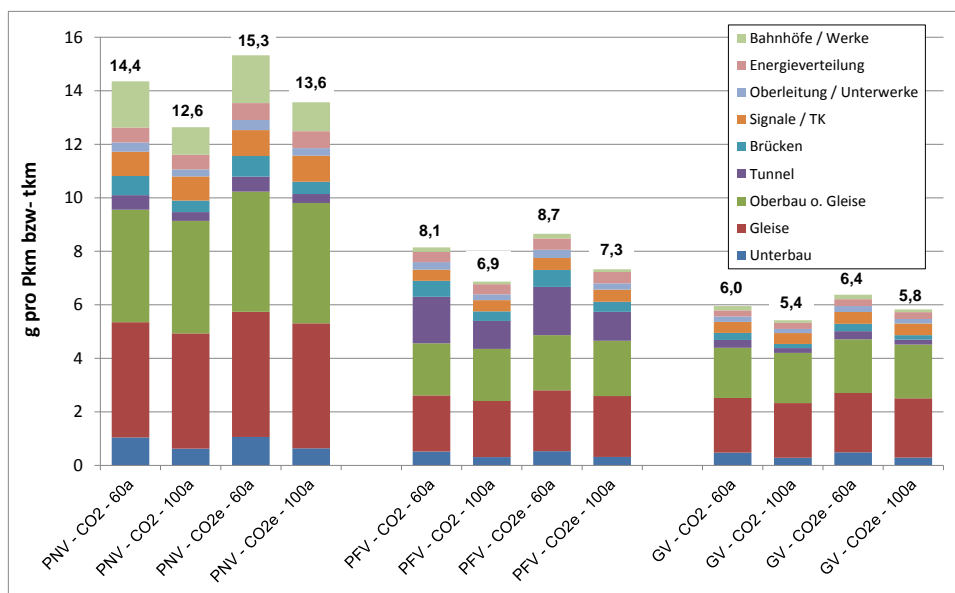


Bild 34: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur in Deutschland im Jahr 2008 unter Berücksichtigung einer Lebensdauer für langlebige Infrastrukturen von 60 bzw. 100 Jahren [Schmied/Mottschall 2013]

7 Gesamtergebnisse

7.1 Gesamtergebnis

In den vorangegangenen Kapiteln wurden für den Straßen-, Schienen- und Luftverkehr sowie die Binnenschifffahrt die Treibhausgasemissionen für folgende Bereiche ermittelt:

- Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur,
- Betrieb der Verkehrsinfrastruktur und
- Bau und Unterhalt der Fahrzeuge.

Die Detailergebnisse für die einzelnen Verkehrsträger sind in den Unterkapiteln 3.4, 4.4, 5.4 und 6.4 aufgeführt. Dieses Kapitel stellt die Werte der Verkehrsträger gegenüber und vergleicht dabei die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Personennahverkehr, Personenfernverkehr und den Güterverkehr. Dabei sind die Werte bereits aggregiert, d. h. in diesem Vergleich werden nicht mehr die verschiedenen Größenklassen bei den Pkw oder Entfernungskategorien bei den Flugreisen aufgeführt. Zudem werden Werte verglichen, bei denen die Nutzung auch vergleichbar ist.

Tabelle 70: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Infrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge

	Personennahverkehr					
	Pkw		Bahn Nahverkehr		Linienbus	
	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	162,6	100%	103,8	100%	87,2	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	144,7	89%	76,9	74%	75,6	87%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	7,6	5%	14,4	14%	6,5	7%
Betrieb Infrastruktur	0,8	0%	11,1	11%	0,1	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	9,5	6%	1,5	1%	5,0	6%
CO₂-Äquivalente insgesamt	165,8	100%	110,9	100%	88,7	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	146,6	88%	82,3	74%	76,3	86%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	8,1	5%	15,3	14%	7,0	8%
Betrieb Infrastruktur	0,8	1%	11,6	10%	0,1	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	10,4	6%	1,7	2%	5,4	6%

Quellen: [Richter 2010]; [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

Tabelle 70 zeigt das Ergebnis der Berechnungen für den **Personennahverkehr** mit dem Pkw, der Bahn und dem Linienbus im Jahr 2008 in Deutschland für die Bereiche Bau/Unterhalt der Infrastruktur, Betrieb der Infrastruktur sowie Bau/Unterhalt der

Fahrzeuge. Die errechneten CO₂- und CO₂-Äquivalent- Emissionen sind pro Pkm dargestellt. Zusätzlich zu diesen Emissionen sind in Tabelle 70 die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen aus dem Fahrbetrieb dargestellt (einschließlich der Vorketten-Emissionen durch die Bereitstellung der Energieträger). Diese Werte wurden dem Verkehrsemissionsmodell TREMOD entnommen.

Bild 35 verdeutlicht anschaulich, dass sich die Reihenfolge der Verkehrsmittel im Personennahverkehr auch unter Einbezug der Treibhausgas-Emissionen aus Bau/Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie Bau/Unterhalt der Fahrzeuge nicht wesentlich verändert²⁶. Die höchsten CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm werden mit rund 166 g/Pkm bei den Pkw verursacht. Der Schienenverkehr hat mit 26 % bzw. 29 g CO₂-Äquivalente pro Pkm zwar den größten Anteil an Infrastruktur- und Fahrzeugbedingten Emissionen, liegt bei den Gesamtemissionen jedoch noch immer rund 33 % unter den Pkw. Der Linienbusverkehr verursacht durch diese umfassendere Betrachtungsweise insgesamt rund 89 gCO₂e pro Pkm und liegt damit immer noch rund 47 % unter den Pkw. Der Klimavorteil des Schienennahverkehrs gegenüber dem Pkw sinkt durch diesen umfassenderen Umweltvergleich leicht. Wird allein der Fahrbetrieb betrachtet, schneidet die Bahn um rund 62 gCO₂e/Pkm besser ab als der Pkw. Unter Einbezug von Infrastruktur und Fahrzeugen liegt dieser Vorteil nur noch bei 55 gCO₂e/Pkm. Beim Linienbusverkehr hingegen vergrößert sich der Klimavorteil durch den Einbezug von Infrastruktur und Fahrzeugen von 70 auf 77 gCO₂e/Pkm.

²⁶ Bei den Pkw wird für den Fahrbetrieb beim Personennah- und Personenfernverkehr nicht zwischen den Fahrsituationen unterschieden.

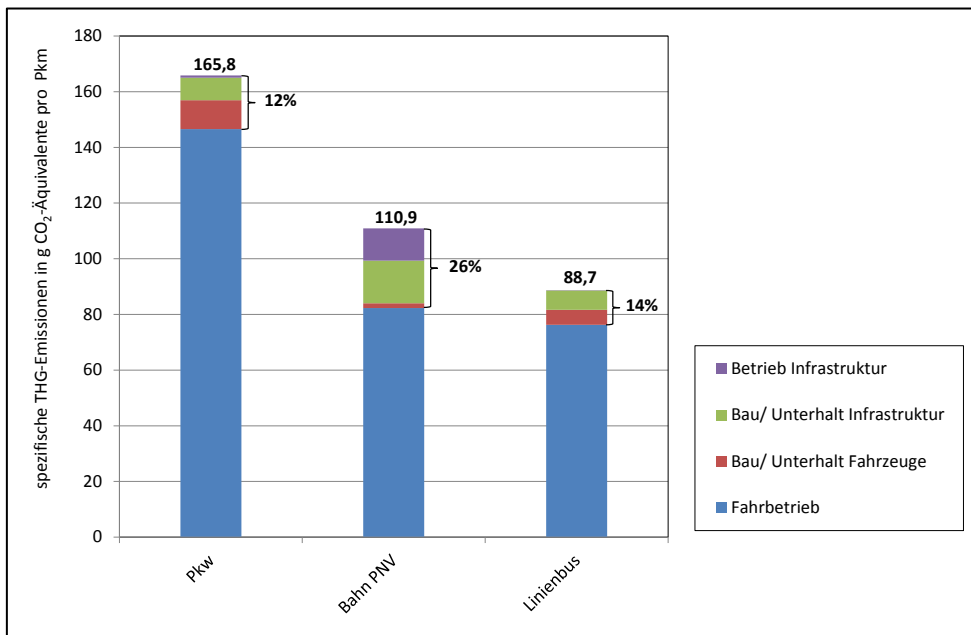


Bild 35: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Personennahverkehr [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen]

Die sich im **Personenfernverkehr** ergebenden CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm werden in Tabelle 71 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die absoluten Emissionen durch Bau/Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie Bau und Unterhalt der Fahrzeuge beim innerdeutschen Luftverkehr mit 27 gCO₂e/Pkm am größten sind und über den Pkw (19 gCO₂e/Pkm), der Bahn (21 gCO₂e/Pkm) und dem Reisebus (7 gCO₂e/Pkm) liegen. Dieses Ergebnis erscheint erstaunlich, da beim Luftverkehr bis auf Start und Landung keine aufwändige Infrastruktur vorgehalten werden muss. Die Ursache dafür liegt in dem hohen Energieverbrauch der Flughäfen, wodurch der Betrieb zu 74 % der zusätzlich zum Fahrbetrieb entstehenden CO₂-Äquivalent-Emissionen beiträgt.

Tabelle 71: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Infrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge

	Personenfernverkehr							
	Innerdeutsche Flüge		Pkw		Bahn Fernverkehr		Reisebus	
	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %	g/Pkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	255,8	100%	162,6	100%	65,4	100%	37,4	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	230,2	90%	144,7	89%	46,0	70%	30,9	83%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	6,6	3%	7,6	5%	8,1	12%	4,7	13%
Betrieb Infrastruktur	18,9	7%	0,8	0%	10,8	17%	0,0	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,02	0,01%	9,5	6%	0,5	1%	1,8	5%
CO₂-Äquivalente insgesamt	260,5	100%	165,8	100%	70,6	100%	38,1	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	233,7	90%	146,6	88%	50,1	71%	31,1	82%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	6,9	3%	8,1	5%	8,7	12%	5,0	13%
Betrieb Infrastruktur	19,9	8%	0,8	1%	11,3	16%	0,0	0%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,02	0,01%	10,4	6%	0,5	1%	1,9	5%

Quellen: [TREM0D 5.25; eigene Berechnungen]

Die Ergebnisse für die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen sind in Bild 36 in Form eines Balkendiagramms dargestellt. Es wird deutlich, dass auch unter Einbezug der zusätzlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen der Luftverkehr (261 gCO₂e/Pkm) und der Pkw-Verkehr (166 gCO₂e/Pkm) zu hohen Emissionen führen. Die Reisebusse verursachen sowohl die niedrigsten spezifischen Emissionen im Fahrbetrieb als auch die niedrigsten gesamten spezifischen Emissionen (38 gCO₂e/Pkm) und liegen damit um rund 85 % unter den Inlandsflügen. Mittelfristig kann jedoch der Personenfernverkehr der Bahn durch die Erhöhung des Anteils an Strom aus erneuerbaren Energien den Reisebus als emissionsärmsten Verkehrsträger im Fahrbetrieb ablösen. Bei grenzüberschreitenden Flügen zeigt sich in den Entfernungskategorien bis 1.000 km ein ähnliches Bild (siehe Tabelle 123 im Anhang). Bei den Langstrecken, bei denen die größere Klimawirksamkeit der Flugemissionen eine wesentliche Rolle einnimmt, nimmt der Einfluss der Infrastruktur dagegen deutlich ab. Diese stehen jedoch nicht in Konkurrenz zu den anderen Verkehrsmitteln, weshalb auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird.

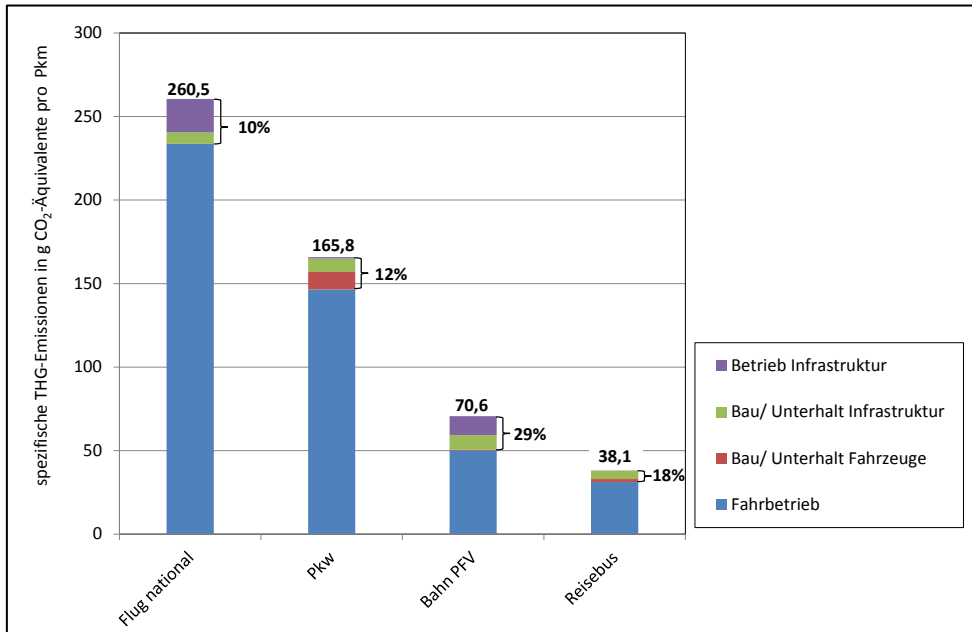


Bild 36: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Personenfernverkehr [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen]

Die Ergebnisse für den **Güterverkehr** sind in Tabelle 70 zusammengefasst. Während die spezifischen Emissionen aus dem Fahrbetrieb für die Luftfracht, den Straßengüterverkehr und den Güterverkehr mit der Bahn TREMOD²⁷ entnommen sind, wurden die Energieverbrauchsdaten für die Binnenschifffahrt anhand einer Studie des IFEU- und des Öko-Institut entnommen [Knörr et al. 2011]. Die errechneten CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen sind pro tkm dargestellt. Um vergleichbare Werte der verschiedenen Verkehrsträger gegenüberzustellen, zeigt Tabelle 72 und die darauffolgenden Abbildungen (Bild 37 und Bild 38) die grenzüberschreitenden Luftfracht, die den Großteil der Luftfracht ausmacht und deren Emissionen deutlich unter der innerdeutschen Luftfracht liegen (siehe Tabelle 125). Die dargestellte, für den Straßengüterverkehr typische Fahrzeugkategorie sind die Last- und Sattelzüge mit einem zGG bis 40 Tonnen, welche rund 88 % der Verkehrsleistung erbringen.

²⁷ Während für den Straßengüterverkehr und die Luftfracht in der vorliegenden Studie auf Tremod 5.25 zurückgegriffen werden konnte, verwenden Schmied und Mottschall [2013] für den Schienenverkehr Daten aus TREMOD 5.01.

Tabelle 72: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen im Güterverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Infrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge

	Güterverkehr							
	Grenzüber-schreitende Luftfracht		Last- und Sattelzug 40 t		Binnenschifffahrt		Bahn	
	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %	g/tkm	Anteil in %
CO₂ insgesamt	931,5	100%	93,6	100%	37,8	100%	33,6	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	895,1	96%	77,5	83%	29,7	79%	23,7	71%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	9,4	1%	13,9	15%	7,3	19%	6,0	18%
Betrieb Infrastruktur	26,8	3%	0,1	0%	0,2	1%	2,2	7%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,18	0,02%	2,1	2%	0,5	1%	1,7	5%
CO₂-Äquivalente insgesamt	945,5	100%	95,9	100%	38,3	100%	36,0	100%
Fahrbetrieb (inkl. Vorkette)	907,2	96%	78,6	82%	29,8	78%	25,4	71%
Bau/Unterhalt Infrastruktur	9,8	1%	14,9	15%	7,7	20%	6,4	18%
Betrieb Infrastruktur	28,3	3%	0,1	0%	0,2	1%	2,3	6%
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,19	0,02%	2,3	2%	0,6	2%	1,9	5%

Quellen: [Richter 2010]; [TREMOD 5.25; eigene Berechnungen]

Bild 37 verdeutlicht die sehr große Differenz zwischen den anderen Verkehrsmitteln des Güterverkehrs und der Luftfracht, welche mit spezifischen Gesamtemissionen von 946 gCO₂e/tkm um ein Vielfaches über den anderen Verkehrsmitteln liegt. Durch den Bau/Unterhalt und Wartung der Infrastruktur sowie der Fahrzeugherstellung werden bei der grenzüberschreitenden Luftfracht 38 gCO₂e/tkm verursacht, was 4 % der gesamten spezifischen Emissionen entspricht. Auch wenn die transportierten Güter häufig nicht vergleichbar sind (Massengüter ↔ teure Güter), liegen damit die zusätzlichen Emissionen pro tkm etwa in der Höhe der Gesamtemissionen bei der Binnenschifffahrt (38 gCO₂e/tkm) und über den Gesamtemissionen beim Schienengüterverkehr (36 gCO₂e/tkm). Dabei ist die für den Luftverkehr wichtige höhere Klimawirksamkeit nicht berücksichtigt, durch die die Emissionen des Flugbetriebs etwa doppelt so hoch ausfallen würden.

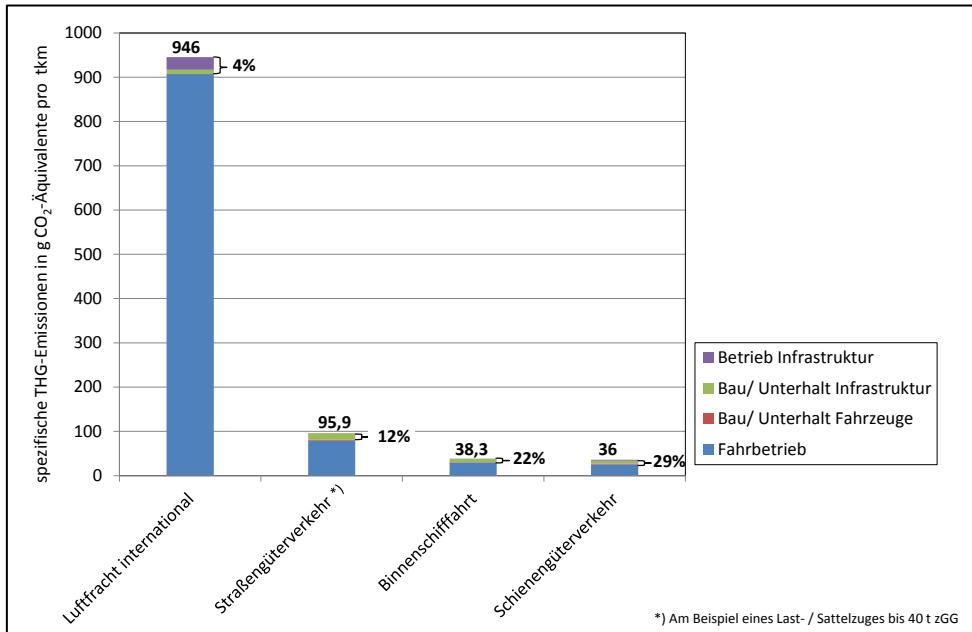


Bild 37: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Güterverkehr [TREMOD 5.25; Knörr et al. 2011; eigene Berechnungen]

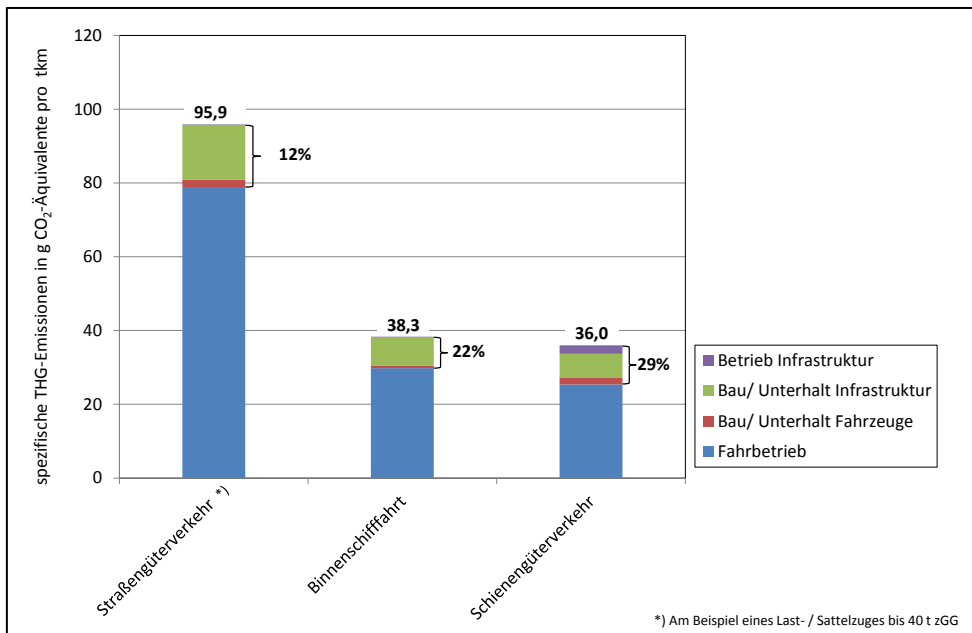


Bild 38: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Güterverkehr (ohne Luftfracht) [TREMOD 5.25; Knörr et al. 2011; eigene Berechnungen]

Bild 38 stellt die Ergebnisse nochmals ohne die Luftfracht dar. Absolut betrachtet fällt der Beitrag durch die Infrastruktur und die Fahrzeuge bei der Binnenschifffahrt mit 9 gCO₂e/tkm am geringsten aus, wobei bei der Berechnung in diesem Bereich die größten Unsicherheiten bestehen, bspw. bezüglich verkehrsfremder Funktionen. Beim Schienengüterverkehr verursachen Bau/Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur und der Fahrzeuge mit 11 g CO₂e/tkm rund 29 % der Gesamtemissionen. Im Gegensatz zur Luftfracht und der Binnenschifffahrt ist die Fahrzeugherstellung beim Straßen- und Schienengüterverkehr nicht vernachlässigbar und führt bei beiden zu Emissionen in Höhe von rund 2 gCO₂e/tkm.

Die Ergebnisse zeigen, dass die durch die Infrastruktur und Fahrzeuge verursachten Emissionen im Personenverkehr zwischen 10 und 29 % der Gesamtemissionen ausmachen, beim Güterverkehr sind es zwischen 4 und 29 %. Obwohl sich an der Reihenfolge zwischen den Verkehrsmitteln nichts grundlegend verändert, zeigen die Ergebnisse also, dass diese Bereiche nicht vernachlässigbar sind und in zukünftigen Verkehrsmittelvergleichen mit einbezogen werden sollten.

7.2 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit Untersuchungen zu CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Verkehrsinfrastruktur sowie durch den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge verglichen. In die Gegenüberstellung der Ergebnisse werden folgende Studien einbezogen:

- Dissertation mit dem Titel "Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States" aus dem Jahre 2008 [Chester 2008]²⁸
- Studie zu „Primärenergiefaktoren von Transportleistungen“ aus dem Jahr 2009 [Frischknecht/Stucki 2009], die auf Daten der Ökobilanzdatenbank ecoinvent basiert [Spielmann et al. 2007] und in starkem Maße die Situation für die Schweiz abbildet.
- Aktuelle Studie zur Rolle der Infrastruktur und Fahrzeuge auf den Pfad bis 2050, welche auf einem Literaturreview basiert [Hill et al. 2012]

Chester 2008

Die Bilanzierung der Umweltauswirkungen erfolgte bei Chester [2008] mit Hilfe der Ökobilanzsoftware SimaPro. Zusätzlich wurden mit Hilfe von ökonomischen Methoden über Angaben zu den Kosten die Treibhausgasemissionen von Versicherungen für Gebäude, Fahrzeuge und Beschäftigte ermittelt [Chester 2008]. Dabei werden die

²⁸ Die Ergebnisse dieser Dissertation wurden unter dem Titel „Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains“ in der Zeitschrift „Environmental Research Letters“ im Jahr 2009 veröffentlicht [Chester/Horvath 2009].

spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Personenverkehr für die Bereiche Straßenverkehr, Schienenverkehr und den Flugverkehr ermittelt.

Straßenverkehr

Chester [2008] gibt die spezifischen Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur für den am Beispiel verschiedener Pkw und Busse an. Für die Pkw wird dabei zwischen den drei Fahrzeugkategorien „Limousinen“, „SUVs“ und „Pickup Trucks“ unterschieden, welche nicht einfach den deutschen Fahrzeugklassen zugeordnet werden können. Der weitere Vergleich beschränkt sich daher auf die Limousinen, zu welchen Chester bspw. den Honda Accord, Ford Focus oder Toyota Prius zählt, welche der Mittelklasse bzw. oberen Mittelklasse zugerechnet werden können. Für die Limousinen ergeben sich spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 34,9 gCO₂e/Pkm. Diese liegen deutlich über denen der vorliegenden Studie für den Pkw-Bereich (z.B. Pkw Mittel: 8,4 gCO₂e/Pkm). Dies scheint verwunderlich, da Chester für den Bau der Straßen eine Lebensdauer von lediglich 10 Jahren ansetzt. Tabelle 73 zeigt die CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Bau zweier vergleichbarer Straßenkategorien. Es wird deutlich, dass die absoluten durch den Bau verursachten Emissionen durchaus vergleichbar sind. Für die Autobahn liegen diese sogar rund 1.000 t über der vergleichbaren Kategorie (Interstate). Chester [2008] verwendet für diese Berechnungen ein externes Tool, die Annahmen und Detailergebnisse, auch zu den Materialmengen, gehen deshalb nicht aus der Studie hervor.

