

Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienen- fahrzeuge in Deutschland

(FKZ 363 01 244)

Endbericht

Veröffentlichung:

Dezember 2013 Berlin,

Fertigstellung Juni 2010

Autoren:

Martin Schmied, Öko-Institut e.V., Büro Berlin

Moritz Mottschall, Öko-Institut e.V., Büro Berlin

In Kooperation mit dem DB Umweltzentrum:

Andreas Löchter, Deutsche Bahn AG,
Abteilung Energie, Klimaschutz, Ressourceneffizienz

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71

79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg

Telefon +49 761 45295-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt

Telefon +49 6151 8191-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7

10179 Berlin

Telefon +49 30 405085-0

info@oeko.de

www.oeko.de

Vorwort

Treibhausgasemissionen für den Bau, die Instandhaltung und den Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie für die Herstellung und den Unterhalt der Schienenfahrzeuge können nur detailliert ermittelt werden, wenn auch umfassende Daten zum deutschen Schienennetz und dessen Nutzung vorliegen. Im vorliegenden F&E-Vorhaben „Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland“ im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde daher mit dem DB Umweltzentrum der Deutschen Bahn AG (Abteilung Energie, Klimaschutz, Ressourceneffizienz) zusammengearbeitet.

Das DB Umweltzentrum konnte für das Netz der Deutschen Bahn AG, das rund 87 % der insgesamt 73.000 Gleiskilometer in Deutschland umfasst, detaillierte Angaben zur Beschaffenheit (z. B. Anzahl Gleise, Gleistypen, Art der Schwellen, Elektrifizierung, Brücken, Tunnel) zur Verfügung stellen, auf deren Basis die Materialmengen und damit die Treibhausgasemissionen für den Bau und den Unterhalt der Schieneninfrastruktur berechnet werden konnten. Diese Daten waren für 7.500 Einzelstreckenabschnitte verfügbar. Zudem lagen Daten zur Zugbelegung der Streckenart sowie die eingesetzten Zugarten vor, so dass eine Aufteilung der ermittelten Emissionen auf die drei Zugarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr möglich war.

Entsprechende Daten für das übrige Schienennetz ebenso wie Angaben zu Verkehrsleistungen von nichtbundeseigenen Eisenbahnen (NE-Bahnen) auf dem DB Netz liegen verständlicherweise dem DB-Umweltzentrum nicht vor. Für die Netze der anderen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (rund 10 % aller Gleiskilometer in Deutschland) stellte die Bundesnetzagentur dem Forschungsvorhaben die benötigten Daten zu Verfügung, auch wenn in deutlich geringerer Detailschärfe. Für das nichtöffentliche Netz (3 % der deutschen Gleiskilometer) wurden öffentlich publizierte Daten vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen herangezogen. Beide Quellen wurden zudem um Angaben des Statistischen Bundesamtes ergänzt.

Zusammen mit den Daten des DB-Umweltzentrums konnte so ein umfassendes Bild vom deutschen Schienennetz gewonnen werden, so dass die Treibhausgasemissionen der Schieneninfrastruktur in einer Detailschärfe berechnet werden konnten, wie es bisher nicht möglich war. Das Öko-Institut dankt daher dem DB-Umweltzentrum und der Bundesnetzagentur für diese Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens. Zusammen mit dem Umweltbundesamt als Financier der Studie haben diese beiden Partner wesentlich zum Gelingen des Forschungsvorhabens beigetragen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort I

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Projekthintergrund	1
1.2 Projektziel.....	3
1.3 Aufbau des Berichtes.....	4
2 Methodisches Vorgehen	5
2.1 Berechnungsprinzipien	6
2.2 Systemgrenzen.....	9
2.3 Allokation.....	13
2.4 Datenquellen	16
3 Daten und Ergebnis für die Schieneninfrastruktur (Bau und Unterhalt)	22
3.1 Unterbau der Schienentrasse	22
3.2 Oberbau der Schienentrasse	25
3.3 Brücken	36
3.4 Tunnel	42
3.5 Energieversorgung (einschließlich Oberleitung).....	48
3.6 Signaltechnik und Telekommunikation.....	60
3.7 Gebäude (Bahnhöfe, Werke und Güterbahnhöfe).....	68
3.8 Ergebnisse für das Netz der DB AG	79
3.9 Ergebnis für das Gesamtschienennetz in Deutschland	87
4 Daten und Ergebnisse für den Betrieb der Schieneninfrastruktur.....	90

4.1	Daten zum stationären Bereich.....	90
4.2	Ergebnisse	92
5	Daten und Ergebnisse für die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge und Waggons.....	94
5.1	Überblick	94
5.2	Triebfahrzeuge	95
5.3	Lokbespannte Personenzüge	96
5.4	Lokbespannte Güterzüge	97
5.5	Ergebnisse	98
6	Darstellung der Gesamtergebnisse und Vergleich mit anderen Studien	101
6.1	Gesamtergebnis	101
6.2	Ergebnisse der Sensitivitätsberechnungen.....	103
6.3	Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien	104
7	Zusammenfassung und Empfehlungen	112
8	Literatur	120

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Direkte und indirekte CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für schienegebundene Verkehre in Deutschland 2008 (SSU= Straßen, S- und U-Bahn; PNV = Personennahverkehr; PFV = Personenfernverkehr; GV = Güterverkehr) [Richter 2010].....	1
Bild 2:	Einzelprozesse für eine umfassende Treibhausgasbilanz des Schienenverkehrs in Anlehnung an die Product Category Rules for Railways [PCR 2009a]	5
Bild 3:	Schematischer Ablauf für die THG-Bilanz der Schieneninfrastruktur.....	11
Bild 4:	Schematischer Ablauf für die THG-Bilanz der Schienenfahrzeuge und Waggon.....	12
Bild 5:	Gleislängen der Schieneninfrastruktur in Deutschland (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg) zum 31.12.2008 (öffentliches Netz der übrigen EIU: 31.12.2007) [StBA 2009b; DB 2009d; Bundesnetzagentur 2