Tabelle 73: CO₂ Äquivalent Emissionen für zwei vergleichbare Straßenkategorien aus [Chester 2008] und dieser Studie

Straßenkategorie	Kg CO₂e/km
Interstate	2.219
Autobahn	3.375
Local Street avg.	466
Gemeindestraße	420

Quellen: [Chester 2008; eigene Berechnungen]

Letztlich können sich die unterschiedlichen, durch den Betrieb verursachten Emissionen nur durch eine unterschiedliche Allokationsmethode erklären. Chester verteilt die Emissionen der Straßenkonstruktion über die Fahrleistung („vehicle miles traveled“), des Weiteren geht die Studie nur auf den Personenverkehr ein. Ob der Güterverkehr bei der Allokation mit berücksichtigt wurde, ist nicht klar ersichtlich, aber auch weitestgehend irrelevant. Nur 10 % der gesamten Fahrleistung wurde in den USA im Jahr 2008 durch den Güterverkehr verursacht. Dementsprechend werden mindestens 90 % der Emissionen des Baus der Straßeninfrastruktur in Chester auf den Personenverkehr verteilt. Diese Studie benutzt eine Allokation über die Bruttotonnenkilometer der Fahrzeuge (siehe Kapitel 2.3). Daraus ergibt sich für den Güterverkehr ein Anteil von 52 %.

Chester betrachtet zusätzlich Parkflächen, welche beim Bau der Infrastruktur einen Anteil von 15-20 % der THG-Emissionen haben. Parkflächen sind in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Die Werte können aufgrund der unterschiedlichen Allokationsmethode und Abgrenzung nur bedingt miteinander verglichen werden.

Ähnliches gilt für die Ergebnisse aus dem Bereich Betrieb der Infrastruktur. Für die Fahrzeugkategorie „Limousine“ liegen die spezifischen Emissionen mit rund 5,3 gCO₂e/Pkm rund 13-fach über den der vorliegenden Studie (0,4g CO₂e/Pkm für Pkw mittel). Ursache sind einerseits unterschiedliche Abgrenzungen – Chester [2008] berücksichtigt neben der Beleuchtung der Straßen und Parkplätze auch die Verwendung von Herbiziden und das Salzen der Straßen. Für den Stromverbrauch durch die Straßenbeleuchtung geht Chester von einem mehr als doppelt so hohen Energieverbrauch aus: Während sich für Deutschland in der vorliegenden Studie knapp 6 MWh/km Straßennetz ergeben liegt der Wert in den USA Chester [2007] zu Folge 13 MWh/km befestigtem Straßennetz. Schlussendlich unterscheiden sich auch die verwendeten Emissionsfaktoren für Strom. Chester benutzt als Durchschnittswert für die nationale Stromproduktion einen Wert von umgerechnet 0,76 kg CO₂e / kWh. Diese Studie verwendet einen Emissionsfaktor von 0,639 kg CO₂e / kWh.

Hinsichtlich des Baus und Unterhalts der Fahrzeuge liegen sowohl die spezifischen als auch die absoluten Emissionen in der Studie von Chester [2008] über denen der vorliegenden Studie: Während die vorliegende Studie für einen mittleren Pkw von 9,9 g CO₂e/Pkm ausgeht, ermittelt Chester für eine Limousine mit 27,7 g CO₂e/Pkm mehr als das Doppelte. Ursache sind verschiedene Bilanzierungsansätze. Die vorliegende Studie kommt mit einer orientierenden Stoffstromanalyse, bei der Energieverbräuche für die Herstellung unberücksichtigt bleiben, auf rund 3 t CO₂-Äquivalente-Emissionen für die Herstellung eines Fahrzeuges. Chester hingegen benutzt eine Economic Input-Output-LCA (Life Cycle Assessment/Ökobilanz) und ermittelt damit Emissionen in Höhe von über 8 t CO₂-Äquivalenten für eine Limousine. Aufgrund der stark unterschiedlichen Methoden kann an dieser Stelle keine genauere Aussage über die Ursache der großen Differenz getroffen werden.

Luftverkehr

Für den Bau der Infrastruktur hat Chester [2008] nach Passagierabfertigungen und Flugzeugtypen einen durchschnittlichen Flughafen ausgewählt und den Bau ökologisch bewertet. Insgesamt ermittelt er einen Beitrag von 4,6 g CO₂e / Pkm für Kurz- und Mittelstrecken und 4,0 g CO₂e / Pkm für Langstrecken. Wie auch in dieser Studie haben die Gebäude einen verschwindend geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die Lebensdauer der betrachteten Start- und Landebahnen, Flugbetriebsflächen und Parkflächen hat Chester [2008] mit 10 Jahren veranschlagt. Ein großer Unterschied ergibt sich durch die Verteilung der Emissionen auf die Flüge. Chester [2008] benutzt wie im Straßenverkehr die Fahrleistung als Verteilungsschlüssel. Die vorliegende Studie hat, wie

in Kapitel 2.3 beschrieben, die auf den Flughäfen abgefertigten Verkehrseinheiten in verschiedene Entfernungskategorien herangezogen. Dadurch werden Lang- und Kurzstrecken pro Start absolut ein vergleichbarer Teil der Emissionen zugerechnet. Bezogen auf die Verkehrsleistung führt dies zu geringeren Emissionen bei den Langstreckenflügen (Dieses Vorgehen ist vergleichbar mit den LTO- Emissionen, die unabhängig von der Flugstrecke zu einem mehr oder weniger fixen Beitrag führen). Daher liegt der Wert für nationale Flüge mit 6,9 gCO₂e/Pkm in dieser Studie deutlich darüber, aber der Wert für internationale Flüge mit 1,0 gCO₂e/Pkm deutlich unter den Werten von Chester [2007].

Zum Betrieb der Infrastruktur zählt Chester [2008] die Beleuchtung der Flugbetriebsflächen, verwendete Enteismittel und hat die Fahrzeuge der Bodenverkehrsdienste untersucht, wobei die letzten beiden Posten eher groben Schätzungen entsprechen. Die vorliegende Studie beinhaltet zwar die Enteismittel nicht, berücksichtigt dagegen die gesamten Energie- und Kraftstoffverbräuche an den Flughäfen. Chester [2008] kommt auf rund 2 g CO₂e / Pkm, wobei rund 75 % auf den Betrieb der Fahrzeuge der Bodenverkehrsdienste entfallen. In diesem Punkt unterscheiden sich die Studien sehr stark voneinander. Die vorliegende Studie kommt wie in Kapitel 4.2 ermittelt wurde und in Bild 17 dargestellt wird, zu dem Ergebnis, dass die Emissionen durch die Kraftstoffverbräuche der Fahrzeugflotte zu gerade rund 10% zu den Gesamtemissionen durch den Energieverbrauch der Flughäfen beitragen. Die Ergebnisse liegen demnach mit 19,9 g CO₂e / Pkm bei nationalen Flügen und 2,8 g CO₂e / Pkm bei internationalen Flügen deutlich über denen von Chester [2008].

Für den Bau und Unterhalt der Flugzeuge wird in Chester [2008] entsprechend dem Vorgehen bei den Straßenfahrzeugen eine Economic input-output LCA als Grundlage für die Emissionsberechnungen herangezogen. Hierbei bedient er sich 3 verschiedener Flugzeugtypen, welche repräsentativ für unterschiedliche Entfernungskategorien stehen: die Embraer 145 für Kurzstreckenflüge, die Boeing 737 für Mittelstreckenflüge und die Boeing 747 für Langstrecken.

Für den Bau der Flugzeuge ermittelt Chester [2008] 6.900 t CO₂-Äquivalent-Emissionen für das Kurzstreckenflugzeug, 20.300 t CO₂-Äquivalent-Emissionen für ein Mittelstreckenflugzeug und 63.000 t CO₂-Äquivalent-Emissionen für ein Langstreckenflugzeug. Dies entspricht 9,3 g CO₂e / Pkm, 2,5 g CO₂e / Pkm und 8,3 g CO₂e / Pkm. Im Vergleich zu den in dieser Studie ermittelten spezifischen Werten liegen diese um einen Faktor 50-100 höher. Wieder gilt, dass sich Differenzen der Werte aufgrund der grundsätzlich verschiedenen Berechnungsmethoden schlecht vergleichen lassen. Fest steht aber auch, dass die vorliegende Studie nur die Materialherstellung und deren Vorkette betrachtet. Energieverbräuche durch den Zusammenbau, Verarbeitung und Transporte sind hier nicht berücksichtigt. Es ist also davon auszugehen, dass die tatsächlichen Emissionen durch den Flugzeugbau unterschätzt werden. Andererseits gibt es eine große Differenz in den verwendeten Flugkilometern über die Lebenszeit der Flugzeuge. Für Kurz- und Langstreckenflugzeuge kommt Chester [2008] auf rund 23 und

25 Millionen vkm, für Mittelstreckenflugzeuge aber auf 82 Millionen vkm. Die vorliegende Studie ist von einem einheitlichen Wert von rund 56 Millionen vkm ausgegangen.

In Kapitel 2.3 wurde schon diskutiert, dass beim Personenflugverkehr eine Aufteilung der anfallenden Emissionen vorgenommen werden muss, da die Belly-Freight – zusätzlich zum Personenverkehr transportierte Güter - berücksichtigt werden sollte. Chester [2008] rechnet das Verhältnis zwischen dem Gewicht von Passagieren mit Gepäck und der mittransportierten Fracht aus und benutzt dies als Allokationsschlüssel (siehe Tabelle 74). Als durchschnittlichen Passagier berechnet Chester 150 plus 40 Pfund, für Mensch und Gepäck. Dies entspricht rund 86,2 kg. Die vorliegende Studie benutzt den unter Flugveranstaltern gängigen Wert von 100 kg pro Person mit Gepäck. Das bedeutet, dass die Allokation dieser Studie einen etwas höheren Anteil auf den Personenverkehr umlegt. Nach dem Vorgehen in Kapitel 2.3 wurden für diese Studie für den nationalen Passagierverkehr rund 4 % und für den internationalen 21 % Umlegung auf die Fracht ermittelt.

Tabelle 74: Gewicht von Passagieren, Fracht und Post auf einem durchschnittlichen Flug nach [Chester 2008]

Aircraft Size	Number of Passengers	Weight of Passengers & Luggage (lbs)	Weight of Freight (lbs)	Weight of Mail (lbs)	% Weight to Pax
Small	33	6.300	50	7	99%
Medium	101	19.000	360	150	97%
Large	305	58.000	10.000	1.600	83%

Quelle: Chester 2008

Der Unterhalt der Flugzeuge wird über einen durchschnittlichen Wert der anfallenden Reparaturkosten pro Flugstunde berechnet, wobei auch hier die Zuteilung der ökologischen Auswirkungen über die EIO LCA berechnet wird. Über diese Art der Berechnung kommt Chester [2008] auf zusätzlich rund 2 g CO₂e / Pkm. Dieser Bereich wird in der vorliegenden Studie nicht abgebildet.

Schiienenverkehr

Es wurden die drei Zuggattungen BART (Bay Area Rapid Transit), Caltrain und CAHSR (California High Speed Rail) betrachtet. Während die Zuggattung BART mit einer S-Bahn verglichen werden kann, entsprechen dieselbetriebene Caltrain-Züge klassischen Nahverkehrszügen. Bei der CAHSR handelt es sich um eine geplante 700 Meilen lange Hochgeschwindigkeitsstrecke in Kalifornien [Chester 2008]. Die von Chester [2008] ausgewiesenen Treibhausgasemissionen in g CO₂-Äquivalente pro Pkm enthalten für den Bereich Bau und Wartung der Infrastruktur die Komponenten Gleise, Energieversorgung einschließlich der Unterwerke, Bahnhöfe sowie Parkplätze. Die Errichtung von Tunneln und Brücken wird hingegen nicht berücksichtigt. Beim Betrieb der Infrastruktur wurden u. a. folgende Bereiche in die Analyse einbezogen: Zugsicherung, Beleuchtung des

Bahnhofes und der Parkplätze, der Betrieb der Rolltreppen, die Reinigung des Bahnhofes und für den Betrieb notwendige Versicherungen. Für die Fahrzeuge wurden die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung, Wartung, Instandsetzung, Reinigung sowie Versicherungen berücksichtigt [Chester 2008].

Die CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versicherungen liegen für die Zugart BART bei 1,1 g/Pkm, für Caltrain bei 1,6 g/Pkm und für CAHSR bei 0,4 g/Pkm. Diese Werte werden bei der Gegenüberstellung getrennt ausgewiesen, da sie in den anderen Studien nicht mit erhoben wurden.

Die Treibhausgasemissionen für Infrastruktur und Fahrzeuge, wie sie in der vorliegenden Studie ermittelt wurden, liegen im Vergleich zu den Ergebnissen von Chester [2008] für vergleichbare Zugarten durchweg niedriger. So kommt Chester [2008] für den Bau und Unterhalt der Infrastruktur für die Zugarten BART, Caltrain und CAHSR zu Werten in Höhe von 37, 22 bzw. 19 g CO₂-Äquivalente pro Pkm, obwohl Ingenieurbauten wie Brücken und Tunnels unberücksichtigt bleiben. Die vergleichbaren Werte in dieser Studie liegen bei 15 g/Pkm für den Personennahverkehr und 9 g/Pkm für den Personenfernverkehr.

Eine Detailanalyse zeigt, dass die Berücksichtigung des Baus von Parkplätzen mit je 5 g CO₂-Äquivalente pro Pkm bei den Zugarten BART und Caltrain nennenswert zu Buche schlägt (siehe Tabelle 75). Ohne Parkplätze, die in dieser Studie unberücksichtigt blieben, lägen die Werte von Chester [2008] für das BART-System bei 32 g CO₂-Äquivalente pro Pkm und beim Caltrain-System bei 17 g CO₂-Äquivalente pro Pkm. Die Werte der Zugart Caltrain liegen damit in der gleichen Größenordnung wie die eines Nahverkehrszuges in Deutschland. Die höheren Werte beim Zugsystem BART erklären sich insbesondere durch den aufwändigen Bau der Bahnhöfe an der Hochbahnstrecke. Der Bahnhofsbau trägt daher mit 13 g/Pkm wesentlich zu den CO₂-Äquivalent-Emissionen der Infrastruktur bei; ohne Bahnhöfe läge der Wert für den Bau und Unterhalt der Infrastruktur lediglich bei rund 19 g CO₂-Äquivalente pro Pkm. Unerklärlich hoch liegen dagegen die Werte für die geplante Hochgeschwindigkeitsstrecke CAHSR. Für diese Strecke wurden allein für die Herstellung der Gleise und der Energieversorgung CO₂-Äquivalent-Werte von 226 t pro Gleiskilometer unterstellt. Zum Vergleich: die HGS Hannover - Würzburg erreicht einen Wert von 75 t CO₂-Äquivalente pro Gleiskilometer unter Berücksichtigung aller Bauten (Tunnel, Brücken etc.). Trotz der auf der CAHSR-Strecke unterstellten höheren Verkehrsleistung pro Gleiskilometer (rund 12 Mill. Pkm/Gleis-km/Jahr; HGS Hannover - Würzburg: rund 5 Mill. Pkm/Gleis-km/Jahr), liegen damit die Treibhausgasemissionen mit insgesamt rund 19 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Bau und Unterhalt der Infrastruktur höher als zum Beispiel auf der HGS-Strecke Hannover-Würzburg (14 g/Pkm). Die für die Berechnungen unterstellten Lebensdauern der Schieneninfrastruktur entsprechen dabei mehr oder weniger denen, die in der vorliegenden Studie herangezogen wurden [Chester 2008].

Tabelle 75: Spezifische CO₂-Äquivalente-Emissionen für den Bau, Unterhalt und Betrieb von Schieneninfrastruktur, für den Bau und Unterhalt von Zügen sowie Versicherungen nach Chester [2008]

	BART	Caltrain	CAHSR
	gCO ₂ e/Pkm	gCO ₂ e/Pkm	gCO ₂ e/Pkm
Bau/Unterhalt Infrastruktur	36,9	22,0	19,2
Bau Bahnhöfe	13,0	1,7	0,1
Unterhalt Bahnhöfe	8,7	0,5	0,1
Herstellung Gleise/Energieversorgung	9,9	13,7	18,6
Unterhalt Gleise	0,2	1,3	0,2
Bau Parkplätze	5,0	4,8	0,2
Betrieb Infrastruktur	2,0	9,2	0,8
Beleuchtung Bahnhöfe	0,3	2,5	0,0
Fahrstühle	0,1	0,0	0,0
Zugsicherung	0,1	4,5	0,7
Beleuchtung Parkplätze	1,6	1,6	0,1
Reinigung Bahnhöfe	0,0		0,0
Sonstige Kleinverbraucher	0,0	0,6	0,0
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	2,7	9,9	0,2
Herstellung	1,4	6,0	0,1
Instandsetzung	1,2	3,9	0,1
Reinigung	0,0	0,0	0,0
Versicherungen	1,1	1,6	0,4

Quellen: [Chester 2008]; eigene Berechnungen

Die Emissionen für den Betrieb der Infrastruktur, die Chester [2008] ermittelt hat, sind nicht mit denen dieser Studie vergleichbar. Bis auf den Energieverbrauch für die Bahnhöfe und Zugsicherung werden von Chester Bereiche betrachtet, die in der vorliegenden Studie nicht untersucht werden (z. B. Beleuchtung Parkplätze, Energieverbrauch Fahrstühle). Chester [2008] hingegen hat die Energieverbräuche der Instandhaltungswerke, Verwaltungsgebäude sowie sonstige Verbraucher wie Zugvorheizungen bzw. Weichenheizungen nicht berücksichtigt. Nicht nachvollziehbar sind allerdings die hohen Emissionen für die Zugsicherung bei dem Zugsystem Caltrain; sie trägt mit 4,5 g CO₂-Äquivalente fast 50 % zu den Treibhausgasemissionen des Betriebs der Infrastruktur bei (siehe Tabelle 75).

Im Bereich Bau und Unterhalt der Fahrzeuge ist auffällig, dass die Werte beim Caltrain mit 6 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Fahrzeugherstellung und 3,7 g CO₂-Äquivalente

pro Pkm für die Wartung deutlich höher liegen als in der vorliegenden Studie (siehe Tabelle 75). Dies ist darauf zurückzuführen, dass Chester [2008] für die Herstellung des Zuges 1.800 t CO₂-Äquivalent-Emissionen unterstellt. Dieser Wert wurde aus der SigmaPro-Ökobilanzdatenbank für einen Fernverkehrszug entnommen. Da es sich bei dem Caltrain aber um eine Diesellok mit im Durchschnitt drei Waggons handelt, werden die Emissionen deutlich überschätzt. In dieser Studie werden für die Herstellung und Wartung eines Nahverkehrszugs mit 3 Waggons CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 550 t errechnet (bezogen auf eine Lebensdauer von 40 Jahren). Chester [2008] geht zudem von einer Lebensdauer der Caltrain-Züge von lediglich 30 Jahren aus.

Frischknecht/Stucki 2009

Frischknecht/Stucki [2009] berücksichtigen in ihrer Modellierung der Treibhausgasemissionen von Transportleistungen den Bau, den Unterhalt, den Betrieb und den Rückbau der Verkehrsinfrastruktur. Als Datengrundlage dient überwiegend die Ökobilanzdatenbank ecoinvent (Version 2.01) [ecoinvent 2009]. Da Frischknecht/Stucki die Werte in der Studie stets in kgCO₂e pro Pkm bzw. tkm angeben, werden in den nachfolgenden Tabellen zusätzlich die sich aus ecoinvent in gCO₂e ergebenden Daten aufgeführt, um bei niedrigen Werten einen besseren Vergleich zu ermöglichen.

Der Vergleich zeigt, dass Unterschiede bei den Abgrenzungen zwischen den Studien vorliegen. Beim Schienenverkehr werden bspw. weitere Bestandteile der Gleisinfrastruktur wie Signal- und Kommunikationsinfrastruktur sowie Gebäude (Bahnhöfe, Werkstätten) im Gegensatz zur vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Neben der Errichtung, Wartung und Entsorgung der Infrastruktur werden beim Schienenverkehr der Energieverbrauch des Betriebes der Trasse und der Tunnels sowie der Einsatz von Herbiziden und Schmierstoffen in die Analyse mit einbezogen. Der Betrieb der Infrastruktur wird allerdings nur gemeinsam mit Bau, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur ausgewiesen. Beim Betrieb der Straßeninfrastruktur wurden neben der Straßenbeleuchtung im Gegensatz zur vorliegenden Studie die Schneeräumung und das Salzen der Straßen, die Unkrautbekämpfung und die Linienmarkierung berücksichtigt. [Frischknecht/Stucki 2009].

Straßenverkehr

Tabelle 76 zeigt die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Personenverkehr, Tabelle 77 die für den Güterverkehr.

Für den Personenverkehr zeigt sich, dass Frischknecht/Stucki zu geringeren Emissionen durch Bau/Unterhalt der Infrastruktur und größeren Emissionen durch den Betrieb der Infrastruktur kommen. Für den Bau und Unterhalt kommt die vorliegende Studie zu rund doppelt so hohen spezifischen Emissionen, obwohl die Lebensdauern der Schichten in der vorliegenden Studie eher niedriger als in Spielmann et al [2007] angesetzt sind (ecoinvent: Deckschicht 30 Jahre, Baugrund 100 Jahre; Öko-Institut: Deckschicht Asphalt 20 Jahre, Beton 30 Jahre; Langlebige Bestandteile 60 Jahre). Grund dafür sind in der

vorliegenden Studie größere spezifische Materialmengen beim Straßenbau. Für den Güterverkehr zeigt sich ein anderes Bild, die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau/Unterhalt der Infrastruktur sind nahezu identisch.

Die spezifischen Emissionen aus dem Betrieb der Infrastruktur fallen sowohl beim Personen- als auch beim Güterverkehr in der vorliegenden Studie deutlich niedriger aus: Bei den Pkw weistecoinvent bspw. fünfmal so hohe, beim Güterverkehr rund achtmal so hohe Emissionen aus. Spielmann et al. [2007] gehen davon aus, dass 1 % des Stromverbrauches in der Schweiz auf die Straßenbeleuchtung zurückzuführen ist. Die vorliegende Studie hingegen geht für Deutschland von 0,7 % aus und allokiert diese zu lediglich 20 % dem Verkehr zu. Weiterhin beinhalten die Werte in Frischknecht/Stucki wie oben erwähnt die Fahrbahnmarkierungen, Schneeräumung, das Salzen der Straßen und die Unkrautbekämpfung, welche in der vorliegenden Studie unberücksichtigt bleiben.

Die in Frischknecht/Stucki [2009] enthaltenen, deutlich höheren Emissionen durch den Bau/Unterhalt der Pkw lässt sich teilweise dadurch erklären, dass deutlich niedrigere Fahrleistungen angenommen werden. Mit 150.000 km liegen diese rund ein Viertel unter den mittleren Gesamtfahrleistungen der Pkw in der vorliegenden Studie, wodurch sich die CO₂-Äquivalent-Emissionen auf eine geringere Fahrleistung beziehen. Bei den Linienbussen liegt diese hingegen in der vorliegenden Studie unter der von Frischknecht/Stucki (rund -30 %), Dafür wird jedoch eine geringere Auslastung der Busse angenommen (Öko-Institut: rund 27 Personen, Spielmann et al [2007]: 21 Personen). Für beide Bereiche gilt aber, dass sie im Gegensatz zum Luftverkehr bspw. durchaus eine Relevanz für das Gesamtergebnis besitzen. Der Fahrzeugbau führt beim Güterverkehr, hier am Beispiel eines Last-Sattelzuges dargestellt, in der vorliegenden Studie zu geringeren Emissionen. Mit 2,3 g/tkm betragen diese nur 20 % der Emissionen ausecoinvent 2.01. Dies dürfte zu einem großen Anteil auf die höhere Transportleistung zurückzuführen sein, von welcher die vorliegende Studie ausgeht. Während Spielmann et al [2007] von 540.000 vkm ausgehen, werden in der vorliegenden Studie rund 930.000 veranschlagt. Des Weiteren wird in der vorliegenden Studie lediglich die Herstellung der verbauten Materialmengen bilanziert. Spielmann et al. hingegen berücksichtigen auch deren Energieverbräuche.

Tabelle 76: Vergleich der spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Pkw und die Linienbusse mit Frischknecht/Stucki [2009] und ecoinvent 2.01

	Pkw			Reisebus		
	Frischknecht / Stucki	ecoinvent	Öko-Institut	Frischknecht / Stucki	ecoinvent	Öko-Institut
	kg CO ₂ e / Pkm	g CO ₂ e / Pkm	g CO ₂ e / Pkm	kg CO ₂ e / Pkm	g CO ₂ e / Pkm	g CO ₂ e / Pkm
Fahrbetrieb	0,16	165,0	146,6	0,046	45,6	31,1
Bau/Unterhalt Infrastruktur	0,01	4,1	8,1	0,004	3,2	5,0
Betrieb Infrastruktur		4,7	0,8		0,4	0,0
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,02	22,6	10,4	0,003	2,7	1,9

Quelle: [Frischknecht/Stucki 2009; ecoinvent v2.01, Spielmann 2007 eigene Berechnungen]

Tabelle 77: Vergleich der spezifischen Emissionen für den Bereich Straße im Güterverkehr der Studie mit Frischknecht/Stucki [2009]

	AT/TT > 28 t		AT/TT 34-40t
	Frischknecht / Stucki	ecoinvent	Öko-Institut
	kg CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm
Fahrbetrieb	0,108	108,6	78,6
Bau/Unterhalt Infrastruktur	0,016	15,7	14,9
Betrieb Infrastruktur		0,8	0,1
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,011	11,4	2,3

Quelle: [Frischknecht/Stucki 2009; ecoinvent v2.01, Spielmann 2007 eigene Berechnungen]

Luftverkehr

Tabelle 78 und Tabelle 79 zeigen die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Luftverkehr im Vergleich mit den Ergebnissen von Frischknecht/Stucki und ecoinvent 2.01 [Spielmann et al 2007].

Für den Bau und Unterhalt der Infrastruktur ergeben sich in der vorliegenden Studie doppelt zu hohe Emissionen (innerdeutsche Flüge) bzw. fünfmal so hohe spezifische Emissionen (Öko-Institut: grenzüberschreitende Flüge). Diese großen Unterschiede lassen sich einerseits dadurch erklären, dass in der vorliegenden Studie nicht ein Beispielflughafen ausgewählt wurde, sondern alle relevanten Flughäfen in Deutschland in

die Bilanzierung eingeflossen sind. Dabei sind Teile der versiegelten Flächen asphaltiert, was zu höheren Emissionen durch den Bau führen kann. Die Start- und Landebahnen aus Asphalt führen bspw. zu rund 60 % höheren Emissionen als die aus Beton. ecoinvent hingegen bilanziert allein den Züricher Flughafen [Spielmann et al. 2007]. Dabei wird für die unbebaute versiegelte Fläche angenommen, dass sie aus einer 22 cm starken Betonschicht und einer 40 cm starken Kiesschicht besteht. In der vorliegenden Studie werden für die Flächen mit Verkehrslasten durch Luftfahrzeuge oder Flugzeugschlepper deutlich größere Betonmengen veranschlagt (Start- und Landebahn 65 cm, sonstige Flächen 56 cm). Andererseits berücksichtigt die vorliegende Studie auch die sehr geringen Materialmengen an den Schulterflächen - diese Differenzierung findet in ecoinvent nicht statt.

Der Betrieb der Infrastruktur hat bei beiden Studien eine erstaunlich hohe Relevanz für die Kurz-/Mitteldistanzflüge von 16 % bei Frischknecht/Stucki [2009] bzw. 9 % in dieser Studie. Spielmann [2007] zu Folge fließen in die ecoinvent-Datensätze zusätzlich zu den in der vorliegenden Studie berücksichtigten Bereichen (z. B. Diesel, Erdgas und Stromverbrauch) auch die Enteisung der Flugzeuge, der Wasserverbrauch und die Wasseraufbereitung mit ein. Insgesamt führen die Studien aber zu vergleichbaren Werten (siehe Tabelle 78).

Der Bau und Unterhalt der Flugzeuge ist in beiden Studien bezogen auf den Flugbetrieb vernachlässigbar. Für die Luftfracht ergibt sich ein vergleichbares Bild (Tabelle 79).

Tabelle 78: Vergleich der spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Personenluftverkehr mit Frischknecht/ Stucki [2009] und ecoinvent 2.01

	Passagierflug Europa/national			Passagierflug interkontinental		
	Frischknecht / Stucki	ecoinvent	Öko-Institut	Frischknecht / Stucki	ecoinvent	Öko-Institut
	kg CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm	kg CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm
Flugbetrieb	0,166	166,2	233,7	0,106	105,6	121,1
Bau/Unterhalt Infrastruktur	0,028	2,9	6,9	0,002	0,2	1,0
Betrieb Infrastruktur		27,0	19,9		2,3	2,8
Bau/Unterhalt Flugzeuge	0,001	0,6	0,0	0,000	0,3	0,0

Quelle: [Frischknecht/Stucki 2009; ecoinvent v2.01, Spielmann et al. 2007 eigene Berechnungen]

Tabelle 79: Vergleich der spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro tkm für die Luftfracht mit Frischknecht/ Stucki [2009] und ecoinvent 2.01

	Frachtflug Europa			Frachtflug interkontinental		
	Frischknecht / Stucki	ecoinvent	Öko-Institut	Frischknecht / Stucki	ecoinvent	Öko-Institut
	kg CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm	kg CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm	g CO ₂ e / tkm
Flugbetrieb	1,660	1.661,5	2.128,8	1,055	1.056,3	907,2
Bau/Unterhalt Infrastruktur	0,283	28,9	68,9	0,024	2,4	9,8
Betrieb Infrastruktur		269,9	199,5		22,5	28,3
Bau/Unterhalt Flugzeuge	0,002	2,4	0,2	0,001	1,1	0,2

Quelle: [Frischknecht/Stucki 2009; ecoinvent v2.01, Spielmann et al. 2007 eigene Berechnungen]

Schieneverkehr

Vergleicht man die Ergebnisse der Vorgängerstudie [Schmied/Mottschall 2013] mit denen von Frischknecht/Stucki [2009], so liegen diese für den Personenverkehr durchweg höher. Die Gesamtemissionen des Nahverkehrs nach Frischknecht/Stucki [2008] liegen mit 11 g CO₂-Äquivalente pro Pkm um über 60 % unter denen des Personennahverkehrs dieser Studie (29 g/Pkm). Im Personenfernverkehr liegen die Werte mit rund 7 g/Pkm für den ICE und 6 g/Pkm für den Fernverkehrszug um bis zu 70 % niedriger als die Werte in dieser Studie (20 g/Pkm). Eine detailliertere Betrachtung zeigt, dass Frischknecht/Stucki [2009] für den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur mit rund 23 t CO₂ Äquivalente pro Gleis-km vergleichbare Werte wie in dieser Studie verwenden (im Durchschnitt 25 t CO₂-Äquivalente pro Gleis-km einschließlich Unterhalt der Strecke). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass allerdings beispielsweise der Bau von Bahnhöfen, Signal und Kommunikationstechnik, Überholgleisen und Anlagen zur Zugbildung nicht berücksichtigt werden und grundsätzlich mit einer Lebensdauer von 100 Jahren bei langlebigen Infrastrukturen gerechnet wurden (statt mit 60 Jahren wie in dieser Studie) [Spielmann et al. 2007].

Wesentlichere Unterschiede ergeben sich aber in zwei anderen Punkten: Zum einen werden für die Umrechnung der streckenbezogenen Umweltauswirkungen auf die Verkehrsleistung von Frischknecht/Stucki [2009] deutlich höhere Werte zugrunde gelegt als in dieser Studie. Für den Personennahverkehr gehen Frischknecht/Stucki [2009] von Verkehrsleistungen in Höhe von 3 Mill. Pkm pro Gleis-km und Jahr, für den ICE-Verkehr von rund 4 Mill. Pkm pro Gleis-km und Jahr aus. Für diese Studie können entsprechende Werte nur bedingt berechnet werden, da Gleise in der Regel nicht exklusiv von einer Verkehrsart genutzt werden. Grob kann aber gesagt werden, dass im Personenfernverkehr auf Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecken die

Verkehrsleistungen zwischen 1 und 3 Mill. Pkm pro Gleis-km und Jahr liegen und damit unter den Werten von Frischknecht/Stucki [2009]. Im Nahverkehr liegen die Werte sogar lediglich bei rund 0,5 Mill. Pkm pro Gleis-km und Jahr und damit deutlich niedriger als die Angaben von Frischknecht/Stucki [2009].

Der zweite wesentliche Unterschied ist, dass der Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur mit 0,7 g CO₂-Äquivalente pro Pkm beim Fernverkehr und mit 2,3 g CO₂-Äquivalente pro Pkm beim Nahverkehr deutlich geringere Emissionen verursacht als die in dieser Studie allein für den Betrieb der Infrastruktur ermittelten Emissionen (11 bzw. 12 g/Pkm). Ein Grund hierfür ist, dass in dieser Studie die Energieverbräuche der Bürogebäude und der Bahnhöfe vollständig dem Schienenverkehr zugerechnet wurden; auf beide Bereiche entfallen rund 70 % der Treibhausgasemissionen des Betriebs. Blieben beide Bereiche wie bei Frischknecht/Stucki [2009] unberücksichtigt, würden die Werte sich auf rund 3,5 g CO₂- Äquivalente pro Pkm reduzieren.

Die bei Frischknecht/Stucki [2009] unterstellte höhere Verkehrsleistung auf den Eisenbahnstrecken sowie die Nichtberücksichtigung der Emissionen durch den Energieverbrauch der Bahnhöfe und Verwaltungen erklären damit nachvollziehbar, warum die Treibhausgasemissionen pro Pkm für den Bereich Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur in der vorliegenden Studie höher ausfallen. Analog gilt dies auch für den Güterverkehr.

Die Treibhausgasemissionen für den Bau und die Herstellung der Schienenfahrzeuge unterscheiden sich in dieser Studie im Vergleich zu Frischknecht/Stucki [2009] lediglich beim Güterverkehr. Mit rund 5 g CO₂-Äquivalente pro tkm liegen die Werte mehr als zweieinhalb Mal so hoch wie in dieser Studie (1,9 g/tkm). Ein Grund hierfür ist die in dieser Studie unterstellte höhere Jahresfahrleistung von Waggons (26.000km/a; [Frischknecht/Stucki 2009 bzw. Spielmann et al. 2007]: 21.100 km/a). Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist die Anzahl der Waggons pro Güterzug. In dieser Studie wird von durchschnittlich rund 20 Waggons ausgegangen. Bei Frischknecht/Stucki [2009] werden nicht nur die am Zug angehängten Waggons, sondern die gesamte Anzahl aller Waggons in der Schweiz berücksichtigt. Im Schnitt kommen damit auf eine Lok rund 64 Waggons, die in die Bilanz mit einfließen [Spielmann et al. 2007]. Dies erklärt die im Vergleich zu dieser Studie deutlich höheren Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Wartung von Güterzügen. Grundsätzlich ist diese Vorgehensweise denkbar, sollte dann aber auch beim Personennah- und -Fernverkehr zum Einsatz kommen (was bei Frischknecht/Stucki [2009] bzw. Spielmann et al. [2007] nicht der Fall ist). In dieser Studie wurde allerdings grundsätzlich auf den Einbezug der „nicht-fahrenden“ Waggons verzichtet. Allerdings sollte streng genommen die Jahresfahrleistung so ermittelt werden, dass auch Standzeiten der Waggons mit abgedeckt sind.

Binnenschiff

Der Vergleich der spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Tonnenkilometer bei der Binnenschiffahrt zeigt ähnliche Ergebnisse: Die durch Bau/Unterhalt der Wasserstraßen

verursachten Emissionen liegen in dieser Studie mit rund 8 g/tkm etwa 1 g/tkm über den Zahlen aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent.

Auch die Ergebnisse für den Bau/Unterhalt der Fahrzeuge ähneln sich, wobei die der vorliegenden Studie rund 40 % unter denen von Frischknecht/Stucki liegen. Tatsächlich sind die in der vorliegenden Studie verwendeten Materialdaten aus Knörr/Kutzner [2009] aus den ecoinvent-Werten abgeleitet, weshalb die ähnlichen Ergebnisse nicht verwundern. Die Unterschiede der spezifischen Emissionen durch die Fahrzeugherstellung finden sich auch bei den Ergebnissen pro Binnenschiff wieder, bei denen die vorliegende Studie mit rund 557 Tonnen auf rund ein Drittel niedrigere CO₂-Äquivalent-Emissionen kommt (ecoinvent 832 Tonnen). Dies liegt neben der vereinfachten Herangehensweise in der vorliegenden Studie an der in Frischknecht/Stucki [2009] berücksichtigten Wartung (10-maliger Neuanstrich) der Binnenschiffe.

Deutliche Unterschiede zwischen den Studien bestehen bei den spezifischen Emissionen aus dem Betrieb der Infrastruktur, welche Spielmann [2007] zu Folge zu über 3 g CO₂-Äquivalenten pro tkm führt und damit etwa das 16-Fache der vorliegenden Studie erreicht. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die vorliegende Studie den Hafenbetrieb aufgrund der ungünstigen Datenlage nicht berücksichtigt. Dieser Bereich dürften demnach in der vorliegenden Studie unterschätzt werden.

Tabelle 80: Vergleich der spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro tkm für die Binnenschifffahrt mit Frischknecht/ Stucki [2009] und ecoinvent 2.01

	Frischknecht / Stucki 2009	ecoinvent	Öko-Institut
	kg CO ₂ e/tkm	g CO ₂ e/tkm	g CO ₂ e/tkm
Fahrbetrieb	0,035	35,4	29,8
Bau/Unterhalt Infrastruktur	0,010	6,7	7,7
Betrieb Infrastruktur		3,3	0,2
Bau/Unterhalt Fahrzeuge	0,001	1,0	0,6

Quelle: [Frischknecht/Stucki 2009; ecoinvent v2.01, Spielmann 2007 et al., eigene Berechnungen]

GHG 2050 Task 2

Die Studie „The role of GHG emissions from infrastructure construction, vehicle manufacturing, and ELVs in overall transport sector emissions“ aus dem Jahr 2012 [Hill et al. 2012] des Projektes „EU Transport GHG: Routes to 2050 II“ hatte zum Ziel, die Treibhausgasemissionen von Bau und Unterhalt der Transportinfrastruktur, Fahrzeugbau und -entsorgung besser zu verstehen und deren Einfluss auf den auf den Pfad der Treibhausgasemissionen bis 2050 im Verkehrssektor bewerten zu können. Dafür wurde ein Literaturreview durchgeführt und die Ergebnisse verschiedener Studien zusammengefasst. Eine genaue Auswertung ist deshalb nur bedingt möglich, der

Vergleich mit den in dieser Studie enthaltenen Werten kann daher nur einer groben Einordnung der eigenen Ergebnisse dienen. Für den Bereich der Binnenschifffahrt ist ein Vergleich nicht möglich, da in Hill et al. [2012] lediglich der internationale Schiffsverkehr betrachtet wird.

Straßenverkehr

Hill et al. [2012] haben für die Straßeninfrastruktur acht Studien ausgewertet. Tabelle 81 zeigt die mittleren Ergebnisse im Vergleich mit den Werten der vorliegenden Studie in kg CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Meter und Jahr. Die Ergebnisse werden nicht auf die Verkehrsleistung bezogen. Für den Bau und Unterhalt der Straßen sind die mittleren Werte in Hill et al. mit 18 kg/CO₂-Äquivalenten nahezu identisch mit den mittleren Werten der vorliegenden Studie (19 kgCO₂e/km). Dabei bleibt bei Hill et al. [2012] jedoch unklar, um welchen Straßentyp es sich handelt und welche Lebensdauer in die Berechnung eingeflossen ist. Für den Unterhalt geben Hill et al. jedoch einen jährlichen Aufwand von 20 % der Emissionen der erstmaligen Errichtung an. Diese Werte liegen deutlich über den in der vorliegenden Studie angenommenen Materialmengen und Treibhausgas-Emissionen.

Auch die Emissionen aus dem Betrieb unterscheiden sich deutlich, wobei diese Hill et al. [2012] zu Folge zu rund 95 % aus der Straßenbeleuchtung bestehen. Dies bedeutet einerseits, dass bei einem Vergleich die jeweilig herangezogenen Emissionsfaktoren mit einbezogen werden müssten. Zum andern berücksichtigt die vorliegende Studie durch den Top Down Ansatz im Gegensatz zu Hill et al. auch unbeleuchtete Straßen. Zudem werden die Emissionen durch die Beleuchtung in der vorliegenden Studie mit 20 % konservativ auf dem Straßenverkehr allokiert. Unter Berücksichtigung dieser methodischen Unterschiede wird deutlich, dass die in der vorliegenden Studie ermittelten CO₂-Äquivalent-Emissionen pro km Straße im Rahmen der von Hill et al. betrachteten Studien liegt. Allerdings weichen die einzelnen in Hill et al. zusammengetragenen Studien teilweise deutlich voneinander ab (Unterhalt bspw. von 0,8 bis 8 kgCO₂e/km).

Tabelle 81: Vergleich der Verkehrsweg bezogenen Emissionen für den Bereich Straße der Studie mit Hill et al. [2012]

	Hill et al. [2012]	Öko-Institut
	kg CO ₂ e / (m*a)	kg CO ₂ e / (m*a)
Bau	14,7	19
Unterhalt	3,3	
Betrieb	12,4	1,24
Insgesamt	30	21

Quelle: [Hill et al. 2012], eigene Berechnungen

Luftverkehr

Hill et al. [2012] geben typische Emissionsfaktoren für verschiedene Flugzeugtypen und Streckenlängen an, welche größtenteils von Chester [2008] abgeleitet sind. Dabei werden neben den Well-to-Wheel und Well-to-Tank-Emissionen auch die durch die Flugzeugherstellung und der Infrastruktur angegeben. Beim Vergleich der Ergebnisse (Tabelle 82) zeigt sich, dass die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm des Flugbetriebs relativ ähnlich sind. Die Unterschiede lassen sich über die verschiedenen Entfernungskategorien plausibel erklären.

Tabelle 82: Vergleich der spezifischen Emissionen für den Personenverkehr im Bereich Luft der Studie mit Hill et al. [2012]

	Hill et al. [2012]	Öko-Institut	Hill et al. [2012]	Öko-Institut
	400 km	innerdeutsch	950 km	grenzüberschreitend 500-1000km
	kg CO ₂ e / Pkm	kg CO ₂ e / Pkm	kg CO ₂ e / Pkm	kg CO ₂ e / Pkm
Flugbetrieb	221,7	233,7	183,5	208,1
Infrastruktur	3,1	26,8	3,1	15,2
Flugzeugbau	5,9	0,0	5,9	0,0
Summe	230,7	260,5	192,5	223,3

Quelle: [Hill et al. 2012], eigene Berechnungen

Deutlich unterscheiden sich dagegen die Emissionen durch Herstellung und Unterhalt der Infrastruktur. Die ermittelten Emissionen durch den Bau der Infrastruktur liegen in dieser Studie wesentlich höher sind als die von Hill et al. [2012] angegebenen Werten. In der Tabelle 82 werden beispielhaft einige Werte mit ähnlichen Distanzen verglichen. Die in der vorliegenden Studie ermittelten spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm durch den Bau der Infrastruktur liegen fünf bis achtmal so hoch. Einerseits liegt dies in den grundsätzlich höher liegenden Emissionen pro Baufläche. So liegen die Emissionen in der vorliegenden Studie um rund das Zwei- bis Dreifache über denen in Hill et al. (Tabelle 83).

Tabelle 83: Vergleich der Emissionen pro Baufläche der Luftverkehrsinfrastruktur der Studie mit Hill et al. [2012]

	Hill et al. [2012]	Öko-Institut
	kg CO ₂ e / m ²	kg CO ₂ e / m ²
Construction Airports	463	842
Runway	108	351
Taxiway/Tarmac	73	195

Quelle: [Hill et al. 2012], eigene Berechnungen

Andererseits ist auch ersichtlich, dass unterschiedliche Allokationsmethoden angewendet wurden. Bei Hill et al. [2012] bleiben die spezifischen Emissionen für den Teil Bau und Unterhalt der Infrastruktur mit zunehmender Distanz gleich. Die vorliegende Studie allokiert die Infrastruktur, aber nicht nach Verkehrsleistung, sondern nach getätigten Starts und Landungen, womit die zugeteilten, spezifischen Emissionen bei kürzeren Strecken höher und bei längeren Strecken geringer ausfallen.

Tabelle 81 zeigt auch, dass die Emissionen durch die Herstellung der Flugzeuge deutlich voneinander abweichen. Während die vorliegende Studie zu dem Ergebnis kommt, dass dieser Bereich aufgrund der hohen Verkehrsleistung vernachlässigbar ist, geben Hill et al. Werte von rund 5,9 g CO₂e/Pkm an. Auch diese Werte sind anhand der Ergebnisse von Chester [2008] abgeleitet. Wie oben erwähnt resultieren die Unterschiede einerseits durch die verschiedenen methodischen Ansätze (Stoffstromanalyse gegenüber Economic input-output LCA). Daneben ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der durch die Flugzeuge geflogenen Strecke (s. o.), diese allein erklärt die Unterschiede von einem Faktor 50 – 100 jedoch nicht. Eine kritische Überprüfung dieses Bereiches sollte deshalb angestrebt werden.

Schieneverkehr

Hill et al. [2012] geben für die einzelnen Komponenten der Schieneninfrastruktur die durch die Errichtung entstehenden CO₂-Emissionen in kg CO₂/ Strecken-km an. Eine Auswahl zeigt Tabelle 84. Verglichen mit den Werten der vorliegenden Studie zeigen sich teilweise deutliche Unterschiede. Die Emissionen durch die Gleise liegen Hill et al. [2012] zu Folge z. B. rund doppelt so hoch wie die der vorliegenden Studie. Für Schienen des Typen UIC 60 liegen die eigenen Ergebnisse bspw. bei rund 500 kg/CO₂ pro Streckenkilometer bei einer zweigleisigen Strecke. Bei der festen Fahrbahn, die allerdings im deutschen Schienennetz wenig verbreitet ist, weisen beide Studien hingegen vergleichbare Werte aus (Schmied/Mottschall 2013: rund 1,1 Mio. t CO₂/Strecken-km. Bei den Brücken und Tunneln wird aus den Werten nicht klar, auf welches Streckennetz und damit welchen Anteil an Tunneln und Brücken sich die Werte beziehen. Die Werte allein für die Brücken und Tunnel liegen in der vorliegenden Studie um das 12 bzw. 39-Fache über den in Hill et al. aufgeführten CO₂-Emissionen.

Tabelle 84: Emissionen der Schieneninfrastruktur pro Streckenkilometer nach Hill et al. [2012]

	Hill et al. [2012]
	kg CO ₂ / Strecken km
Rail	874.200
Ballast	237.840
Feste Fahrbahn	1.201.200
Tunnel	1.533.400
Brücken	308.540

Quelle: [Hill et al. 2012; Schmied/Mottschall 2013]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass grundsätzlich die Ergebnisse der vorliegenden Studie den Ergebnissen früherer Studien entspricht. Es besteht jedoch auch eine Großzahl von Unterschieden, welche sich hauptsächlich durch unterschiedliche methodische Herangehensweisen erklären lassen. Für einzelne Bereiche wie die Herstellung der Flugzeuge kann dies zu deutlichen Abweichungen mit Vergleichsstudien führen, wie bspw. Chester [2008], der bis zu 100-mal höhere Emissionen ermittelt. Andererseits beruhen viele Abweichungen auf unterschiedlichen Abgrenzungen. Insbesondere der Einbezug der Treibhausgasemissionen von Energieverbräuchen und Transporten bei der Fahrzeugherstellung kann zu höheren Emissionen führen. Zum anderen ergeben sich insbesondere Unterschiede durch die Verwendung unterschiedlicher Verkehrsleistungsdaten. Dies führt zwangsläufig zu anderen spezifischen Treibhausgasemissionen pro Pkm oder tkm. Da es sich aber um konkrete Verkehrsleistungsdaten des Jahres 2008 handelt, bilden die Ergebnisse dieser Studie stärker als bisher die reale Situation des deutschen Verkehrs ab. Zudem ergibt sich auch innerhalb der betrachteten Vergleichsstudien kein einheitliches Bild.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

Ziel der Studie

Umweltvergleiche von Verkehrsmitteln beziehen i. d. R. die direkten Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen durch die Verbrennung des Kraftstoffs in den Fahrzeugen (z. B. Benzin, Diesel, Kerosin) sowie die indirekten energiebedingten Emissionen durch die Gewinnung, Umwandlung, Verteilung und Bereitstellung der Energieträger ein. Unberücksichtigt bleiben hingegen die Emissionen für den Bau, die Instandhaltung und den Betrieb der Verkehrsinfrastrukturen sowie die Herstellung und die Instandhaltung der Fahrzeuge. Das Umweltbundesamt hat daher das Öko-Institut damit beauftragt, den Beitrag der Verkehrsinfrastruktur sowie der Fahrzeuge zur Treibhausgasbilanz des Personen- und Güterverkehrs zu ermitteln. Bezugsjahr der Studie sollte das Jahr 2008 sein.

Methodisches Vorgehen

Ausgehend von den Materialmengen, die für den Bau- und die Instandhaltung der Verkehrswege benötigt werden, wurden die bei der Herstellung der Materialien entstehenden CO₂-Emissionen sowie Treibhausgasemissionen (gemessen als CO₂-Äquivalente) ermittelt. Dabei wurden für den Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur folgende Bereiche berücksichtigt:

Straßenverkehr

- Unterbau und Oberbau der Straßen (z. B. Deckschicht, Tragschicht, Frostschuttschicht),
- Kunstbauten (Tunnel, Brücken),
- Straßenausstattung und -beleuchtung (Schilder, Leitplanken, Lichtzeitanlagen)
- Gebäude (z. B. Tankstellen, Rast- und Autohöfe).

Luftverkehr

- Unterbau und Oberbau der asphaltierten und betonierten Flächen (z. B. Start- und Landebahnen, Flugbetriebsflächen),
- Gebäude (Terminals, sonstige Gebäude).

Binnenschifffahrt

- Wasserstraßen (z. B. Uferbefestigung, Kanäle)
- Bauwerke (Schleusen, Kanalbrücken, Binnenhäfen).

Schieneverkehr

- Unterbau für das Gleisbett,
- Oberbau (z. B. Schotter, Schwellen, Schienen),
- Kunstbauten (Tunnel, Brücken),
- Energieversorgung ab öffentlichem Netz (Oberleitungen, Unterwerke etc.),

- Signal- und Kommunikationstechnik (Kabel, Signale etc.),
- Gebäude (z. B. Personen- und Güterbahnhöfe, Instandhaltungswerke).

Zusätzlich wurden die Emissionen durch die Transporte der Materialien von den Produktionsstätten zu den Baustellen sowie die Emissionen durch den Energieverbrauch der Baustellen (z. B. für Tunnelbohrungen) berücksichtigt.

Die Treibhausgasemissionen, die mit der Herstellung und dem Unterhalt der Fahrzeuge verbunden sind, wurden analog zur Infrastruktur ermittelt. Es wurden ebenfalls die benötigten Materialmengen und daraus die mit deren Herstellung verbundenen Emissionen ermittelt. Die Energieverbräuche der zur Herstellung der Fahrzeuge sowie Transporte der Baumaterialien für die Fahrzeugherstellung wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Für den Bereich Betrieb der Infrastruktur wurden folgende Bereiche einbezogen:

Straßenverkehr

- Straßenbeleuchtung,
- Tunnelbetrieb,
- Lichtzeichenanlagen

Luftverkehr

- Energieverbrauch der Flughäfen (z. B. Strom, Diesel, Fernwärme)

Binnenschifffahrt

- Nassbaggerei,
- Kanalbetrieb

Schienenverkehr

- Energieverbrauch (z. B. Bürogebäude, Personenbahnhöfe, Weichenheizung).

Während die Energieverbrauchswerte für den Betrieb der Infrastruktur i. d. R. pro Jahr vorlagen, mussten die ermittelten Treibhausgasemissionen für den Bau der Infrastruktur und Fahrzeuge mit Hilfe der Lebensdauer auf jährliche Werte umgerechnet werden. Bei langlebigen Bauwerken der Infrastruktur (z. B. Tunnel, Brücken, Gebäude) wurde in dieser Studie eine Lebensdauer von 60 Jahren angenommen. Für kurzlebigere Güter wurden die für diese Bauteile relevanten Lebensdauern verwendet.

Dies entspricht – wie auch die generelle methodische Vorgehensweise in dieser Studie – den Vorgaben der Product Category Rules for Interurban Railway Transport Services of Passengers, Railway Transport Services of Freight and Railways [PCR 2009]. Zusätzlich wurde in einer Sensitivitätsberechnung analysiert, wie sich eine Lebensdauer von 100 Jahren bei langlebigen Bauwerken auf das Gesamtergebnis auswirkt.

In einem letzten Schritt wurden die Emissionen dann i. d. R. anhand der Brutto-Tonnen-Kilometer auf die Fahrzeugkategorien allokiert und auf die erbrachte Verkehrsleistung in

Personenkilometer (Pkm) und Tonnenkilometer (tkm) bezogen. Beim Luftverkehr wurde davon abgewichen und auf Basis der Verkehrseinheiten allokiert (1 Passagier oder 100 kg Fracht entsprechen 1 Verkehrseinheit).

Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur

Die in dieser Studie verwendeten Materialmengen für den Bau und die Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur wurden einerseits selbst recherchiert, andererseits aus der Literatur entnommen bzw. basierend auf Angaben in der Literatur abgeleitet. Hierbei konnte z. B. auf verschiedene Grundlagenstudien zur ecoinvent-Ökobilanzdatenbank [Spielmann et al. 2007; Frischknecht/Stucki 2009], die Studie „Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen“ [Steger et al. 2012] und speziell für den Schieneninfrastruktur auf die Studie „High Speed Railway contribution to sustainable mobility“ des Internationalen Eisenbahnverbandes UIC [UIC 2010], die Studie „Ökobilanzierung von Schienen-Verkehrssystemen am Beispiel des ICE-Verkehrs“ im Auftrag der Deutschen Bahn AG [Köser et al. 2002] zurückgegriffen werden.

Neben den Materialmengen wurden Informationen zum Bestand der Infrastruktur benötigt. Dabei wurde auf zahlreiche Quellen wie bspw. aus offiziellen statistischen Erhebungen zurückgegriffen [z. B. VIZ 2011; Kaschner 2011]. Für die Schieneninfrastruktur lag davon abweichend ein detaillierter Datensatz der DB AG vor, aus dem Streckenabschnittsscharf Informationen hervorgehen wie bspw. zur Elektrifizierung, Materialien der Schwellen oder Gleise.

Nach der oben beschriebenen Methodik ergaben sich in Deutschland im Jahr 2008 folgende CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur:

Personenverkehr

- 8 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Pkw
- 7 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Linienbus
- 5 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Reisebus

- 7 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für innerdeutsche Flüge
- 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für grenzüberschreitende Flüge

- 15 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für Personennahverkehr (Bahn)
- 9 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für Personenfernverkehr (Bahn)

Güterverkehr

- 15 g CO₂-Äquivalente pro tkm für Last- und Sattelzüge bis 40t

- 10 g CO₂-Äquivalente pro tkm für grenzüberschreitende Flüge

- 8 g CO₂-Äquivalente pro tkm für die Binnenschiffe

- 6 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Schienengüterverkehr

Betrieb der Verkehrsinfrastruktur

Neben dem Bau und der Instandhaltung wurden auch die Treibhausgasemissionen durch den Betrieb der Infrastruktur ermittelt. Die Energieverbrauchszahlen zum Betrieb der Infrastruktur wurden in eigenen Recherchen ermittelt und stammen z. B. aus den Umwelt- oder Nachhaltigkeitsberichten einiger Flughäfen, Fachliteratur wie Ökoinventar Transporte [Maibach et al. 1995] und Fachliteratur zur Straßenbeleuchtung [VWEW 2009]. Verknüpft mit den Emissionsfaktoren (vgl. Kapitel 2.3) und auf die Verkehrsleistung bezogen ergeben sich folgende CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Infrastruktur:

Personenverkehr

- < 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Pkw
- << 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Linienbus
- << 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Reisebus

- 20 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für innerdeutsche Flüge
- 3 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für grenzüberschreitende Flüge

- 12 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für Personennahverkehr (Bahn)
- 11 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für Personenfernverkehr (Bahn)

Güterverkehr

- < 1 g CO₂-Äquivalente pro tkm für Last- und Sattelzüge bis 40t

- 10 g CO₂-Äquivalente pro tkm für grenzüberschreitende Flüge

- < 1 g CO₂-Äquivalente pro tkm für die Binnenschiffe

- 2 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Schienengüterverkehr

Herstellung und Wartung von Fahrzeugen

Für die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge und Waggonen wurden die Materialmengen für den Bau und die Instandhaltung ermittelt, wobei letztgenanntes lediglich bei den Schienenfahrzeugen berücksichtigt wurde.

Wesentliche Quelle für die Daten waren neben der im Auftrag der DB AG durchgeführten ICE-Studie [Köser et al. 2002] eine aktuelle Studie des IFEU-Institutes, die im Rahmen des BMU-Projektes RENEWBILITY im Auftrag des Öko-Instituts erstellt wurde [Knörr/Kutzner 2009]. Als eine weitere Quelle wurde die Ökobilanz eines A330-200 herangezogen [Lopes 2010].

Die in dieser Studie zugrunde gelegten CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge und Waggonen belaufen sich auf folgende Werte:

Personenverkehr

- 10 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Pkw
- 5 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Linienbus
- 2 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für die Reisebus

- << 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für innerdeutsche Flüge
- << 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für grenzüberschreitende Flüge

- 2 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für Personennahverkehr (Bahn)
- < 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für Personenfernverkehr (Bahn)

Güterverkehr

- 2 g CO₂-Äquivalente pro tkm für Last- und Sattelzüge bis 40t
- < 1 g CO₂-Äquivalente pro tkm für grenzüberschreitende Flüge
- 1 g CO₂-Äquivalente pro tkm für die Binnenschiffe
- 2 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Schienengüterverkehr

Gesamtergebnisse

Bild 39 und Bild 40 fassen die Ergebnisse dieser Studie nochmals zusammen. Die bisher bei Umweltvergleichen nicht berücksichtigten Treibhausgasemissionen durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Verkehrsinfrastruktur sowie durch den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge führen beim Personennahverkehr zu zusätzlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen von 19 g/Pkm (Pkw), 29 g/Pkm (Bahn PNV) bzw. 12 g/Pkm (Linienbus). Bezogen auf die bisher bei Umweltvergleichen berücksichtigten Emissionen des Fahrbetriebs (einschließlich Emissionen zur Bereitstellung der Energieträger) führt dies beim Personennahverkehr zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen in Höhe von 13 % (Pkw), 35 % (Bahn PNV) und 16 % (Linienbus).

Beim Personenfernverkehr verursachen diese Bereiche zusätzliche CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 27 g/Pkm (Flugverkehr national), 19 g/Pkm (Pkw), 21 g/Pkm (Bahn PFV) bzw. 7 g/Pkm (Reisebus), was bezogen auf die Emissionen des Fahrbetriebes einer Steigerung von 11 % (Luftverkehr national), 13 % (Pkw), 41 % (Bahn PFV) bzw. 22 % (Reisebus) entspricht.

Beim Güterverkehr betragen die bislang nicht in Umweltvergleichen berücksichtigten Treibhausgasemissionen zusätzliche CO₂-Äquivalent-Emissionen 38 g/Pkm (Luftfracht international), 17 g/Pkm (Straßengüterverkehr), 9 g/Pkm (Binnenschiffahrt) bzw. 11 g/Pkm (Schienengüterverkehr). Dies entspricht bezogen auf die Emissionen des Fahrbetriebes einschließlich Emissionen zur Bereitstellung der Energieträger einer

Steigerung von 4 % (Luftfracht international), 22 % (Straßengüterverkehr), 29 % (Binnenschifffahrt) bzw. 42 % (Schienengüterverkehr).

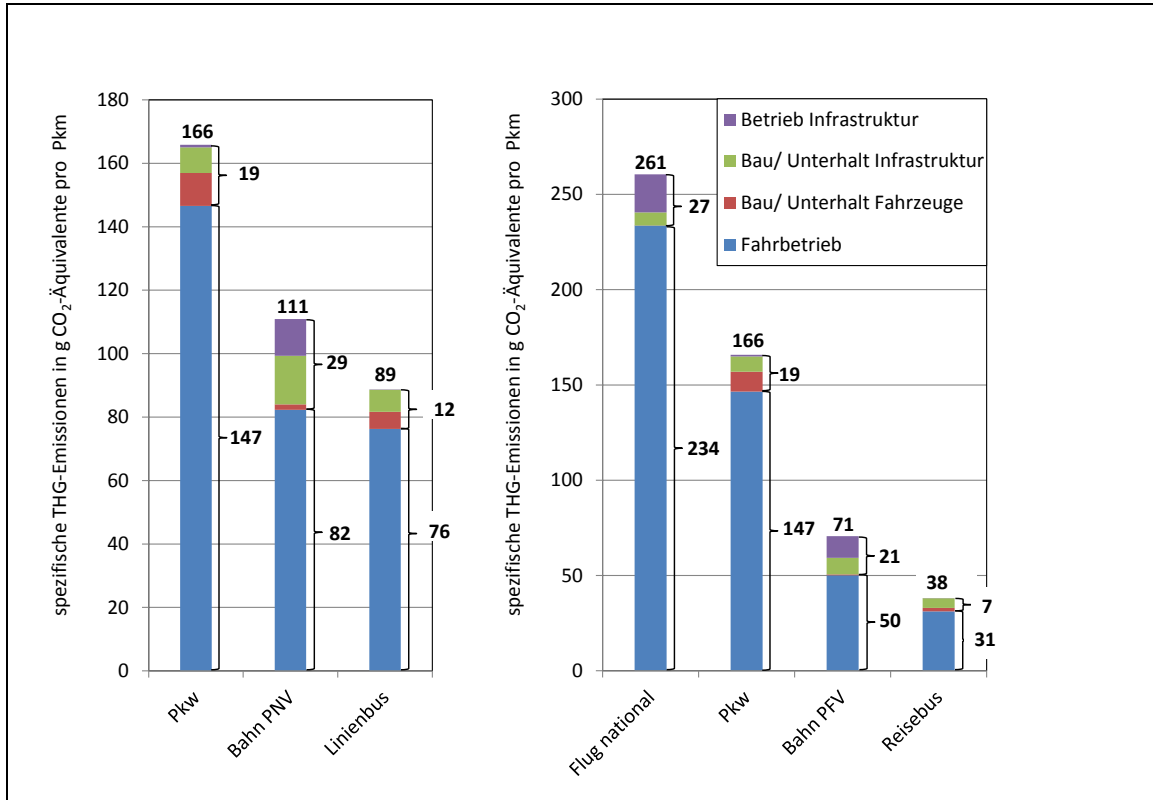


Bild 39: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Personennah- und Fernverkehr [TREMODO 5.25; eigene Berechnungen]

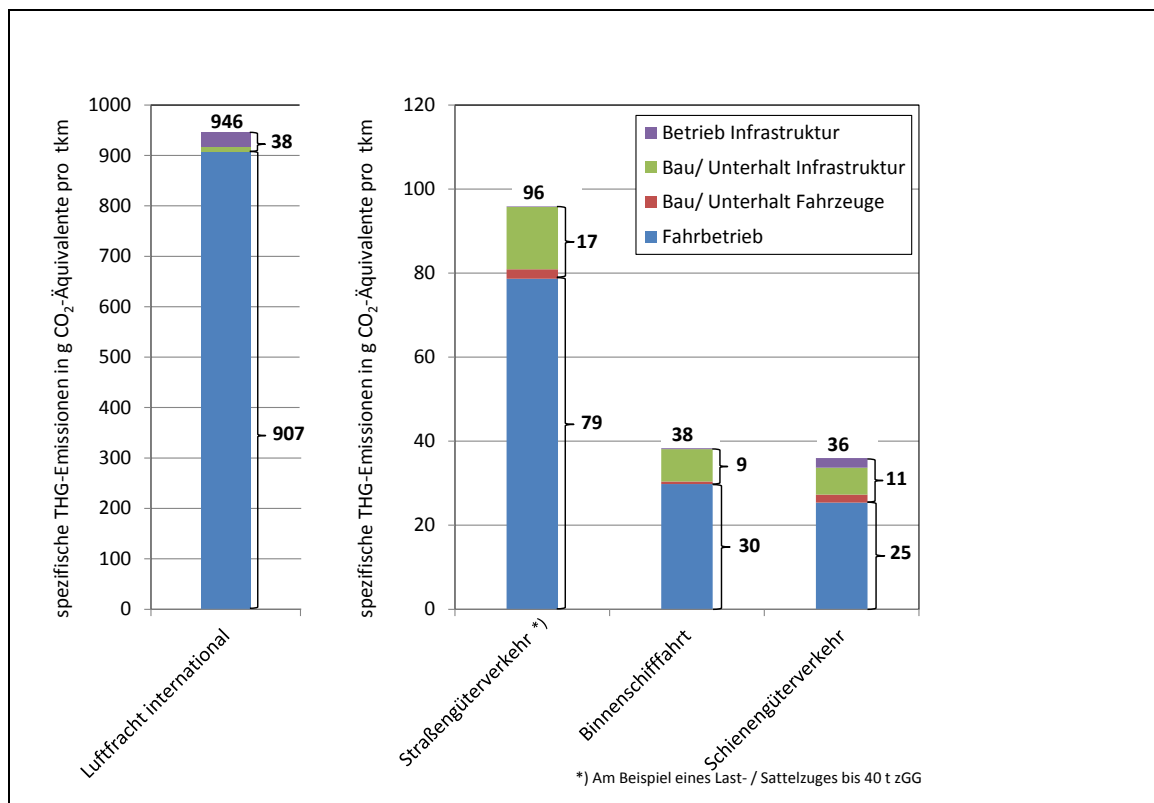


Bild 40: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge in Deutschland 2008 im Güterverkehr [Knörr et al. 2011; eigene Berechnungen]

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass die Treibhausgasemissionen durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Verkehrsinfrastruktur sowie durch den Bau und Unterhalt der Fahrzeuge von hoher Relevanz sein können und daher bei zukünftigen Umweltvergleichen einbezogen werden sollten. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass sich der Einfluss der drei Bereiche bei den Verkehrsträgern stark unterscheiden kann, und es deshalb sinnvoll ist, stets alle drei Bereiche einzubeziehen. Während die Fahrzeugherstellung beim Schienenpersonenverkehr und Flugverkehr einen geringen Einfluss besitzt, führt sie beim Pkw-Verkehr neben dem Fahrbetrieb zu den meisten Emissionen. Auf der anderen Seite scheint der Betrieb der Infrastruktur im Straßenverkehr vernachlässigbar, führt aber im Luftverkehr zu den größten zusätzlichen Emissionen.

Für den Einbezug der Verkehrs- und Fahrzeuginfrastrukturen in Umweltvergleiche werden von Seiten des Öko-Instituts folgende Punkte gesehen:

- Die in dieser Studie verwendeten Materialmengen für die einzelnen Bestandteile der Infrastruktur z. B. pro Gleiskilometer und Bauwerk (z. B. Oberbau, Schienen, Schwellen oder Straßenoberbau) und die sich daraus ergebenden

Treibhausgasemissionen stimmen gut mit Ergebnissen anderer Studien überein. Teilweise liegen die Werte in dieser Studie höher als die von Vergleichsstudien (z. B. für Tunnel). In diesen Fällen haben eigene Recherchen höhere Materialmengen ergeben als in der Literatur publiziert. Zukünftig sollten diese Werte einer kritischen Überprüfung unterzogen werden, um sie weiter wissenschaftlich abzusichern. Die Verbesserung der Datenqualität auf der Seite der eingesetzten Materialien wird sich allerdings nur geringfügig auf das Gesamtergebnis auswirken.

- Der Vergleich mit anderen Studien hat gezeigt, dass die durchgeführte vereinfachte Stoffstromanalyse für die Fahrzeugherstellung zu teilweise deutlich geringeren Emissionen als mit anderen Methoden wie bspw. eine Ökonomische-Input-Output-LCA, führen kann. Zukünftig sollte diesem Bereich größere Aufmerksamkeit geschenkt werden.
- Zur Berechnung der jährlichen Treibhausgasemissionen durch den Bau langlebiger Infrastrukturbestandteile (z. B. Tunnel, Brücken, Bahnhöfe) wurde in dieser Studie eine Lebensdauer von 60 Jahren verwendet. Dieser Wert entspricht den Vorgaben der oben erwähnten Product Category Rules for Railways [PCR 2009]. Einige Autoren vergleichbarer Studien verwenden für langlebige Infrastrukturen Lebensdauern von 100 Jahren. Es sollte hierzu eine Vereinheitlichung der methodischen Vorgehensweise angestrebt werden, da die Sensitivitätsrechnungen in dieser Studie zeigen, dass diese längere Lebensdauer zu niedrigeren CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Bereich Bau und Unterhalt der Infrastruktur führen. Beim Straßenverkehr und Luftverkehr ist der Einfluss mit bis zu 0,3 % bzw. bis zu 0,2 % zwar gering, bei der Binnenschifffahrt hingegen sinken die CO₂-Äquivalent-Emissionen um 8 %. Dies belegt die Bedeutung der zugrunde gelegten Lebensdauer für das Gesamtergebnis.
- Während die Allokation für das Schienennetz auf Basis sehr detaillierter Daten Streckenabschnittsgenau durchgeführt wurde, erfolgte sie beim Straßenverkehr und der Binnenschifffahrt auf einem eher groben Level. So erfolgt die Allokation in der vorliegenden Studie beispielsweise auf Basis der Brutto-Tonnen-Kilometer auf dem gesamten Straßennetz, wodurch nicht berücksichtigt wird, ob die Verkehrsleistung einzelner Fahrzeugkategorien überwiegend auf bestimmten Straßentypen erbracht wird. Zum Anderen spielt die Art der Allokation eine entscheidende Rolle für die Verteilung der Emissionen aus dem Bau und Unterhalt der Deckschicht. Wie eine Sensitivitätsanalyse gezeigt hat, können sich die Emissionen aus diesem Bereich bei den Fahrzeugen mit großen Achslasten (LKW und Busse) mehr als verdoppeln, wenn berücksichtigt wird, dass das Ausmaß des Schadens an der Deckschicht in der 4ten Potenz von der Achslast abhängt.
- In dieser Studie wurden verkehrsfremde Funktionen lediglich bei den Innerortsstraßen berücksichtigt. Insbesondere bei den Wasserstraßen besteht eine Vielzahl an verkehrsfremden Funktionen, von der Bewässerung über die Energiegewinnung bis hin zur Freizeitnutzung, welche derzeit nicht abgebildet

sind. Für einen zukünftigen Verkehrsmittelvergleich sollten Festlegungen getroffen werden, wie diese Bereiche einbezogen werden können. Dadurch würden die Emissionen der Binnenschifffahrt niedriger ausfallen.

9 Literatur

- Aerosup 2012 www.aerosup.com/CONSIGNMENT-AIRCRAFT-PARTS-FOR-AIRBUS-A300-F_1.aspx
- Airports 2012 www.airports.de abgerufen am 29.09.2011
- Augsburger Allgemeine 2010 München will den Ampel-Wald lichten, in: Augsburger Allgemeine 16.02.2010, <http://www.augsburger-allgemeine.de/bayern/Muenchen-will-den-Ampel-Wald-lichten-id7321331.html>
- Baublatt 2006 Baustellenberichte, Deutsches Baublatt: „Hier bauen die Heizelmännchen – Kirchhof saniert die Start- und Landebahn Süd am Frankfurter Flughafen und sieht gute Exportchancen für ihre Technik“; Nr. 319, März/April 2006
- Bayer et al. Bayer, E.: Beton für Bauwerke an Wasserstraßen. 1990; ISBN 3-7640-0263-8
- BBF 2010 Flughafen Berlin-Schönefeld GmbH (Hrsg.): Umweltbericht 2010. Berlin 2011 (siehe auch, <http://www.bbf.de/DE/Umwelt/downloads/FBS-Umweltbericht-2010.pdf> , abgerufen 14.06.2012)
- Berlin 2012 Berlin, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Webauftritt - Verkehr > Lenkung > Ampeln (siehe <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/lenkung/ampeln/> - abgerufen am 21.08.2012)
- BFL 2006 B+F Beton- und Fertigteilgesellschaft mbH Lauchhammer (BFL): Produktliste Kabeltiefbau. Lauchhammer: 2006. (Internet: www.bfl-gmbh.de/files.php?dl_mg_id=20&file=dl_mg_1156930423.pdf , abgerufen am 20.1.2010)
- BMVBS 1994-2010 Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen, Ausgaben 1994 - 2010 (bis 1997 nur „Brücken an Bundesfernstraßen“), Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Stadtentwicklung
- BMVBS 2004 Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: „Wirtschaftlich und umweltverträglich: Nassbaggerstrategien in Deutschland“; 2004
- BMVBS/ BAST 2012 Karte der Frosteinwirkungszonen – aus Daten des DWD, (<http://www.bast.de/DE/Aufgaben/abteilung-s/referat-s2/S2-Frostzonenkarte.html>)
- Boeing 2012 <http://www.boeing.com/commercial/md-11family/freighter.html>
- Bombardier 2003 Bombardier Transportation: Environmental Product Declaration Class 185 (according to ISO 14021). Kassel: 2003
- Brüning 2012 Brüning H.: "Klimaschutz in Norderstedt - Energetische Sanierung der Lichtsignalanlagen mit LED-Technik" (siehe

- http://www.norderstedt.de/PDF/Ampeln.PDF?ObjSvrID=1087&ObjID=7742&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&_ts=1334904846 - abgerufen am 21.08.2012)
- Buchert et al. 2004 Buchert, M.; Fritsche, U.; Jenseit, W.; Rausch, L.; Deilmann, C.; in Zusammenarbeit mit IÖR, Dresden: Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche Infrastruktur“. Darmstadt/Dresden: 2004
- Bundesnetzagentur 2010 Krick; W.: Gleislängen und Betriebslängen öffentliche NE-Bahnen in Deutschland 2007. Persönliche Mitteilung vom 24.2.2010.
- Chester 2008 Chester, M. V: Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States. Dissertation, Institute of Transportation Studies, UC Berkeley. Berkeley: 2008
- Chester/Horvath 2009 Chester, V.; Horvath, A.: Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure in: Environmental Research Letters Volume 4 Number 2, 2009
- DB 2009a Löchter, Andreas (Deutsche Bahn AG, Bahn-Umweltzentrum): Access-Datenbank zum Schienennetz der DB AG. Persönliche Mitteilung vom 16.12.2009 (unveröffentlicht)
- DB 2009b Löchter, Andreas (Deutsche Bahn AG, Bahn-Umweltzentrum): Energieverbrauch für den Betrieb der Schieneninfrastruktur. Persönliche Mitteilung vom 18.11.2009 (unveröffentlicht)
- DB 2009c DB Station&Service AG (Hrsg.): Liste der Bahnhofskategorien 2009 (gültig ab 01.01.2009). Berlin: 2009
- DB 2009d Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Daten & Fakten 2008. Berlin: 2009
- De Neufville und Odoni 2003 De Neufville, R.; Odoni, A.-R.: „Airport Systems – Planning, Design and Management“. McGraw-Hill Verlag 2003, ISBN 0-07-138477-4
- Deru 2007 Deru, M.; Torcellini, P.:“Source Energy and Emission Factors for Energy Use in Buildings; National Renewable Energy Laboratory, 2007, Technical Report # NREL/TP-550-38617
- Destatis 2009a Fiege, L. (Statistisches Bundesamt): „Gewerblicher Luftverkehr 2008 - Wachstumsrückgang bei Passagieren und Fracht“; Wirtschaft und Statistik 4/2009 c
- Destatis 2009b Detailauszug aus der Luftverkehrsstatistik zu Starts, Passagiere und Fracht nach Entfernungskategorie und Flugzeugtyp im Jahr 2008
- DIUM 2009 DIUM DE Nr. 8700.00; Einheitlicher Entfernungsanzeigen für den internationalen Güterverkehr: Verzeichnis der Güterverkehrsstellen -

- Verzeichnis der Übernahme- /Ablieferungsorte; Ausgabe vom 13. Dezember 2009
- DIW 2009 Link, H; Kalinowska, D.; Kunert, U; Radke, S: Wegekosten und Wegekostendeckung des Straßen- und Schienenverkehrs in Deutschland im Jahre 2007, Politikberatung kompakt 53, Berlin 2009
- Dorsch Consult 2006 Dorsch Consult: Ausbau Flughafen Frankfurt Main, Unterlagen zum Planfeststellungsverfahren, Planteil B 1.1, Erläuterungsbericht, Flugbetriebsflächen, Stand 13.10.2006
- Dresden Int. 2010 Flughafen Dresden GmbH (Hrsg.): Flughafen und Umwelt. Dresden 2010 (siehe auch <http://www.dresden-airport.de/tycon/file.php?id=1929>, abgerufen am 14.06.2012)
- ecoinvent 2009 Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.): ecoinvent. Ökobilanzdatenbank, Version 2.1. 2009
- Eisenmann/Leykauf 2003 Eisenmann, J; Leykauf, G.: Betonfahrbahnen, Berlin 2003
- Emtech 2012 Emtec tankanlagen gmbh zu Gewicht unterirdischer Tankanlagen; abgerufen am 02.12.2012 <http://www.emtec-tankanlagen.at/produkte-/betriebstankstellen/unterirdische-tankanlagen-na-u>
- FDG 2012 Flughafen Dortmund GmbH: Webauftritt, Umwelt- / Lärmschutz – Umweltinfos (abgerufen von <http://www.dortmund-airport.de/index.php?id=822>, am 14.06.2012)
- Fendrich 2007 Fendrich, L.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- FFG 2009 Flughafen Friedrichshafen GmbH (Hrsg.): Umwelterklärung 2009. Friedrichshafen 2009 (siehe auch http://www.fly-away.de/index.php?eID=tx_mm_bccmsbase_zip&id=7976556475093c3e5dfc1, abgerufen am 14.06.2012)
- Fiedler 2005 Fiedler, J.: Bahnwesen – Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen. 5. Auflage. München: Werner Verlag, 2005
- FHG 2011 Flughafen Hamburg GmbH (Hrsg.): Umwelterklärung 2011 – 2014. Hamburg 2011 (siehe auch www.airport.de/resources/downloads-/UE_2011_2014_10_26_web.pdf , abgerufen am 14.06.2012)
- FHLG 2010 Flughafen Hannover-Langenhagen GmbH (Hrsg.): Umwelterklärung 2010. Hannover 2010 (siehe auch http://www.hannover-airport.de/uploads/media/Umwelterklaerung_2010.pdf, abgerufen am 14.06.2012)
- FKBG 2010 Flughafen Köln / Bonn GmbH (Hrsg.): Klima und Umwelt. Köln 2010 (siehe auch <http://www.koeln-bonn->

- airport.de/uploads/tx_download/KBAUmweltb2010web.pdf, abgerufen am 14.06.2012)
- FMG 2009 Flughafen München GmbH (Hrsg.): Perspektiven – Nachhaltigkeitsbericht 2008. München 2009 (siehe auch http://www.munich-airport.de/media/download/general/publikationen/de/um_erklaerung_2008_de.pdf, abgerufen am 14.06.2012)
- FMOG 2010 Flughafen Münster/Osnabrück GmbH (Hrsg.): Umweltbericht 2010. Münster 2010 (siehe auch <http://www.flughafen-fmo.de/download/Umweltbericht%202010.pdf?PHPSESSID=xdqzyzqfmo>, abgerufen am 14.06.2012)
- Fraport 2011 Fraport GmbH (Hrsg.): Kennzahlen und Fakten. Frankfurt 2011 (siehe auch http://www.fraport.de/content/fraport-ag/de/misc/binaer/nachhaltigkeit/kennzahlen-und-fakten/jcr:content.file/Fraport_NB11_D_Kennzahlen_120420.pdf, abgerufen am 14.06.2012)
- Frischknecht/Stucki 2009 Frischknecht, R.; Stucki, M. (ESU-services GmbH): Primärenergiefaktoren von Transportleistungen. Version 1.3, 19. März 2009. Uster: 2009
- FSG 2010 Flughafen Stuttgart GmbH (Hrsg.): Umweltbericht 2010. Stuttgart 2010 (siehe auch http://www.flughafen-stuttgart.de/sys/pdf/umweltbericht_2010.pdf, abgerufen am 14.06.2012)
- GGG 2006 Gewichtsliste: Stahlschutzplankensysteme gemäß RAL-RG 620 (TL-SP 99), Gütegemeinschaft Stahlschutzplanken e.V. 2006
- Gütersloh 2012 Stadt Gütersloh: Webauftritt "Erfolge im Rathaus - Weniger Energieverbrauch, mehr Klimaschutz" (siehe <http://www.guetersloh.de/Z3VldGVyc2xvaGQ0Y21zOjczMTg=.x4s> - abgerufen am 21.08.2012)
- Haberl 2010 Haberl, J.; TU Wien aus <http://www.diebauzeitung.at/ppp-beton-statt-asphalt-101921.html>, 05.03.2010 (abgerufen September 2012)
- Hamburg 2009 Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt: "Hamburger Klimaschutzkonzept 2007 - 2012", Hamburg 2009 (abgerufen von <http://klima.hamburg.de/contentblob/3186284/data/klimaschutzkonzept-fortschreibung-2.pdf>)
- Hill et al. 2012 Hill, N., Brannigan, C: "The role of GHG emissions from infrastructure construction, vehicle manufacturing, and ELVs in overall transport sector emissions." Task 2 paper produced as part of a contract between European Commission Directorate-General Climate Action and AEA Technology plc; see website www.eutransportghg2050.eu.

- Hillenbrand et al. 2005 Hillenbrand, T; Toussaint, D.; Böhm, E. (alle Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe); Fuchs, S.; Scherer, U. (alle Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe); Rudolphi, A.; Hoffmann, M. (Gesellschaft für Ökologische Bautechnik Berlin mbH, Berlin): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden - Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. Texte Nr. des Umweltbundesamtes 19/05. Dessau: 2005
- IPCC 2007 Intergovernmental panel on climate change (IPCC), Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. 2007 <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>
- Kaschner 2011 Kaschner, R. (Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat „Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung“): Bestand und Statistiken von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen. Persönliche Mitteilungen vom 05.10.2011 und 11.10.2011 (unveröffentlicht)
- KBA 2012 Kraftfahrzeugbestand der PKW nach Kraftstoffart. Abgerufen am 03.12.2012: http://www.kba.de/cln_030/nn_269000/DE/Statistik-/Fahrzeuge-/Bestand/EmissionenKraftstoffe/b__emi__z__teil__2.html
- Kellenberger et al. 2007 Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künniger T., Lehmann M.;Thalmann P. (2007) Life Cycle Inventories of Building Products. ecoinvent report No. 7, v2.0. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, from www.ecoinvent.org.
- Kiel 2010 Landeshauptstadt Kiel, Umweltschutzamt: "Energiebericht 2010 - Hauptentwicklungstendenzen", Kiel 2010 (siehe http://www.kiel.de/leben/umwelt/klimaschutz/Energiebericht/Energiebericht_2010.pdf – abgerufen am 21.08.2012)
- Kiewert et al. 2009 Kiewert, F.; Groh, T.; Schwarzer, M.; Lang, H.-P.; Hechenberger, A.; Krötz, W.; Lankes, P.; Matschke, P.; Rhode, T.; Trockels, I.; Behmann, U.: Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2008. In: Elektrische Bahnen (eb), Nr. 1-2/2007; S. 3-47
- Kirchner 2005 Kirchner Holding GmbH (Hrsg.): Journal 2005. Mitarbeiterzeitung der Kirchner Holding GmbH. Bad Hersfeld: 2005
- Knoll 2010 Knoll, E.: „Der Elsner 2011: Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen (Planung, Bau, Erhaltung, Verkehr, Betrieb)“. Otto Elsner Verlagsgesellschaft 2010, ISBN 978-3-87199-199-8
- Knörr et al. 2010 Knörr, W; Schacht, A. (IFEU-Institut) und Gores, S. (Öko-Institut e.V.): „Entwicklung eines eigenständigen Modells zur Berechnung des

- Flugverkehrs (TREMODO-AV) – Endbericht“; FKZ 360 16 029; Berlin, Heidelberg, 30.11.2010
- Knörr et al. 2011 Knörr, W.; Heidt, C.; Schacht, A. (IFEU); Mottschall, M., Schmied, M.; Leppler, S. (Öko-Institut): „Aktualisierung der Emissionsfaktoren und Verkehrsleistungen von Binnenschiffen und Übertragung ins TREMOD-Programm“; Endbericht, Im Auftrag des Umweltbundesamtes FKZ 363 01 403; 15. Dezember 2011
- Knörr et al. 2011b Knörr, W.; Dünnebeil, F.; Lambrecht, U.; Schacht, A. (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH): „Aktualisierung Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2012 (Berichtsperiode 1990-2010)“; 30. November 2011
- Knörr et al. 2012 Knörr, W.; Schacht, A. (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg) und Gores, S. (Öko-Institut e.V., Berlin): „Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs – TREMOD AV“; UBA Rexte 48/2012; Dessau-Roßlau, September 2012
- Knörr/Kutzner 2009 Knörr, W.; Kutzner, F.: Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Binnenschiffen, Flugzeugen und Schienenfahrzeugen. Dokumentation im Rahmen des BMU-Projektes „renewability – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“. Heidelberg: 2009
- Köser et al. 2002 Köser, H.; Herbst, G.; Konitzer, E.; Rozycki, C. v.: Ökobilanzierung von Schienenverkehrssystemen am Beispiel des ICE-Verkehrs. Phase 1, Teil 1 (Datenerhebung). Abschlussbericht der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Auftrag der Deutschen Bahn AG. Halle: 2002
- Kommunal Direkt 2005 Aachen ist Vorreiter beim Stromsparen mit LED-Ampelanlagen in Deutschland, in: Kommunal Direkt, Heft 6/2005 http://www.kommunaldirekt.de/content/1magazin/archiv/2005/2005_6/energie/02.html (abgerufen am 30.11.2012)
- Kreide 2004 Kreide, M.: „Oberflächenerneuerung der Runways 07R/25L (Flughafen Berlin-Schönefeld) März – April 2004“; 30.04.2004
- Lattermann 2010 Latterman, E.: „Wasserbau-Praxis“. Bauwerk Verlag 2010; ISBN 978-3-89932-279-8
- Link et al. 2009 Link, H.; Kalinowska, D.; Kunert, U.; Radke, S.: „Wegekosten und Wegekostendeckung des Straßen- und Schienenverkehrs in Deutschland im Jahre 2007“. Berlin, 2009; ISBN 978-3-938762-44-8

- Lopes 2010 Lopes, J. V. d O. F.: Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial, 2010
- LUBW 2008 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: "LED Aneplanlagen: Kaltes Licht spart Energie", Freiburg 2008 (abgerufen von http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/44181/led_ampeln_beispiel_freiburg.pdf?command=downloadContent&filename=led_ampeln_beispiel_freiburg.pdf)
- Lünser 1999 Lünser, H.: „Ökobilanzen im Brückenbau - Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung“. Birkhäuser Verlag 1999, ISBN 3-7643-5946-3
- Maibach et al. 1995 Maibach, S.; Peter, D.; Seiler, B.: „Ökoinventar Transporte“. INFRAS 1995; ISBN 3-9520824-5-7
- Matthews 2007 Matthews, V.: Bahnbau. 7. Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2007
- Muc 2007 Planfeststellungsverfahren 3. Start- und Landebahn Flughafen München: „Regelquerschnitt Start- / Landebahn 09 / 27“; 20.08.2007 http://www.muc-ausbau.de/media/downloads/pfv/B1_120_Regelquerschnitt_SLB.pdf abgerufen am 07.11.2012
- Nabu 2009 Schiller, C.; Kuhn, T.; Böll, M. Khanh, T.Q. : Straßenbeleuchtung mit LEDs und konventionellen Lichtquellen im Vergleich – Eine licht- und wahrnehmungstechnische Analyse aus einer wissenschaftlich begleiteten Teststraße in Darmstadt. In: Licht, 2009
- Natzschka 2011 Natzschka, H.: „Straßenbau – Entwurf und Bautechnik, 3. Auflage“. Vieweg & Teubner Verlag 2011, ISBN 978-3-8348-1343-5
- NBA-H 2012 Neubauamt Hannover; Abgeschlossene Baumaßnahmen. Siehe http://www.nba-hannover.wsv.de/baumassnahmen-/abgeschlossene_baumassnahmen/index.html (abgerufen am 04.01.2012)
- Ohne Autor 2002 Ohne Autor: Das Projekt Neubaustrecke Köln–Rhein/Main. In: Eisenbahn JOURNAL: Tempo 300 – Die Neubaustrecke Köln–Frankfurt. Sonderausgabe Nr. 3/2002, S. 34–63
- Schmied/Mottschall 2013 Schmied, M und Mottschall M.: „Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Teilgutachten im Rahmen des Forschungsvorhabens "Welches Schienennetz braucht Deutschland?" (FKZ 36301244); Berlin 2013
- PCR 2009 Product Category Rules for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for Interurban railway transport services of passengers, Railway transport services of freight and Railways. PCR 2009:03, Version 1.0 (2009-08-18) Prepared by The Bothnia Line <http://www.environdec.com/en/Product-Category-Rules/Detail/?Pcr=5794>

- Rommerskirchen et al. 2007 Rommerskirchen, S.; Rothengatter, W.; Greinus, A.; Leyboldt, P.; Liedtke, G.; Scholz, A.: „Aktualisierung der Wegekostenrechnung für die Bundesfernstraßen in Deutschland“. Basel/Karlsruhe 2007
- Rosauer 2010 Rosauer, V.: „Abschätzung der herstellungsbedingten Qualität und Lebensdauer von Asphaltdeckschichten mit Hilfe der Risikoanalyse“. Dissertation, TU Darmstadt 2010
- Schade 2010 Schade, H.-W.: „Bodenbehandlung in der neuen ZTV E-StB 09 sowie in den neuen Merkblättern“. 5. Fachtagung Zementstabilisierte Böden, Gütegemeinschaft Bodenverfestigung Bodenverbesserung, Chemnitz 2010
- Schmied et al. 2011 Schmied M., Kranke A., Schön A. D.: „CO2 Berechnung in der Logistik“. Heinrich Vogel Verlag 2011, ISBN 978-3-57426-095-7
- Schweinfurt 2012 Stadt Schweinfurt, Webauftritt: Umwelt & Verkehr > Tiefbau > Ampelanlagen (siehe <http://www.schweinfurt.de/leben/umweltverkehr/tiefbauamt/701.Ampelanlagen.html> - abgerufen am 21.08.2012)
- Selle 2003 Selle, H. J. (WNA Magdeburg): „Stahlwasserbau der Schleuse Rothensee“; Magdeburg 10.10.2003
- Skyplan 2012 Skyplan Services Ltd.: „Generic Aircraft Database“; April 2012; <ftp://www.skyplan.com/manuals/Generic%20Aircraft%20Database.pdf>
- Spielmann et al. 2007 Spielmann, M.; Bauer, C.; Dones, R; Tuchschnid, M.: Life Cycle Inventories of Transport Services. Data v2.0. ecoinvent report No. 14. Villingen/Uster: 2007
- StBA 2008 Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Eisenbahnverkehr 2008 – Betriebsdaten des Schienenverkehrs (mit Daten zur Schienenfrequentierung). Wiesbaden: 2008
- Steffens 2012 Herr Steffens (Total): Zusammenstellung der Tanks nach Tankvolumen der Total-Tankstellen, persönliche Mitteilung
- Steger et al. 2011 Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S.: „Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen“. Meilensteinbericht MaRes 2.3; Wuppertal: 2011; ISSN 1867-0237
- Steinemann/Borel 1994 Steinemann, U., Borel, J.-P.: Erhebung des Elektrizitätsverbrauchs Bestehender Strassentunnel, Materialien zu RAVEL, Herausgeber/ Bundesamt für Konjunkturfragen (BfK) Schweiz, 1994
- Strobl 2006 Strobl, T.; Zunic, F.: „Wasserbau, Aktuelle Grundlagen – neue Entwicklungen“. Springer Verlag 2006, ISBN: 3-540-22300-2
- ThyssenKrupp 2006 ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH: Oberbauhandbuch. Bochum: 2006 (siehe auch: www.oberbauhandbuch.de)

- TZ-Online 2012 Schmidt, Th.: 06.02.12 Ampel-Geheimnis: So errechnen Sie eine Grünphase, <http://www.tz-online.de/aktuelles/muenchen/geheimnis-ampelnso-errechnen-eine-gruenphase-tz-1590352.html>, (abgerufen am 30.11.2012)
- UBA 2012 Hintergrundpapier des Umweltbundesamtes: „Klimawirksamkeit des Flugverkehrs - Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand über die Effekte des Flugverkehrs“; Dessau-Roßlau, 12. April 2012
- UIC 2009 Tuchschnid, M.: Carbon Footprint of High-Speed railway infrastructure. Methodology and application of High-Speed railway operation of European Railways. Gutachten im Auftrag der International Union of Railways (UIC). Zürich: 2009
- UIC 2010 Barron, T.; Martinetti, G. (Systra Conseil): High Speed Railway contribution to sustainable mobility. Gutachten im Auftrag der International Union of Railways (UIC). Paris: 2010
- VDV 2009 Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): VDV Statistik 2008. Köln: 2009
- Verkehrsrundschau 2008 Verkehrsrundschau: „Tiefensee: mehr LKW-Parkplätze“ 12.03.2008; abgerufen am 01.12.2012; <http://www.verkehrsrundschau.de/tiefensee-mehr-lkw-parkplaetze-630193.html>
- VIZ 2011 Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin(Hrsg.: BMVBS): „Verkehr in Zahlen 2011/2012“, DVV Media Group GmbH 2011, ISBN 978-3-87514-456-9
- VWEW 2009 Straßenbeleuchtung – Leitfaden für Planung, Bau und Betrieb, VWEW Energieverlag GmbH 2009, ISBN 978-3-8022-0949-9
- Walter2012 Walter, K. (Destatis): Daten zu Passagieren und Fracht für alle Relationen in 2008. Persönliche Mitteilung vom 23.10.2012
- Werner 2008 Werner, F.: Ökologische Bilanzierung von Eisenbahnschwellen: Vergleich von Schwellen aus Buchenholz, Eichenholz, Beton und Stahl. Eine Studie von Umwelt & Entwicklung im Auftrag der Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V. Zürich: 2008
- WSV 2011 Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes; Gliederung Bundeswasserstraßen. Siehe http://www.wsv.de/wasserstrassen-/gliederung_bundeswasserstrassen/index.html (abgerufen im November 2011)
- WNA-D 2012 Wasserstraßen-Neubauamt Datteln: Ausbau des Dortmund-Ems-Kanals, Ausbaustrecke „Kanalbrücke Ems“, DEK-km 77.850N - 79.350N, Los 13a.
- WNA-M 2012a Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg; Schleusen. Siehe <http://www.wna-magdeburg.wsv.de/schleusen/index.html>(abgerufen am 04.01.2012)

- WNA-M 2012b ARGE Kanalbrücke Magdeburg, Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg: Kanalbrücke über die Elbe – Wasserstraßenkreuz Magdeburg. Zu beziehen unter http://www.wna-magdeburg.wsv.de/images/Download/Publikationen/Brosch_KB.pdf (abgerufen Juli 2012)
- WSA-M 2012 Wasser- und Schifffahrtsamt Minden, Kanalbrücken. Siehe <http://www.wsa-minden.de/bauwerke/kanalbruecken/index.html> (abgerufen Juli 2012)
- Zimmer et al. 2009 RENEWBILITY „Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030

10 Anhang

10.1 Methodisches Vorgehen

Tabelle 85: Überblick über die in dieser Studie verwendeten Lebensdauern

Bereich der Infrastruktur	Lebensdauer in Jahren	
	Basis-betrachtung	Sensitivitäts-betrachtung
Straßenverkehr		
Straßenunterbau	60	100
Tragschichten	40	x
Asphaltdeckschicht	20	x
Betondeckschicht	30	x
Pflasterdeckschicht	60	x
Tunnel	60	100
Brücken	60	100
Verkehrszeichen	20	x
Ampeln	20	x
Lichtmasten	50	x
Rast- und Autohöfe	60	100
Tankstellen	60	100
Werkstätten	60	100
Luftverkehr		
Unterbau ¹⁾	40/60	x/100
Tragschichten	40	x
Asphaltdeckschicht	20	x
Betondeckschicht	30	x
Flughafengebäude	60	100
Binnenschiffsverkehr		
Uferbefestigungen	60	100
Kanäle	60	100
Schleusen	60	100
Kanalbrücken	60	100
Binnenhäfen	60	100

Anmerkung: x = keine Sensitivitätsbetrachtung

1) Start- und Landebahnen/ Sonstige Flächen

Quellen: [Rosauer 2010], [Haberl 2010], [Spielmann et al. 2007]

Tabelle 86: CO₂- und THG-Emissionsfaktoren für verschiedene Materialien

Material	Einheit	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
Sand, ab Werk	kg/kg	0,002	0,002
Schotter, zerkleinert, ab Mine	kg/kg	0,004	0,004
Rundkies, ab Mine	kg/kg	0,002	0,002
Kalkstein, ab Mine	kg/kg	0,002	0,002
Zement, un spezifiziert, ab Werk	kg/kg	0,743	0,759
Beton, ab Werk	kg/m ³	316,795	323,841
Anhydrit, ab Werk	kg/kg	0,002	0,002
Backstein, ab Werk	kg/kg	0,230	0,238
Stahl, Konverter, niedriglegiert, ab Werk	kg/kg	1,879	2,040
Stahl, niedriglegiert, ab Werk	kg/kg	1,588	1,716
Bewehrungsstahl, ab Werk	kg/kg	1,332	1,444
Kupfer, primär, ab Raffinerie	kg/kg	2,801	3,100
Kupferherstellung, durchschn. Metallverarbeitung	kg/kg	1,729	1,825
Bronze, ab Werk	kg/kg	2,687	2,899
Aluminium, Produktionsmix, ab Werk	kg/kg	6,697	7,043
Blei, primär, ab Werk	kg/kg	1,981	2,102
Zinn, ab Regionallager	kg/kg	16,113	17,031
Zink, primär, ab Regionallager	kg/kg	3,130	3,361
Flachglas, beschichtet, ab Werk	kg/kg	1,052	1,090
Flachglas, unbeschichtet	kg/kg	0,223	0,233
Polyethylen (HDPE), Granulat, ab Werk	kg/kg	1,574	1,929
Polyvinylchlorid (PVC)	kg/kg	1,834	1,967
Glas-faserverstärkter Kunststoff, Polyamid, Ab Werk	kg/kg	7,695	8,791
Buchenholz, ab Werk	kg/m ³	60,748	64,433
Teeröl, ab Werk	kg/kg	1,272	1,586
Glaswolle matze, ab Werk	kg/kg	1,346	1,455
Gusseisen, ab Werk	kg/kg	1,351	1,476
Nickel, 99.5%, ab Werk	kg/kg	10,286	10,805
Silizium, Halbleiter, ab Werk	kg/kg	73,785	85,772
Platin, ab Regionallager	kg/kg	13.752,179	14.749,665

Material	Einheit	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
Palladium, ab Regionallager	kg/kg	8.839,462	9.692,309
Rhodium, ab Regionallager	kg/kg	26.884,392	28.864,953
Magnesium, ab Werk	kg/kg	6,255	7,279
Gummi EPDM, ab Werk	kg/kg	2,418	2,641
Schmieröl, ab Werk	kg/kg	0,960	1,046
Kältemittel R134a, ab Werk	kg/kg	6,534	6,966
Gussasphalt, ab Werk	kg/kg	0,192	0,209
Mangan, ab Regionallager	kg/kg	2,457	2,580
Aluminium-Legierung, AlMg3, ab Werk	kg/kg	3,238	3,441
Polycarbonat, ab Werk	kg/kg	6,066	7,776
Glasfaserverstärkter Kunststoff, Polyamid, Spritzguss, ab Werk	kg/kg	7,695	8,791
Armierungsstahl, ab Werk	kg/kg	1,332	1,444
Titanzinkblech, nicht vorbewittert, ab Werk	kg/kg	4,768	5,091

Quelle: ecoinvent v2.1 [ecoinvent 2009]

Tabelle 87: Dichte verschiedener Baumaterialien

Material	Dichte
	kg/m ³
Gussasphalt	2.500
Schotter	1.775
Kies	1.900
Beton	2.380
Beton, bewehrt	2.400
Naturstein	2.200

Quelle: ecoinvent v2.1 [ecoinvent 2009]

Tabelle 88: CO₂- und THG-Emissionsfaktoren (einschl. Emissionen aus der Kraftstoffherstellung bzw. Stromproduktion) für Transporte mit verschiedenen Lkw-Größenklassen, der Bahn und dem Binnenschiff in Deutschland im Jahr 2008

Fahrzeugtypen	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	im Vgl. zu TREMOD 4.17
	g/tkm	g/tkm	
Solo-Lkw <= 7,5 t	359,4	362,7	-2%
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	303,5	306,0	-3%
Solo-Lkw >12-14 t	239,1	241,6	-7%
Solo-Lkw >14-20t	210,1	212,3	-8%
Solo-Lkw >20-26t	201,6	203,8	-10%
Solo-Lkw > 26 t	183,2	185,3	-8%
Sattelzug/AT <= 28 t	201,1	202,8	15%
Sattelzug/AT > 28 - 34 t	101,6	102,7	-7%
Sattelzug/AT > 34 - 40 t	77,5	78,6	-6%
Bahn	23,4	25,1	-12%
Binnenschiff	7,3	7,4	-

Quelle: TREMOD v.5.25

Tabelle 89: CO₂- und THG-Emissionsfaktoren für die verwendeten Energieträger

Energie	Einheit	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
Strom - Mittelspannung	g/kWhel	613,9	639,6
Erdgas	g/kWh	226,7	254,4
Fernwärme	g/kWhth	228,8	243,8
Heizöl	kg/Liter	3,15	3,19
Heizöl	g/KWh	0,317	0,321
Diesel	kg/Liter	2,92	2,94
Benzin	kg/Liter	2,7	2,8
Flüssiggas	kg/Liter	1,88	1,9

Quelle: GEMIS 4.5 [Fritsche et al. 2008],[Schmied et al. 2011] ,TREMOD v 5.1

Tabelle 90: CO₂- und THG Emissionen für Baumaschinen zum Ausgraben und Verfüllen von Erdmassen

Energie	Einheit	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
Bagger	kg/m ³ Erde	0,37	0,38
Planierraupe	kg/m ³ Erde	0,49	0,49

Quellen: ecoinvent v2.1 [ecoinvent 2009]; [UIC 2010].

10.2 Straßenverkehr

10.2.1 Infrastruktur

Tabelle 91: Brücken- und Tunneldaten der deutschen Bundesfernstraßen

Straßenklasse	Brückenfläche	Tunnellänge
	m ²	km
Autobahnen	19.835.770	148
Bundesstraßen	9.842.257	94

Quelle: Kaschner 2011

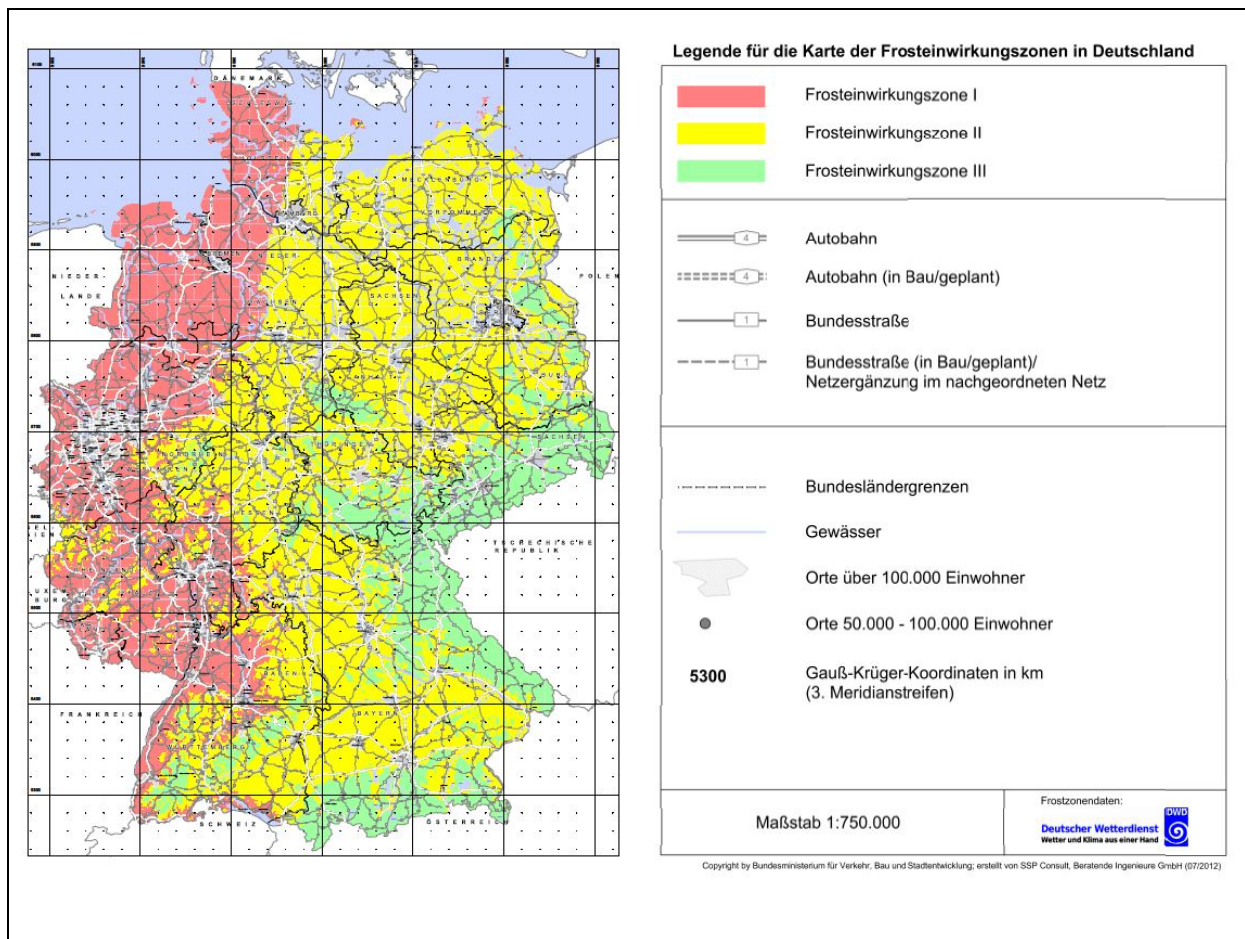


Bild 41: Frosteinwirkungszone in Deutschland [BMVBS/BAST 2012 - Frostzonenkarten: Deutscher Wetterdienst DWD]

Tabelle 92: Mehr- bzw. Minderdickenbedarf des frostsicheren Oberbaus durch örtliche Verhältnisse

Örtliche Verhältnisse		Faktor in cm			
		A	B	C	D
Frosteinwirkung	Zone I	±0			
	Zone II	+5			
	Zone III	+15			
Lage der Gradiente	Einschnitt, Anschnitt, Damm < 2 m		+5		
	Damm > 2 m		-5		
	In geschlossener Ortslage etwa in Geländehöhe		±0		
Wasserverhältnisse	günstig			±0	
	ungünstig gem. ZTVE-StB			+5	
Ausführung der Randbereiche	Außerhalb geschlossener Ortslage, in geschlossener Ortslage mit wasserdurchlässigen Randbereichen				±0
	in geschlossener Ortslage mit teilweise wasserdurchlässigen Randbereichen und mit Entwässerungseinrichtung				-5
	in geschlossener Ortslage mit wasserundurchlässigen Randbereichen, geschlossener seitlicher Bebauung und Entwässerungseinrichtung				-10

Quelle: [Natzschka 2011]

Tabelle 93: Materialzusammensetzung der einzelnen Bestandteile der Straßenausstattung und -beleuchtung

Straßenausstattung	Stahl verzinkt	HD-PE	AlMg2	Alu	PC
	kg	kg	kg		
Leitpfosten ²⁹	3,6	3,7			
Leitplanke außen pro m (ESP, Profil B, PA2.0-4.0)	16,8				
Leitplanke mittig pro m (DDSP, Profil B, 4.0)	32,6				
Schilderbrücke über Regelausbahn	4292		31,8		
Verkehrszeichen io. (Stärke 2mm) ³⁰	13,2		2,2		
Ampel	50,0			50	10
Beleuchtung	100,0				

Quelle: [IGGS 2006]; [Natzschka 2011]; Annahmen des Öko-Instituts

²⁹ Nach <http://www.beilharz-strasse.de/leitpfosten-uebersicht.html> und http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=technische+lieferbedingen+f%C3%BCr+leitprfosten+und+zubeh%C3%B6r&source=web&cd=1&ved=0CDgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.beilharz-strasse.de%2Ftl_files%2Fbeilharz_strasse%2Fpdf%2Fbeilstr_text_lp_de.doc&ei=uTmJUlaWLaqj4gTi5oHYAw&usq=AFQjCNEa_8L7zZrUfOpUW1gOtVayhdVSsg abgerufen am 30.01.2012

³⁰ Daten eines Herstellers nach StVO: <http://www.zufor.de/cat/verkehrszeichen%2820%29nach%2820%29stvo/verkehrszeichen-nach-stvo.html> abgerufen am 30.01.2012

10.2.2 Verkehrsleistung und Allokationsschlüssel

Tabelle 94: Verkehrsleistung im Straßenverkehr in 2008

Fahrzeugkategorie	Fahrleistung
	Mrd. vkm
Pkw Klein	124,2
Pkw Mittel	339,9
Pkw Groß	117,1
Linienbus-Diesel	1,6
Reisebus-Diesel	2,1
LNF-Diesel	37,4
LKW-Diesel-3,5-7,5t-Solo	8,6
LKW-Diesel-7,5-12t-Solo	2,1
LKW-Diesel->12t-Solo	6,4
LKW-Diesel-28t-Zug	2,5
LKW-Diesel-28-34t	1,2
LKW-Diesel-40t-Zug	34,7

Quelle: [TREMODO 5.25]

Tabelle 95: Annahmen zum Fahrzeugleergewicht, Auslastung und Gesamtgewicht im Straßenverkehr

Fahrzeugkategorie	Leergewicht	Auslastung	Gesamtgewicht
	t	Pers./Fzg bzw t Nutzlast/Fzg	t
Pkw Klein	1,0	1,5	1,1
Pkw Mittel	1,3	1,5	1,5
Pkw Groß	1,6	1,5	1,7
Linienbus-Diesel	11,0	14,5	12,4
Reisebus-Diesel	14,0	26,8	16,7
LNF-Diesel	1,9	-	1,9
LKW-Diesel-3,5-7,5t-Solo	4,0	1,0	5,0
LKW-Diesel-7,5-12t-Solo	5,0	1,7	6,7
LKW-Diesel->12t-Solo	6,2	3,8	10,0
LKW-Diesel-28t-Zug	5,9	3,7	9,6
LKW-Diesel-28-34t	7,8	7,8	15,6
LKW-Diesel-40t-Zug	9,8	11,7	21,4

Quelle: [Zimmer et al. 2009]; TREMOD 5.25

Tabelle 96: Allokationsschlüssel für den Straßenverkehr auf Basis der Brutto-Tonnen-Kilometer in 2008

Fahrzeugkategorie	Brutto-tkm	Allokationsschlüssel
	Mrd.	%
Pkw Klein	142,7	7,6%
Pkw Mittel	500,9	26,6%
Pkw Groß	204,6	10,9%
Linienbus-Diesel	19,8	1,1%
Reisebus-Diesel	35,8	1,9%
LNF-Diesel	69,5	3,7%
LKW-Diesel-3,5-7,5t-Solo	43,1	2,3%
LKW-Diesel-7,5-12t-Solo	13,8	0,7%
LKW-Diesel->12t-Solo	63,4	3,4%
LKW-Diesel-28t-Zug	24,3	1,3%
LKW-Diesel-28-34t	19,4	1,0%
LKW-Diesel-40t-Zug	744,1	39,6%

Quelle: [TREMOD 5.25], eigene Berechnungen

Tabelle 97: Allokationsschlüssel für den Straßenverkehr auf Basis des Energieverbrauchs in 2008

Fahrzeugkategorie	Energieverbrauch total	Allokationsschlüssel
	PJ	%
Pkw Klein	320,9	12,5%
Pkw Mittel	1.007,1	39,2%
Pkw Groß	447,9	17,4%
Linienbus-Diesel	24,7	1,0%
Reisebus-Diesel	25,2	1,0%
LNF-Diesel	130,8	5,1%
LKW-Diesel-3,5-7,5t-Solo	44,6	1,7%
LKW-Diesel-7,5-12t-Solo	15,0	0,6%
LKW-Diesel->12t-Solo	68,1	2,6%
LKW-Diesel-28t-Zug	27,0	1,0%
LKW-Diesel-28-34t	13,9	0,5%
LKW-Diesel-40t-Zug	445,4	17,3%

Quelle: [TREMODO 5.25], eigene Berechnungen

Tabelle 98: Allokationsschlüssel für den Straßenverkehr auf Basis der Fahrleistung in 2008

Fahrzeugkategorie	Fahrleistung	Allokationsschlüssel
	Mrd. vkm	%
Pkw Klein	124,2	18,3%
Pkw Mittel	339,9	50,1%
Pkw Groß	117,1	17,3%
Linienbus-Diesel	1,6	0,2%
Reisebus-Diesel	2,1	0,3%
LNF-Diesel	37,4	5,5%
LKW-Diesel-3,5-7,5t-Solo	8,6	1,3%
LKW-Diesel-7,5-12t-Solo	2,1	0,3%
LKW-Diesel->12t-Solo	6,4	0,9%
LKW-Diesel-28t-Zug	2,5	0,4%
LKW-Diesel-28-34t	1,2	0,2%
LKW-Diesel-40t-Zug	34,7	5,1%

Quelle: [TREMODO 5.25], eigene Berechnungen

10.2.3 Fahrzeugherstellung

Tabelle 99: Materialzusammensetzung der Pkw mit Ottomotor

Material	PKW-Otto-klein-2010-Basis	PKW-Otto-mittel-2010-Basis	PKW-Otto-groß-DE-2010-Basis
	Menge in t	Menge in t	Menge in t
Eisen	95	124	145
Stahl	427	530	608
Hochfeste Stähle	97	127	149
Kupfer	9	12	14
Zink	2	3	3
Nickel	0	0	0
Silizium	0	0	0
Andere Metalle	4	5	6
Platin	0	0	0
Palladium	0	0	0
Rhodium	0	0	0
Blei	7	9	11
Aluminium	70	116	152
Magnesium	2	3	3
PP, PE	115	149	172
PUR, ABS, PET, andere Kunststoffe	55	75	93
Gummi	21	28	32
Öl	6	8	9
Kältemittel	0	1	1
Andere Flüssigkeiten	17	27	41
Glas	22	31	38
Textilien	10	13	16
Andere	28	37	55

Quelle: Zimmer et al. 2009

Tabelle 100: Materialzusammensetzung der Diesel-Pkw

Material	PKW-Diesel-klein- 2010-Basis	PKW-Diesel-mittel- 2010-Basis	PKW-Diesel-groß- DE-2010-Basis
	Menge in kg	Menge in kg	Menge in kg
Eisen	108	147	179
Stahl	444	574	684
Hochfeste Stähle	98	133	163
Kupfer	9	13	16
Zink	2	3	3
Nickel	0	0	0
Silizium	0	0	0
Andere Metalle	4	6	7
Platin	0	0	0
Palladium	0	0	0
Rhodium	0	0	0
Blei	7	10	12
Aluminium	77	131	176
Magnesium	2	3	4
PP, PE	116	157	188
PUR, ABS, PET, andere Kunststoffe	56	79	101
Gummi	22	29	35
Öl	6	8	10
Kältemittel	0	1	1
Andere Flüssigkeiten	17	28	44
Glas	22	33	41
Textilien	10	14	18
Andere	28	38	60

Quelle: Zimmer et al. 2009

Tabelle 101: Materialzusammensetzung der Busse

Material	Linienbus-Diesel-2010-Basis	Reisebus-Diesel-2010-Basis
	Menge in kg	Menge in kg
Stahl, Eisen	6.833	8.697
Aluminium	1.677	2.135
Magnesium	0	0
Blei	91	115
Kupfer	110	140
Nickel	0	0
Kunststoffe	557	709
Glas	493	628
Andere	1.239	1.577

Quelle: Zimmer et al. 2009

Tabelle 102: Materialzusammensetzung der Schwere Nutzfahrzeuge

Material	LKW-Diesel-3,5-7,5t-Solo-2010-Basis	LKW-Diesel-7,5-12t-Solo-2010-Basis	LKW-Diesel->12t-Solo-2010-Basis	LKW-Diesel-40t-Zug-2010-Basis
	Menge in kg	Menge in kg	Menge in kg	Menge in kg
Stahl, Eisen	2.800	3.500	4.338	6.840
Aluminium	509	636	789	1.244
Magnesium	0	0	0	0
Blei	55	69	85	134
Kupfer	13	17	21	33
Nickel	0	0	0	0
Kunststoffe	588	735	911	1.436
Glas	35	43	54	85
Andere	0	0	0	0

Quelle: Zimmer et al. 2009

10.2.4 Sensitivitäten

		Allokationsprinzip					
Bauelemente		Proportional zu verteilende Kosten (linear nach Fahrleistung)	System-spezifische Kosten (Pkw & sonstige)	System-spezifische Kosten (leichte Lkw)	System-spezifische Kosten (schwere Lkw, >12t)	Kapazitäts-abhängige Kosten (Äquivalenz-Ziffern)	Gewichts-abhängige Kosten (AASHO)
Grunderwerb						100	
Erdbau / Entwässerung	Neubau					100	
	Erhalt					100	
Tragschichten	Neubau		x	y	v		
	Erhalt						
Binderschichten	Neubau						
	Erhalt						
Deckschichten	Neubau					100	
	Erhalt						100
Tunnel	Neubau	45			5	50	
	Erhalt	80			20		
Brücken	Neubau				15	85	
	Erhalt				15	85	
Ausrüstung	Neubau	33				67	
	Erhalt	33				67	
Aste, Knoten	Neubau	20	20	10	10	40	
	Erhalt	15			10	40	35
Autobahnmeistereien	Neubau	33				67	
	Erhalt	33				67	
Rastanlagen	Neubau	20	15	5	60		
	Erhalt	20	15	5	60		
Verwaltung, Polizei		33				67	
betrieblicher Unterhalt		35			15	50	

Quelle: [Rommerskirchen et al. 2007]

Bild 42: Verwendete Allokationsmethoden bei der Wegekostenrechnung

Tabelle 103: Angenommene Achslasten und die resultierenden Allokationsschlüssel für die Sensitivitätsberechnung nach AASHO nach Fahrzeugkategorien

Fahrzeugkategorie	angenommene Achslast	Allokationsschlüssel
	t	%
PKW klein	0,6	0,0%
Pkw Mittel	0,725	0,0%
Pkw Groß	0,825	0,0%
Linienbus-Diesel-2010-Basis	6,00	2,4%
Reisebus-Diesel-2010-Basis	6,00	4,3%
LNf-Diesel-2010-Basis	1,00	0,0%
LKW-Diesel-3,5-7,5t-Solo-2010-Basis	2,00	0,1%
LKW-Diesel-7,5-12t-Solo-2010-Basis	3,00	0,1%
LKW-Diesel->12t-Solo-2010-Basis	4,00	1,5%
LKW-Diesel-40t-Zug-2010-Basis	4,00	0,6%
LKW-Diesel-40t-Zug-2010-Basis	5,00	1,1%
LKW-Diesel-40t-Zug-2010-Basis	6,00	89,9%

Quelle: eigene Annahmen und Berechnungen

10.2.5 Detailergebnisse

Tabelle 104: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Straßen

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	6,89	7,37
Linienbus	g/Pkm	6,08	6,51
Reisebus	g/Pkm	4,40	4,71
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	34,84	37,29
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	27,90	29,86
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	18,76	20,08
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	18,18	19,45
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	14,21	15,21
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	13,01	13,93

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 105: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Brücken

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	0,30	0,32
Linienbus	g/Pkm	0,26	0,28
Reisebus	g/Pkm	0,19	0,20
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	1,51	1,60
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	1,21	1,28
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,81	0,86
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,79	0,83
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,62	0,65
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,57	0,60

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 106: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Tunnel

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	0,06	0,06
Linienbus	g/Pkm	0,05	0,05
Reisebus	g/Pkm	0,04	0,04
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,28	0,29
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,23	0,24
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,15	0,16
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,15	0,15
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,12	0,12
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,11	0,11

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 107: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Rast- und Autohöfe

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	0,04	0,05
Linienbus	g/Pkm	0,04	0,04
Reisebus	g/Pkm	0,03	0,03
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,21	0,23
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,17	0,19
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,12	0,13
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,11	0,12
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,09	0,09
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,08	0,09

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 108: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Tankstellen

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	0,14	0,15
Linienbus	g/Pkm	0,07	0,08
Reisebus	g/Pkm	0,03	0,03
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,36	0,37
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,30	0,31
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,20	0,21
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,20	0,21
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,10	0,10
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,08	0,08

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 109: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Werkstätten

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	0,13	0,13
Linienbus	g/Pkm	0,01	0,01
Reisebus	g/Pkm	0,01	0,01
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,19	0,19
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,11	0,12
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,05	0,05
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,05	0,05
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,02	0,03
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,02	0,02

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 110: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Straßenausstattung und -beleuchtung

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Pkw	g/Pkm	0,02	0,02
Linienbus	g/Pkm	0,01	0,02
Reisebus	g/Pkm	0,01	0,01
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,08	0,09
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,07	0,07
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,04	0,05
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,04	0,05
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,03	0,04
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,03	0,03

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 11f: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Straßenbeleuchtung pro Fahrzeugkilometer, Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer für eine Zurechnung von 20 % und 50 % der Gesamtemissionen zum motorisierten Straßenverkehr

	Einheit	Allokation: 20%		Sensitivität: 50%	
		CO ₂	CO ₂ e	CO ₂	CO ₂ e
Insgesamt	g/vkm	0,78	0,82	1,96	2,04
Pkw	g/Pkm	0,52	0,54	1,30	1,36
Linienbus	g/Pkm	0,05	0,06	0,13	0,14
Reisebus	g/Pkm	0,03	0,03	0,07	0,08
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,77	0,80	1,92	2,00
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,46	0,48	1,15	1,20
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,21	0,22	0,52	0,54
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,21	0,22	0,52	0,54
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,10	0,11	0,25	0,26
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,07	0,07	0,17	0,17

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 11g: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Tunnelbetrieb (ohne Beleuchtung) pro Fahrzeugkilometer, Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Insgesamt	g/vkm	0,05	0,06
Pkw	g/Pkm	0,04	0,04
Linienbus	g/Pkm	0,00	0,00
Reisebus	g/Pkm	0,00	0,00
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,05	0,06
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,03	0,03
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,01	0,02
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,01	0,02
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,01	0,01
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,00	0,00

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 113: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Lichtzeichenanlagen pro Fahrzeugkilometer, Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer

	Einheit	CO ₂	CO ₂ e
Insgesamt	g/vkm	0,37	0,39
Pkw	g/Pkm	0,25	0,26
Linienbus	g/Pkm	0,03	0,03
Reisebus	g/Pkm	0,01	0,01
Solo-Lkw 3,5 - 7,5 t	g/tkm	0,36	0,38
Solo-Lkw 7,5 - 12 t	g/tkm	0,22	0,23
Solo-Lkw > 12 t	g/tkm	0,10	0,10
Last- und Sattelzug <= 28 t	g/tkm	0,10	0,10
Last- und Sattelzug 28 - 34 t	g/tkm	0,05	0,05
Last- und Sattelzug 34 - 40 t	g/tkm	0,03	0,03

Quelle: eigene Berechnungen

10.3 Luftverkehr

10.3.1 Infrastruktur

Tabelle 114: Fläche und Ausführung der Start- und Landebahnen der ausgewählten Flughäfen

	SLB 1		SLB 2		SLB 3	
	Fläche m ²	Ausführung	Fläche m ²	Ausführung	Fläche m ²	Ausführung
Berlin-Schönefeld	135.000	Asphalt	121.950	Beton		
Berlin-Tegel	139.058	Asphalt	111.688	Asphalt		
Bremen	91.800	Asphalt	16.100	Asphalt		
Dortmund	90.000	Asphalt / Antiskid				
Dresden	127.908	Beton				
Düsseldorf	135.000	Asphalt	121.500	Beton		
Erfurt	130.000	Asphalt / Antiskid				
Frankfurt/Main	240.000	Beton	180.000	Beton	180.000	Beton
Friedrichshafen	106.020	Asphalt / Antiskid				
Hahn	137.025	Beton				
Hamburg	146.250	Asphalt / Beton	168.636	Asphalt / Beton		
Hannover	105.300	Beton	171.000	Beton	17.940	Asphalt
Karlsruhe	134.235	Asphalt / Beton				
Köln/Bonn	228.900	Asphalt	83.835	Beton	110.655	Beton
Leipzig/Halle	162.000	Beton	127.500	Beton		
Lübeck	126.120	Asphalt				
Memmingen	89.430	Asphalt				
München	240.000	Beton	240.000	Beton		
Münster/Osnabrück	97.650	Asphalt				
Niederrhein	109.800	Asphalt / Beton				
Nürnberg	121.500	Asphalt / Beton				
Paderborn/Lippstadt	98.100	Asphalt				
Rostock-Laage	112.500	Beton				

	SLB 1		SLB 2		SLB 3	
	Fläche m ²	Ausführung	Fläche m ²	Ausführung	Fläche m ²	Ausführung

Saarbrücken	90.000	Asphalt				
Stuttgart	150.525	Beton				
Zweibrücken	132.750	Asphalt				

Quelle: [Airports 2012]

Tabelle 115: Ergebnisse der Abschätzung zu den Deckschichttypen des Vorfelds bzw. Flugbetriebsflächen

	Beton	Asphalt
	%	%
Berlin-Schönefeld	50%	50%
Berlin-Tegel	50%	50%
Bremen	100%	0%
Dortmund	25%	75%
Dresden	100%	0%
Düsseldorf	75%	25%
Erfurt	100%	0%
Frankfurt/Main	75%	25%
Friedrichshafen	100%	0%
Hahn	100%	0%
Hamburg	50%	50%
Hannover	100%	0%
Karlsruhe	75%	25%
Köln/Bonn	100%	0%
Leipzig/Halle	100%	0%
Lübeck	25%	75%
Memmingen	75%	25%
München	75%	25%
Münster/Osnabrück	50%	50%
Niederrhein	50%	50%
Nürnberg	75%	25%
Paderborn/Lippstadt	0%	100%

Rostock-Laage	100%	0%
Saarbrücken	100%	0%
Stuttgart	100%	0%
Zweibrücken	50%	50%

Quelle: eigene Abschätzungen des Öko-Instituts

10.3.2 Verkehrsleistung

Tabelle 116: Gewerblicher Luftverkehr auf ausgewählten Flugplätzen im Jahr 2008

	Starts und Landungen	Ein- und Aussteiger	Fracht Ein- und Ausladung
	1000	1000	1000 t
Berlin-Schönefeld	60,0	6.616	4,1
Berlin-Tegel	154,4	14.454	17
Bremen	37,9	2.477	0,8
Dortmund	27,4	2.299	0,2
Dresden	29,5	1.821	0,3
Düsseldorf	224,8	18.104	70
Erfurt	11,8	298	2
Frankfurt/Main	478,1	53.189	2.014,9
Friedrichshafen	14,0	618	0
Hahn	33,6	3.885	122,1
Hamburg	151,0	12.782	34,7
Hannover	72,3	5.570	6,3
Karlsruhe	25,4	1.133	2,7
Köln/Bonn	128,5	10.298	568,7
Leipzig/Halle	54,7	1.980	430,2
Lübeck	7,1	529	0
Memmingen	7,9	460	0
München	412,4	34.402	247,2
Münster/Osnabrück	27,8	1.522	0,1
Niederrhein	12,0	1.519	0,1
Nürnberg	59,8	4.230	10,3
Paderborn/Lippstadt	13,3	1.117	0,1
Rostock-Laage	2,9	151	1
Saarbrücken	14,1	448	0

Stuttgart	141,6	9.877	18,6
Zweibrücken	16,3	305	0,1
Insgesamt¹⁾	2.218,6	190.084	3.551,5

1) Ohne Berlin-Tempelhof

Quelle: [Destatis 2009a]

10.3.3 Herstellung von Flugzeugen

Tabelle 117: Anteil der verschiedenen Flugzeugkategorien an den Starts und der Verkehrsleistung im Jahr 2008

	Nationale Flüge			Internationale Flüge		
	Starts	Passagiere (Pkm) ¹⁾	Fracht und Post (tkm) ¹⁾	Starts	Passagiere (Pkm) ¹⁾	Fracht und Post (tkm) ¹⁾
	%	%	%	%	%	%
Kleinere Flz. bis 14t	19%	1%	2%	2%	0%	0%
Prop.- und Strahltrieb.Flz. 14-20t	3%	1%	3%	3%	0%	0%
Prop.Flz. 20-75t	4%	1%	5%	5%	0%	0%
Prop.Flz. über 75t	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Strahltrieb.Flz. 20-75t	65%	81%	68%	71%	35%	1%
Strahltrieb.Flz. (Boeing) 75-175t	1%	0%	4%	3%	4%	2%
Strahltrieb.Flz. (Airbus/Sonst.) 75-175t	8%	15%	8%	5%	4%	4%
Strahltrieb.Flz. über 175t	0%	0%	10%	10%	56%	93%
Insgesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%

1) Verkehrsleistung rechnerisch bestimmt aus der Anzahl der Passagiere bzw. Menge Fracht und dem arithmetischem Mittel der Entfernungskategorie.

Quelle: [Destatis 2009b]; eigene Berechnungen

Tabelle 118: Betriebsleergewicht und Materialmengen der verschiedenen Flugzeugkategorien

	Betriebsleergewicht (OWE)	Aluminium	Glasfaser-verstärkter Kunststoff	Kohlenstoff-faserverstärkter Kunststoff	Nickel	Stahl	Titan	Kunststoff
	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen
A330-200	128	74,0	1,1	9,9	3,0	20,8	8,3	10,9
Passagierflugzeug (Inland)	43	24,9	0,4	3,3	1,0	7,0	2,8	3,7
Passagierflugzeug	179	103,5	1,5	13,9	4,2	29,1	11,6	15,2

(GrÜb ¹⁾)								
Frachtflugzeug (Inland)	79	45,7	0,7	6,1	1,9	12,8	5,1	6,7
Frachtflugzeug (GrÜb)	113	65,3	1,0	8,8	2,7	18,3	7,3	9,6

1) Flugzeuge für grenzüberschreitend Flüge

Quellen: [Lopes 2010]; [Aerosup 2012]; [Skyplan 2012]; [Boeing 2012]; eigene Berechnungen

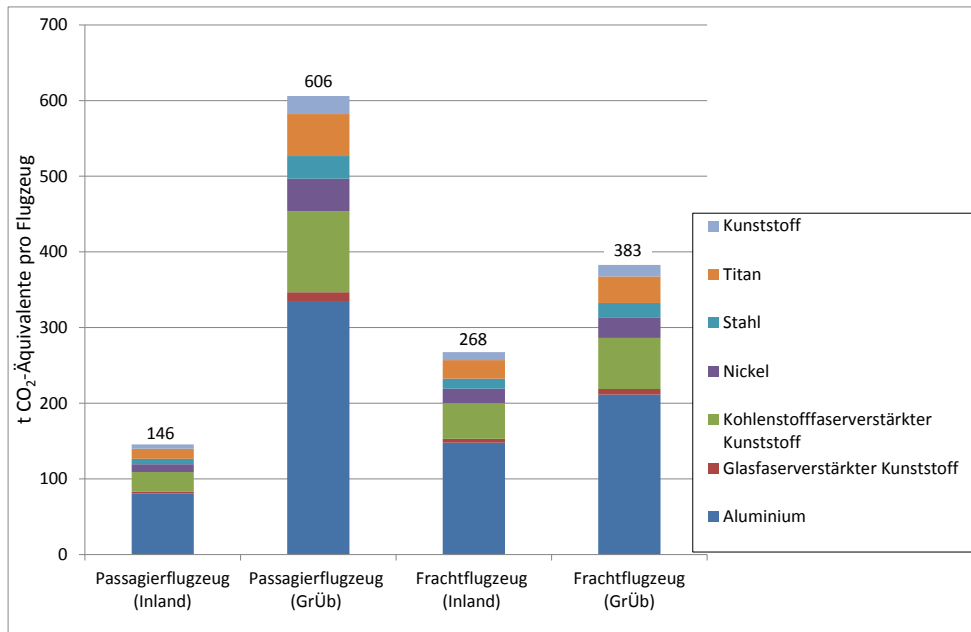


Bild 43: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Flugzeuherstellung in t pro Flugzeug [eigene Berechnungen]

10.3.4 CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen des Flugbetriebs

Tabelle 119: Spezifische CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen des Flugbetriebs für die Passage und Fracht differenziert nach Entfernungskategorie mit und ohne Berücksichtigung eines EWF

Entfernungskategorie		Passage			Fracht		
		CO ₂	CO ₂ e	CO ₂ e + EWF ¹⁾	CO ₂	CO ₂ e	CO ₂ e + EWF ¹⁾
		g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/tkm	g/tkm	g/tkm
national	<=00500km	243,0	246,7	246,7	2.105,2	2.137,0	2.137,0
	>00500-01000km	197,8	200,7	233,6	1.975,1	2.004,2	2.316,0
International	<=00500km	304,5	308,7	308,7	2.104,0	2.132,6	2.132,6
	>00500-01000km	205,3	208,1	302,3	1.585,4	1.606,9	2.271,5
	>01000-02000km	129,5	131,3	241,3	1.128,5	1.143,7	2.106,8
	>02000-05000km	98,6	99,9	201,6	785,5	796,2	1.640,5

>05000-10000km	106,0	107,5	229,0	881,2	893,1	1.902,8
>10000	110,7	112,2	243,0	991,2	1.004,6	2.176,0

1) EWF von 2,4

Quelle: [TREMODO 5.25]; eigene Berechnungen

Tabelle 120: Spezifische direkte CO₂- Emissionen (mit und ohne Berücksichtigung eines EWF) des Flugbetriebs für die Passage und Fracht sowie EWF-Aufschlag differenziert nach Entfernungskategorie

Entfernungskategorie	Passage			Fracht			
	CO ₂ (direkt)	CO ₂ ewf ¹⁾	EWF Aufschlag	CO ₂ (direkt)	CO ₂ ewf ¹⁾	EWF Aufschlag	
	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/tkm	g/tkm	g/tkm	
national	<=00500km	213,8	213,8	0,0	1.853,5	1.853,5	0,0
	>00500-01000km	174,1	207,1	32,9	1.739,2	2.051,0	311,8
International	<=00500km	268,1	268,1	0,0	1.852,7	1.853	0,0
	>00500-01000km	180,7	275,0	94,3	1.395,5	2.060	664,6
	>01000-02000km	114,0	224,1	110,0	993,6	1.957	963,1
	>02000-05000km	86,8	188,5	101,7	691,7	1.536	844,4
	>05000-10000km	93,4	214,9	121,6	775,9	1.786	1.009,7
	>10000	97,5	228,3	130,8	872,8	2.044	1.171,4

1) EWF von 2,4

Quelle: [TREMODO 5.25]; eigene Berechnungen

10.3.5 Detailergebnisse

Personenverkehr

Tabelle 121: Spezifische CO₂-Emissionen für die Passage im Flugverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge

Entfernungskategorie	CO ₂				
	Flugbetrieb	Bau/Unterhalt Infrastruktur	Betrieb Infrastruktur	Bau/Unterhalt Flugzeuge	Insgesamt
	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm
Innerdeutsche Flüge	230,2	6,6	18,9	0,02	255,8
bis 500 km	243,0	7,2	20,6	0,02	270,9
größer 500 km	197,8	5,0	14,3	0,02	217,1
Grenzüberschreitende Flüge	119,5	0,9	2,7	0,02	123,1
bis 500 km	304,5	7,4	21,1	0,02	333,0
größer 500 bis 1.000 km	205,3	3,8	10,7	0,02	219,8
größer 1.000 bis 2.000 km	129,5	1,9	5,5	0,02	136,9
größer 2.000 bis 5.000 km	98,6	0,8	2,4	0,02	101,8
größer 5.000 bis 10.000 km	106,0	0,4	1,0	0,02	107,5
größer 10.000 km	110,7	0,2	0,7	0,02	111,6
Insgesamt	125,7	1,2	3,3	0,02	130,2
	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %
Innerdeutsche Flüge	90%	3%	7%	0%	100%
bis 500 km	90%	3%	8%	0%	100%
größer 500 km	91%	2%	7%	0%	100%
Grenzüberschreitende Flüge	97%	1%	2%	0%	100%
bis 500 km	91%	2%	6%	0%	100%
größer 500 bis 1.000 km	93%	2%	5%	0%	100%
größer 1.000 bis 2.000 km	95%	1%	4%	0%	100%
größer 2.000 bis 5.000 km	97%	1%	2%	0%	100%
größer 5.000 bis 10.000 km	99%	0%	1%	0%	100%
größer 10.000 km	99%	0%	1%	0%	100%
Insgesamt	97%	1%	3%	0%	100%

Quellen: [TREMODO 5.25]; eigene Berechnungen

Tabelle 122: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen für die Passage im Flugverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge

Entfernungskategorie	CO ₂ -Äquivalente				
	Flugbetrieb	Bau/Unterhalt Infrastruktur	Betrieb Infrastruktur	Bau/Unterhalt Flugzeuge	Insgesamt
	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm
Innerdeutsche Flüge	233,7	6,9	19,9	0,02	260,5
bis 500 km	246,7	7,5	21,8	0,02	276,0
größer 500 km	200,7	5,2	15,1	0,02	221,1
Grenzüberschreitende Flüge	121,1	1,0	2,8	0,02	124,9
bis 500 km	308,7	7,7	22,3	0,02	338,6
größer 500 bis 1.000 km	208,1	3,9	11,3	0,02	223,3
größer 1.000 bis 2.000 km	131,3	2,0	5,8	0,02	139,1
größer 2.000 bis 5.000 km	99,9	0,9	2,5	0,02	103,3
größer 5.000 bis 10.000 km	107,5	0,4	1,1	0,02	109,0
größer 10.000 km	112,2	0,2	0,7	0,02	113,2
Insgesamt	127,4	1,2	3,5	0,02	132,2
	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %
Innerdeutsche Flüge	90%	3%	8%	0%	100%
bis 500 km	89%	3%	8%	0%	100%
größer 500 km	91%	2%	7%	0%	100%
Grenzüberschreitende Flüge	97%	1%	2%	0%	100%
bis 500 km	91%	2%	7%	0%	100%
größer 500 bis 1.000 km	93%	2%	5%	0%	100%
größer 1.000 bis 2.000 km	94%	1%	4%	0%	100%
größer 2.000 bis 5.000 km	97%	1%	2%	0%	100%
größer 5.000 bis 10.000 km	99%	0%	1%	0%	100%
größer 10.000 km	99%	0%	1%	0%	100%
Insgesamt	96%	1%	3%	0%	100%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

Tabelle 123: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen für die Passage im Flugverkehr in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge unter Berücksichtigung eines EWF von 2,4

Entfernungskategorie	CO ₂ -Äquivalente + EWF				
	Flugbetrieb	Bau/Unterhalt Infrastruktur	Betrieb Infrastruktur	Bau/Unterhalt Flugzeuge	Insgesamt
	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm
Innerdeutsche Flüge	243,0	6,9	19,9	0,02	269,9
bis 500 km	246,7	7,5	21,8	0,02	276,0
größer 500 km	233,6	5,2	15,1	0,02	254,0
Grenzüberschreitende Flüge	233,2	1,0	2,8	0,02	237,0
bis 500 km	308,7	7,7	22,3	0,02	338,6
größer 500 bis 1.000 km	302,3	3,9	11,3	0,02	317,6
größer 1.000 bis 2.000 km	241,3	2,0	5,8	0,02	249,1
größer 2.000 bis 5.000 km	201,6	0,9	2,5	0,02	205,0
größer 5.000 bis 10.000 km	229,0	0,4	1,1	0,02	230,6
größer 10.000 km	243,0	0,2	0,7	0,02	244,0
Insgesamt	233,7	1,2	3,5	0,02	238,5
	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %
Innerdeutsche Flüge	90%	3%	7%	0%	100%
bis 500 km	89%	3%	8%	0%	100%
größer 500 km	92%	2%	6%	0%	100%
Grenzüberschreitende Flüge	98%	0%	1%	0%	100%
bis 500 km	91%	2%	7%	0%	100%
größer 500 bis 1.000 km	95%	1%	4%	0%	100%
größer 1.000 bis 2.000 km	97%	1%	2%	0%	100%
größer 2.000 bis 5.000 km	98%	0%	1%	0%	100%
größer 5.000 bis 10.000 km	99%	0%	0%	0%	100%
größer 10.000 km	100%	0%	0%	0%	100%
Insgesamt	98%	1%	1%	0%	100%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

Güterverkehr

Tabelle 124: Spezifische CO₂-Emissionen für die Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge

Entfernungskategorie	CO ₂				
	Flugbetrieb	Bau/Unterhalt Infrastruktur	Betrieb Infrastruktur	Bau/Unterhalt Flugzeuge	Insgesamt
	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm
Innerdeutsche Flüge	2.097,2	66,3	188,7	0,21	2.352,4
bis 500 km	2.105,2	72,3	205,8	0,21	2.383,5
größer 500 km	1.975,1	50,3	143,1	0,21	2.168,8
Grenzüberschreitende Flüge	895,1	9,4	26,8	0,18	931,5
bis 500 km	2.104,0	74,0	210,6	0,18	2.388,8
größer 500 bis 1.000 km	1.585,4	37,7	107,1	0,18	1.730,3
größer 1.000 bis 2.000 km	1.128,5	19,3	54,9	0,18	1.202,9
größer 2.000 bis 5.000 km	785,5	8,4	23,8	0,18	817,8
größer 5.000 bis 10.000 km	881,2	3,7	10,4	0,18	895,4
größer 10.000 km	991,2	2,4	6,8	0,18	1.000,6
Insgesamt	902,2	11,7	33,3	0,17	947,4
	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %
Innerdeutsche Flüge	89%	3%	8%	0%	100%
bis 500 km	88%	3%	9%	0%	100%
größer 500 km	91%	2%	7%	0%	100%
Grenzüberschreitende Flüge	96%	1%	3%	0%	100%
bis 500 km	88%	3%	9%	0%	100%
größer 500 bis 1.000 km	92%	2%	6%	0%	100%
größer 1.000 bis 2.000 km	94%	2%	5%	0%	100%
größer 2.000 bis 5.000 km	96%	1%	3%	0%	100%
größer 5.000 bis 10.000 km	98%	0%	1%	0%	100%
größer 10.000 km	99%	0%	1%	0%	100%
Insgesamt	95%	1%	4%	0%	100%

Quellen: [TREMODO 5.25]; eigene Berechnungen

Tabelle 125: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen für die Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge

Entfernungskategorie	CO ₂ -Äquivalente				
	Flugbetrieb	Bau/Unterhalt Infrastruktur	Betrieb Infrastruktur	Bau/Unterhalt Flugzeuge	Insgesamt
	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm
Innerdeutsche Flüge	2.128,8	68,9	199,5	0,23	2.397,4
bis 500 km	2.137,0	75,2	217,5	0,23	2.429,9
größer 500 km	2.004,2	52,3	151,3	0,23	2.208,0
Grenzüberschreitende Flüge	907,2	9,8	28,3	0,19	945,5
bis 500 km	2.132,6	76,9	222,6	0,19	2.432,3
größer 500 bis 1.000 km	1.606,9	39,1	113,2	0,19	1.759,4
größer 1.000 bis 2.000 km	1.143,7	20,1	58,1	0,19	1.222,1
größer 2.000 bis 5.000 km	796,2	8,7	25,1	0,19	830,2
größer 5.000 bis 10.000 km	893,1	3,8	11,0	0,19	908,0
größer 10.000 km	1.004,6	2,5	7,2	0,19	1.014,5
Insgesamt	914,4	12,2	35,2	0,19	962,0
	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %
Innerdeutsche Flüge	89%	3%	8%	0%	100%
bis 500 km	88%	3%	9%	0%	100%
größer 500 km	91%	2%	7%	0%	100%
Grenzüberschreitende Flüge	96%	1%	3%	0%	100%
bis 500 km	88%	3%	9%	0%	100%
größer 500 bis 1.000 km	91%	2%	6%	0%	100%
größer 1.000 bis 2.000 km	94%	2%	5%	0%	100%
größer 2.000 bis 5.000 km	96%	1%	3%	0%	100%
größer 5.000 bis 10.000 km	98%	0%	1%	0%	100%
größer 10.000 km	99%	0%	1%	0%	100%
Insgesamt	95%	1%	4%	0%	100%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

Tabelle 126: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen für die Luftfracht in Deutschland im Jahr 2008 unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge unter Berücksichtigung eines EWF von 2,4

Entfernungskategorie	CO ₂ -Äquivalente + EWF				
	Flugbetrieb	Bau/Unterhalt Infrastruktur	Betrieb Infrastruktur	Bau/Unterhalt Flugzeuge	Insgesamt
	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm	g/Pkm
Innerdeutsche Flüge	2.148,0	68,9	199,5	0,23	2.416,6
bis 500 km	2.137,0	75,2	217,5	0,23	2.429,9
größer 500 km	2.316,0	52,3	151,3	0,23	2.519,8
Grenzüberschreitende Flüge	1.874,6	9,8	28,3	0,19	1.912,9
bis 500 km	2.132,6	76,9	222,6	0,19	2.432,3
größer 500 bis 1.000 km	2.271,5	39,1	113,2	0,19	2.424,1
größer 1.000 bis 2.000 km	2.106,8	20,1	58,1	0,19	2.185,2
größer 2.000 bis 5.000 km	1.640,5	8,7	25,1	0,19	1.674,5
größer 5.000 bis 10.000 km	1.902,8	3,8	11,0	0,19	1.917,8
größer 10.000 km	2.176,0	2,5	7,2	0,19	2.185,9
Insgesamt	1.876,2	12,2	35,2	0,19	1.923,8
	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %
Innerdeutsche Flüge	89%	3%	8%	0%	100%
bis 500 km	88%	3%	9%	0%	100%
größer 500 km	92%	2%	6%	0%	100%
Grenzüberschreitende Flüge	98%	1%	1%	0%	100%
bis 500 km	88%	3%	9%	0%	100%
größer 500 bis 1.000 km	94%	2%	5%	0%	100%
größer 1.000 bis 2.000 km	96%	1%	3%	0%	100%
größer 2.000 bis 5.000 km	98%	1%	2%	0%	100%
größer 5.000 bis 10.000 km	99%	0%	1%	0%	100%
größer 10.000 km	100%	0%	0%	0%	100%
Insgesamt	98%	1%	2%	0%	100%

Quellen: [TREM0D 5.25]; eigene Berechnungen

10.4 Binnenschifffahrt

10.4.1 Infrastruktur

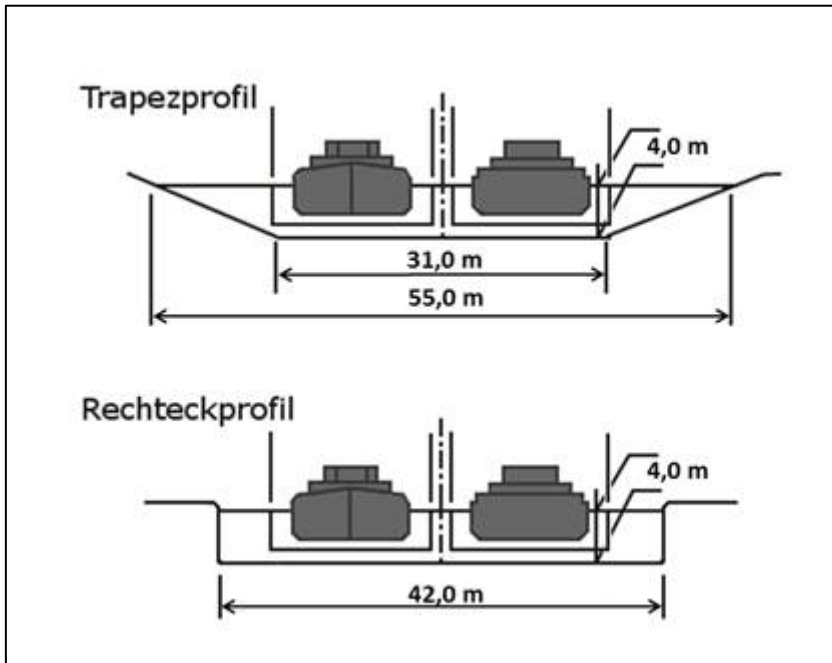


Bild 44: Abmessungen der Regelprofile für den Kanalbau nach [Strobl 2006]

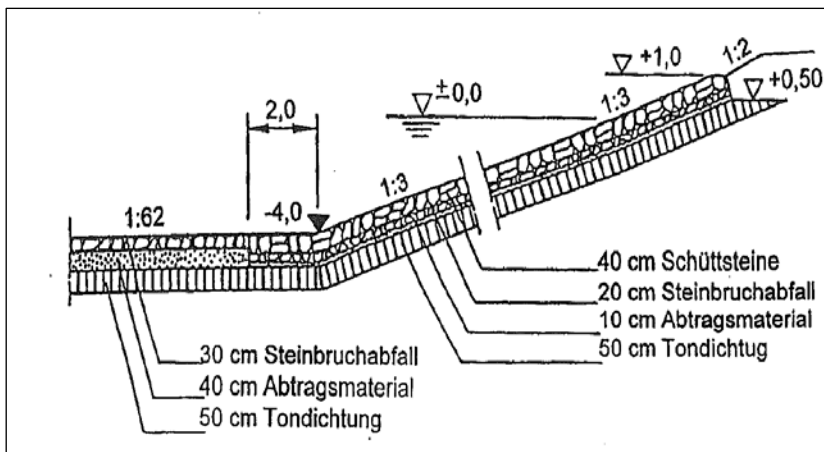


Bild 45: Auskleidung von Schiffahrtskanälen mit Tondichtung [Lattermann 2010]

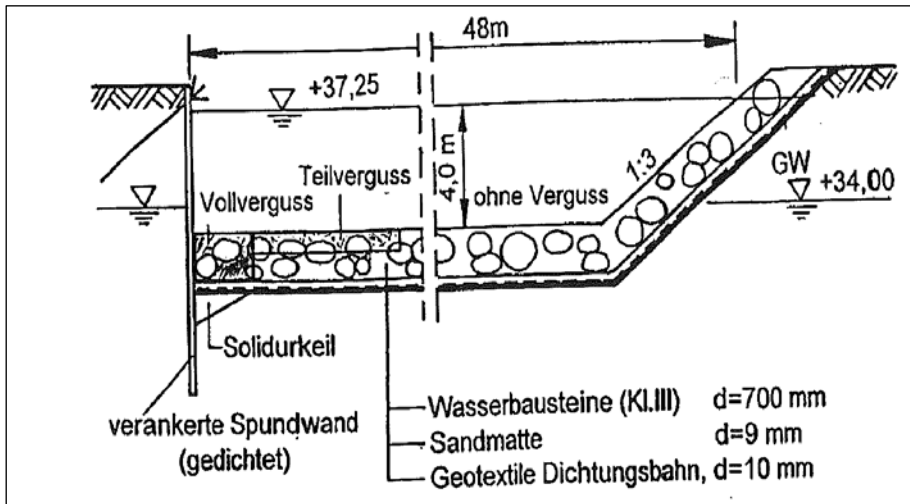


Bild 46: Auskleidung von Schifffahrtskanälen mit geosynthetischer Dichtungsbahn [Lattermann 2010]

Tabelle 127: Annahmen zu den Transportentfernungen und Transportmitteln der Materialtransporte bei Bau und Unterhalt der Binnenschifffahrtsinfrastruktur

	Transportentfernung	Transportmittel
	km	
Sand & Kies	200	Binnenschiff
Schotter & Splitt	200	Binnenschiff
Schüttsteine, Wasserbausteine	200	Binnenschiff
Schlacke, Grandgeröll	200	Binnenschiff
Steinbruchabfall	200	Binnenschiff
Ton	200	Binnenschiff
Bewehrungsstahl	300	Bahn
Stahlspundwand	300	Bahn
Konstruktionsstahl	300	Bahn
Mastixverguss	20	LKW 26t
Asphaltbeton	20	LKW 26t
Bitumensand	20	LKW 26t
Beton	20	LKW 26t
Vlies	300	LKW 26t
PVC Folie	300	LKW 26t
Geotextilien	300	LKW 26t
Erdbewegungen	5	LKW 26t

Quelle: Annahmen des Öko-Instituts.

Tabelle 128: CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Jahr durch Bau der Binneninfrastruktur in Deutschland

	CO ₂ -Emissionen			
	Material- verbräuche	Material- transporte	Baustellen- energie	Insgesamt
	t/a	t/a	t/a	t/a
Uferbefestigung	91.948	3.618		95.567
Kanäle	28.610	15.533	2.658	46.801
Schleusen	251.052	18.386	3.043	272.480
Kanalbrücken	4.248	47		4.295
Binnenhäfen	43.723	2.500		46.224
Insgesamt	419.581	40.084	5.701	465.366
	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen			
	Material- verbräuche	Material- transporte	Baustellen- energie	Insgesamt
	t/a	t/a	t/a	t/a
Uferbefestigung	99.209	3.664		102.873
Kanäle	29.388	15.625	2.704	47.716
Schleusen	265.490	18.598	3.095	287.183
Kanalbrücken	4.538	48		4.587
Binnenhäfen	46.255	2.580		48.835
Insgesamt	444.880	40.515	5.798	491.193

Quelle: eigene Berechnungen

10.5 Schienenverkehr

10.5.1 Bau/Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur

Tabelle 129: Verbrauch an Kies-Sand für Bau und Unterhalt der Planumsschicht, differenziert nach Neubaustrecken und übrigen Strecken

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
Eingleisige Strecke					
- Neubaustrecke	t	9.632	160,5	0,0	160,5
- Übrigen Strecken	t	7.392	123,2	0,0	123,2
Zweigleisige Strecken					
- Neubaustrecke	t	14.896	248,3	0,0	248,3
- Übrigen Strecken	t	12.320	205,3	0,0	205,3

Quellen: [Fiedler 2005]; [Köser et al. 2002]; eigene Berechnungen

Tabelle 130: Stahlverbrauch für Bau und Unterhalt der Schienen, differenziert nach Schientypen

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
Eingleisige Strecke					
- Schiene S 49	t	98,9	3,30	0,02	3,32
- Schiene S 54	t	109,1	3,64	0,03	3,66
- Schiene UIC 60	t	120,7	4,02	0,03	4,05
Zweigleisige Strecken					
- Schiene S 49	t	197,7	6,59	0,05	6,64
- Schiene S 54	t	218,2	7,27	0,05	7,33
- Schiene UIC 60	t	241,4	8,05	0,06	8,11

Quellen: [Werner 2008]; [Köser et al. 2002]; [ThyssenKrupp 2006]; eigene Berechnungen

Tabelle 131: Materialaufwand für Bau und Unterhalt von Schwellen mit Schotterbett, differenziert nach Schwellentyp

Schwellentyp	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
Eingleisige Strecke					
- Betonschwelle m. Schotter					
Schotterbett	t	3.572,9	238,2	3,6	241,8
Beton	m ³	190,0	5,4	0,1	5,5
Stahl	t	11,7	0,3	0,0	0,3
Eisenteile	t	7,7	0,2	0,0	0,2
Kunststoffteile (PE)	t	2,0	0,1	0,0	0,1
- Holzschwelle m. Schotter					
Schotterbett	t	3.030,4	202,0	3,0	205,1
Holz	m ³	375,0	12,5	0,1	12,6
Imprägnieröl	t	23,4	0,8	0,0	0,8
Eisenteile	t	43,2	1,4	0,0	1,5
Kunststoffteile (PE)	t	0,4	0,0	0,0	0,0
- Stahlschwelle m. Schotter					
Schotterbett	t	2.319,2	154,6	2,3	156,9
Stahl	t	118,9	4,0	0,1	4,0
Eisenteile	t	9,1	0,3	0,0	0,3
Kunststoffteile (PE)	t	0,4	0,0	0,0	0,0
Zweigleisige Strecke					
- Betonschwelle m. Schotter					
Schotterbett	t	7.099,2	473,3	7,1	480,4
Beton	m ³	380,0	10,9	0,1	11,0
Stahl	t	23,3	0,7	0,0	0,7
Eisenteile	t	15,3	0,4	0,0	0,4
Kunststoffteile (PE)	t	4,0	0,1	0,0	0,1

Schwellentyp	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
- Holzschwelle m. Schotter					
Schotterbett	t	6.140,9	409,4	6,1	415,5
Holz	m ³	750,0	25,0	0,2	25,2
Imprägnieröl	t	46,8	1,6	0,0	1,6
Eisenteile	t	86,4	2,9	0,0	2,9
Kunststoffteile (PE)	t	0,9	0,0	0,0	0,0
- Stahlschwelle m. Schotter					
Schotterbett	t	4.906,7	327,1	4,9	332,0
Stahl	t	237,8	7,9	0,1	8,0
Eisenteile	t	18,3	0,6	0,0	0,6
Kunststoffteile (PE)	t	0,9	0,0	0,0	0,0

Quellen: [Werner 2008]; [Köser et al. 2002]; [ThyssenKrupp 2006]; Bettungsquerschnittsberechnungstool der DB AG; eigene Berechnungen

Tabelle 132: Beton und Stahl für Bau und Unterhalt der Festen Fahrbahn

Schwellentyp	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
Eingleisige Strecke					
- Beton	m ³	1.132	18,9	3,3	22,2
-Bewehrungsstahl	t	66	1,1	0,2	1,3
Zweigleisige Strecke					
- Beton	m ³	2.264	37,7	6,6	44,4
-Bewehrungsstahl	t	133	2,2	0,4	2,6

Quellen: [Ohne Autor 2002]; [Kirchner 2005]; [Köser et al. 2002]; eigene Berechnungen

Die in Tabelle 133 fett gedruckten Materialmengen sind bei den Brücken in die Berechnungen eingeflossen.

Tabelle 133: Menge an Stahl und Beton zum Bau verschiedener zweigleisiger Eisenbahn-Talbrücken an den NBS Hannover-Würzburg, Köln-Rhein/Main, Mannheim-Stuttgart und Nürnberg-Erfurt sowie die Menge an Erdaushub

	Länge	Höhe	Betonmenge		Stahlmenge		Erdaushub	
	m	m	m ³	m ³ /m	t	t/m	m ³	m ³ /m
Weißbrunn am Forst	614		17.500	28,5	2.100	3,42	17.500	28,50
Oelzetalbrücke	370		13.200	35,7	1.300	3,51	12.500	33,78
Talbrücke Dasbach	218	20	4.550	20,9	719	3,30		
Mainbrücke Eddersheim	324	20	12.600	38,9	1.830	5,65		
Logebachtalbrücke	173	22	4.100	23,7	550	3,18		
Fuldatalbrücke Solms	1.628	29	46.000	28,3	4.460	2,74	22.800	14,00
Talbrücke Fischerhaus	344	34	7.770	22,6	920	2,67		
Hallerbachtalbrücke	992	34	17.320	17,5	2.930	2,95		
Füllbachtalbrücke	1.012	40	32.500	32,1	4.850	4,79	22.800	22,53
Ilmtalbrücke	1.681	48	64.000	38,1	7.500	4,46	44.000	26,17
Glemstalbrücke	348	50	12.000	34,5	1.500	4,31		
Wiedtalbrücke	387	53	11.000	28,4	2.800	7,24		
Truckenthalbrücke	425	55	14.000	32,9	1.455	3,42		
Grümpentalbrücke	1.104	71	48.700	44,1	6.000	5,43	65.000	58,88
Fuldatalbrücke Morschen	1.450	75	70.000	48,3	9.100	6,28	15.000	10,34
Mittelwert	738	42	25.016	31,6	3.201	4,22	28.514	27,75
Median	425	40	14.000	32,1	2.100	3,51	22.800	26,17
Minimum	173	20	4.100	17,5	550	2,67	12.500	10,34
Maximum	1.681	75	70.000	48,3	9.100	7,24	65.000	58,88

Quelle: Internetrecherchen des Öko-Instituts.³¹

³¹ Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>, www.arge-nbs.de und www.baustellen-doku.info.

Tabelle 134: Betonverbrauch für den Überbau verschiedener zweigleisiger Talbrücken an der NBS Nürnberg-Erfurt

	Länge	Betonmenge	
	m	m ³	m ³ /m
Oelzetalbrücke	370	4.700	12,7
Truckenthalbrücke	425	5.500	12,9
Grümpentalbrücke	1104	14.700	13,3
Weißbrunn am Forst	614	9.000	14,7
Ilmtalbrücke	1681	25.000	14,9
Füllbachtalbrücke	1012	15.700	15,5
Mittelwert	868	12.433	14,0
Median	813	11.850	14,0
Minimum	370	4.700	12,7
Maximum	1.681	25.000	15,5

Quelle: Internetrecherchen des Öko-Instituts.³²

Für den verwendeten Stahl lagen keine Angaben vor. Es wurde daher angenommen, dass der Stahlanteil pro Kubikmeter Beton, der für die Talbrücken ermittelt wurde, auch für diese Brückenart gilt. Demnach werden rund 1,5 t Stahl pro laufenden Meter verbaut.

Tabelle 135: Stahlmengen für ausgewählte Stahl-Eisenbahnbrücken in Deutschland

	Länge	Breite	Stahlmenge		
	m	m	t	t/m	t/m ³
Rendsburger Hochbrücke	2.486	9,0	17.740	7,1	0,8
Hochbrücke Hochdonn	2.218	10,5	14.745	6,6	0,6
Müngstener Brücke	465	14,0	4.978	10,7	0,8
Grünentaler Hochbrücke	405	18,3	3.500	8,6	0,5
Hammer Eisenbahnbrücke	814	26,5	9.000	11,1	0,4
Mittelwert	1.278	15,7	9.993	8,8	0,6
Median	814	14,0	9.000	8,6	0,6
Minimum	405	9,0	3.500	6,6	0,4
Maximum	2.486	26,5	17.740	11,1	0,8

Quelle: Internetrecherchen des Öko-Instituts.³³

³² Recherchen auf der Internetseite www.baustellen-doku.info.

Tabelle 136: Menge an Stahl und Beton zum Bau ausgewählter zweigleisiger Eisenbahntunnel in überwiegend bergmännischer Bauweise sowie die Menge des Ausbruchs in Deutschland

	Länge	Anteil berg. B.	Betonverbrauch		Stahlverbrauch		Ausbruch	
	m	in %	m ³	m ³ /m	t	t/m	Mill. m ³	m ³ /m
Mündener Tunnel	10.525		340.000	32,3	14.000	1,3	1,210	115,0
Neuer Mainzer Tunnel	1.250	100%	58.600	46,9	3.850	3,1	0,174	139,0
Hohe-Wart-Tunnel	872	97%	21.215	24,3	200	0,2	0,097	111,6
Kalbachtunnel	1.298	97%	32.970	25,4	208	0,2	0,149	114,9
Eggetunnel	2.888	97%	230.000	79,6	20.000	6,9	0,400	138,5
Hanfgartentunnel	884	96%	9.735	11,0	154	0,2	0,042	47,5
Tunnel Limburg	2.395	95%	156.400	65,3	8.000	3,3	0,350	146,1
Tunnel Günterscheid	1.130	94%	42.800	37,9	k. A.	k. A.	0,159	140,7
Hellebergtunnel	1.641	93%	85.000	51,8	2.900	1,8	0,365	222,4
Ramholtunnel	474	93%	30.000	63,3	1.100	2,3	k. A.	k. A.
Aegidienberg-Tunnel	1.240	89%	50.000	40,3	k. A.	k. A.	0,166	133,7
Escherbergtunnel	3.687	82%	102.000	27,7	5.600	1,5	0,450	122,1
Dernbacher Tunnel	3.285	73%	80.000	24,4	k. A.	k. A.	0,480	146,1
Tunnel Rottbitze	990	72%	34.800	35,2	k. A.	k. A.	0,107	107,6
Tunnel Ittenbach	1.145	66%	42.600	37,2	k. A.	k. A.	0,113	98,3
Mittelwert	2.247	89%	87.741	40,2	5.601	2,1	0,304	127,4
Median	1.250	93%	50.000	37,2	3.375	1,6	0,170	127,9
Minimum	474	66%	9.735	11,0	154	0,2	0,042	47,5
Maximum	10.525	100%	340.000	79,6	20.000	6,9	1,210	222,4

Anteil berg. B. = Anteil bergmännische Bauweise an der Gesamtlänge

Quelle: Internetrecherchen des Öko-Instituts.³⁴

³³ Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite> und www.muengstener-bruecke.de.

³⁴ Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>, www.arge-nbs.de, www.kuk.de und www.beton-informationen.de.

Tabelle 137: Menge an Stahl und Beton zum Bau ausgewählter zweigleisiger Eisenbahntunnel in überwiegend offener Bauweise sowie die Menge des Ausbruchs in Deutschland

	Länge	Anteil berg. B.	Betonverbrauch		Stahlverbrauch		Ausbruch	
	M	in %	m ³	m ³ /m	t	t/m	Mill. m ³	m ³ /m
Idsteintunnel	2.069	19%	91.600	44,3	9.500	4,6	0,600	290,0
Siegauen-Tunnel	2.502	15%	175.000	69,9	19.000	7,6	0,750	299,8
Rauhebertunnel	1.020	0%	36.000	35,3	3.500	3,4	0,700	686,3
Tunnel Denkendorf	670	0%	36.000	53,7	6.000	9,0		
Mittelwert	1.565	8%	84.650	50,8	9.500	6,1	0,683	425,3
Medium	1.545	7%	63.800	49,0	7.750	6,1	0,700	299,8
Minimum	670	0%	36.000	35,3	3.500	3,4	0,600	290,0
Maximum	2.502	19%	175.000	69,9	19.000	9,0	0,750	686,3

Anteil berg. B. = Anteil bergmännische Bauweise an der Gesamtlänge

Quelle: Internetrecherchen des Öko-Instituts.³⁵

Tabelle 138 Verbrauch an Kupfer und Bronze für Herstellung und Unterhalt von Oberleitungen für eine zweigleisige Strecke

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
HGS - zweigleisig (Re 330)					
- Kupfer	t	2,1	0,30	0,01	0,31
- Bronze	t	2,5	0,12	0,01	0,13
ABS - zweigleisig (Re 200/250)					
- Kupfer	t	2,0	0,20	0,01	0,20
- Bronze	t	1,3	0,07	0,00	0,07
Übrige Strecken - zweigleisig					
- Kupfer	t	1,8	0,09	0,01	0,09
- Bronze	t	1,1	0,05	0,00	0,06

Quellen: [Fendrich 2007]; [Hillenbrand et al. 2005]; [Köser et al. 2002]; eigene Berechnungen

³⁵ Recherchen auf der Internetseite <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>.

Tabelle 139 Verbrauch an Beton, Stahl und Aluminium für Herstellung und Unterhalt von Oberleitungsmasten für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert)

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		<i>pro km</i>	<i>pro km und a</i>	<i>pro km und a</i>	<i>pro km und a</i>
HGS/ABS ohne Tunnel - 2-gleisig					
- Beton	m ³	38,2	0,64	0,13	0,76
- Bewehrungsstahl	t	44,4	0,74	0,15	0,89
- Stahl	t	6,6	0,11	0,02	0,13
- Aluminium	t	4,3	0,07	0,01	0,09
HGS/ABS mit Tunnel - 2-gleisig					
- Beton	m ³	0,1	0,00	0,00	0,00
- Bewehrungsstahl	t	0,0	0,00	0,00	0,00
- Stahl	t	6,6	0,11	0,02	0,13
- Aluminium	t	4,3	0,07	0,01	0,09
Übrige o. Tunnel: Betonmast - 2-gleisig					
- Beton	m ³	31,1	0,52	0,10	0,62
- Bewehrungsstahl	t	36,1	0,60	0,12	0,72
- Stahl	t	5,3	0,09	0,02	0,11
- Aluminium	t	3,5	0,06	0,01	0,07
Übrige o. Tunnel: Stahlmast - 2-gleisig					
- Beton	m ³	7,5	0,13	0,03	0,15
- Bewehrungsstahl	t	33,6	0,56	0,11	0,67
- Stahl	t	17,8	0,30	0,06	0,36
- Aluminium	t	3,5	0,06	0,01	0,07
Übrige Strecken m. Tunnel - 2-gleisig					
- Beton	m ³	0,1	0,00	0,00	0,00
- Bewehrungsstahl	t	0,0	0,00	0,00	0,00
- Stahl	t	5,3	0,09	0,02	0,11
- Aluminium	t	3,5	0,06	0,01	0,07

Quellen: [Köser et al. 2002]; [Fendrich 2007]; [PCR 2009]; [Steger et al. 2010]; eigene Berechnungen

Tabelle 140: Verbrauch an Stahl, Kupfer, Ziegelsteinen und Beton für Herstellung und Unterhalt von Unterwerken für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert)

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		<i>pro km</i>	<i>pro km und a</i>	<i>pro km und a</i>	<i>pro km und a</i>
- Stahl	t	1,18	0,08	0,00	0,08
- Kupfer	t	0,72	0,05	0,00	0,05
- Mauerwerk/Ziegelsteine	t	2,95	0,05	0,00	0,05
- Beton	t	0,26	0,00	0,00	0,00

Quellen: [UIC 2010]; [Köser et al. 2002]; [Kiewert et al. 2009]; eigene Berechnungen

Tabelle 141: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Stroms aus dem öffentlichen Hochspannungsnetz für die Jahre 2005 und 2010 ohne und mit Materialvorleistungen

	CO ₂		CO ₂ -Äquivalente	
	2005	2010	2005	2010
	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Strom ohne Materialvorleistungen	624,4	557,2	650,9	584,0
Strom mit Materialvorleistungen	631,5	563,9	658,6	591,2
Differenz Materialvorleistungen	7,1	6,7	7,7	7,2
Prozentuale Abweichung	1,1%	1,2%	1,2%	1,2%

Quellen: GEMIS 4.5 [Fritsche et al. 2008]; eigene Berechnungen

Tabelle 142: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro TJ Dieselkraftstoff für das Jahr 2005 ohne und mit Materialvorleistungen

	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	kg/TJ	kg/TJ
Dieseldieselkraftstoff inkl. Energievorketten ¹⁾	80.061	80.828
Materialvorleistung Dieseldieselproduktion ²⁾	389	432
Materialvorleistungen Tankstellen ³⁾	23	25
Dieseldiesel inkl. Materialvorleistungen	80.473	81.285
Prozentuale Abweichung	0,5 %	0,6 %

1) Wert nach TREMOD v 5.05. - 2) Wert nach GEMIS 4.5. - 3) eigene Berechnungen

Quellen: TREMOD v 5.04 [TREMOD 5.25]; GEMIS 4.5 [Öko-Institut 2008]; eigene Berechnungen

Tabelle 143: Verbrauch an Beton/Ziegelsteinen, Stahl, Kupfer und PE für Herstellung und Unterhalt von Stellwerken pro Gleiskilometer

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
1-gleisige Strecke					
- Beton/Ziegelsteine	t	7,16	0,12	0,00	0,12
- Stahl	t	0,56	0,02	0,00	0,02
- Kupfer	t	0,03	0,00	0,00	0,00
- Polyethylen (HDPE)	t	0,04	0,00	0,00	0,00

Quellen: [ecoinvent 2009]; [Kellenberger et al. 2007]; [Köser et al. 2002]; eigene Berechnungen

Tabelle 144: Übersicht über Gebäudeinnenflächen, Bahnsteigflächen, Anzahl der Stockwerke und Materialmengen für die Errichtung von Bahnhöfen, differenziert nach Bahnhofskategorien

Bahnhofs-kategorie	Bahnsteig-flächen	Innenflächen ohne Zugänge	Anzahl Stockwerke	Beton-menge	Stahl-menge
	m ²	m ²	Anzahl	m ³	t
1	29.175	19.946	3	25.075	1.177
2	13.639	6.870	3	10.423	477
3	6.988	2.706	2	5.358	238
4 - 6	2.016	656	1-2	1.606	70

Quellen: [DB 2009e]; eigene Berechnungen

Tabelle 145: Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Bahnhöfen

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro Bahnhof	pro Bahnhof und a	pro Bahnhof und a	pro Bahnhof und a
Lebensdauer 60 Jahre					
<i>Bahnhofskategorie 1</i>					
- Beton	m ³	25.075	417,9	x	417,9
- Bewehrungsstahl	t	1.177	19,6	x	19,6
<i>Bahnhofskategorie 2</i>					
- Beton	m ³	10.423	173,7	x	173,7
- Bewehrungsstahl	t	477	7,9	x	7,9
<i>Bahnhofskategorie 3</i>					
- Beton	m ³	5.358	89,3	x	89,3
- Bewehrungsstahl	t	238	4,0	x	4,0
<i>Bahnhofskategorie 4-6</i>					
- Beton	m ³	1.606	26,8	x	26,8
- Bewehrungsstahl	t	70	1,2	x	1,2
Lebensdauer 100 Jahre					
<i>Bahnhofskategorie 1</i>					
- Beton	m ³	25.075	250,8	x	250,8
- Bewehrungsstahl	t	1.177	11,8	x	11,8
<i>Bahnhofskategorie 2</i>					
- Beton	m ³	10.423	104,2	x	104,2
- Bewehrungsstahl	t	477	4,8	x	4,8
<i>Bahnhofskategorie 3</i>					
- Beton	m ³	5.358	53,6	x	53,6
- Bewehrungsstahl	t	238	2,4	x	2,4
<i>Bahnhofskategorie 4-6</i>					
- Beton	m ³	1.606	16,1	x	16,1
- Bewehrungsstahl	t	70	0,7	x	0,7

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 146: Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Instandhaltungswerken

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro Werk	pro Werk und a	pro Werk und a	pro Werk und a
Lebensdauer 60 Jahre					
- Beton	m ³	23.071	385	x	385
- Bewehrungsstahl	t	1.172	20	x	20
Lebensdauer 100 Jahre					
- Beton	m ³	23.071	231	x	231
- Bewehrungsstahl	t	1.172	12	x	12

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 147: Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Güterbahnhöfen

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro Werk	pro Werk und a	pro Werk und a	pro Werk und a
Lebensdauer 60 Jahre					
- <i>Beton</i>	m ³	2.851	47,5	x	47,5
- <i>Bewehrungsstahl</i>	t	150	2,5	x	2,5
Lebensdauer 100 Jahre					
- <i>Beton</i>	m ³	2.851	28,5	x	28,5
- <i>Bewehrungsstahl</i>	t	150	1,5	x	1,5

Quelle: eigene Berechnungen

10.5.2 Betrieb der Verkehrsinfrastruktur

Tabelle 148: Anteile der Verkehrsarten an den CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen innerhalb einer Verursachergruppe nach Angaben der DB AG für das Jahr 2008

	Anteile an den CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen			
	Personen-nahverkehr	Personen-fernverkehr	Güterverkehr	Insgesamt
	In %	in %	in %	in %
Bürogebäude	35 %	35 %	30 %	100 %
Personenbahnhöfe	60 %	40 %	0 %	100 %
Werke	40 %	30 %	30 %	100 %
Weichenheizung	40 %	20 %	40 %	100 %

Quelle: [DB 2009b].

10.5.3 Fahrzeugherstellung

Tabelle 149: Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von Triebfahrzeugen der Typen ICE 1 und ICE 2 (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 500.000 km/a)

Bereich	Errichtungsaufwand	Instandhaltung	Insgesamt
	g/Zug-km/a	g/Zug-km/a	g/Zug-km/a
ICE 1	38,55	23,88	62,43
Stahl	16,05	22,50	38,55
Aluminium	6,60	0,06	6,66
Kupfer	4,30	0,06	4,36
Blei	0,25	0,00	0,25
Kunststoffe	8,40	0,00	8,40
Mineralwolle	1,75	0,00	1,75
Glas, beschichtet	0,48	0,00	0,48
Glas, unbeschichtet	0,48	0,00	0,48
Alkydharz-Farbe	0,25	1,25	1,50
ICE 2	34,83	23,88	58,71
Stahl	16,14	22,50	38,64
Aluminium	4,50	0,06	4,56
Kupfer	1,72	0,06	1,78
Blei	0,00	0,00	0,00
Kunststoffe	8,09	0,00	8,09
Mineralwolle	1,25	0,00	1,25
Glas, beschichtet	1,25	0,00	1,25
Glas, unbeschichtet	1,25	0,00	1,25
Alkydharz-Farbe	0,63	1,25	1,88

Quelle: [Köser et al. 2008]; eigene Berechnungen

Tabelle 150: Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Nah- und Fernverkehrszügen (Lebensdauer: 40 Jahre)

Bereich	Errichtungs- aufwand	Instandhaltung	Insgesamt
	g/Zug-km/a	g/Zug-km/a	g/Zug-km/a
Nahverkehrszug mit Lok	29,46	9,65	39,11
Stahl	21,60	8,89	30,49
Aluminium	1,89	0,11	2,01
Kupfer	1,33	0,17	1,50
Blei	0,27	0,22	0,49
Kunststoffe	2,71	0,19	2,89
Glas, unbeschichtet	1,37	0,04	1,41
Holz	0,24	0,00	0,24
Alkydharz-Farbe	0,05	0,03	0,08
Fernverkehrszug mit Lok	60,10	9,65	69,75
Stahl	29,13	8,89	38,02
Aluminium	8,12	0,11	8,23
Kupfer	3,10	0,17	3,28
Blei	0,00	0,22	0,22
Kunststoffe	15,13	0,19	15,31
Glas, unbeschichtet	4,51	0,04	4,55
Holz	0,00	0,00	0,00
Alkydharz-Farbe	0,10	0,03	0,13

Quelle: [Knörr/Kutzner 2009]; [Bombardier 2003]; eigene Berechnungen

Tabelle 151: Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Güterzügen (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 40.000 km/a)

Bereich	Errichtungs- aufwand	Instandhaltung	Insgesamt
	g/Zug-km/a	g/Zug-km/a	g/Zug-km/a
lokbespannter Güterzug	327,55	53,52	381,07
Stahl	284,70	8,89	293,59
Eisenbremsen	0,00	43,88	43,88
Aluminium	16,49	0,11	16,60
Kupfer	4,65	0,17	4,82
Blei	0,18	0,22	0,40
Kunststoffe	8,63	0,19	8,82
Mineralwolle	0,54	0,00	0,54
Glas, unbeschichtet	0,00	0,04	0,04
Holz	12,31	0,00	12,31
Alkydharz-Farbe	0,05	0,03	0,08

Quelle: [Knörr/Kutzner 2009]; [Bombardier 2003]; eigene Berechnungen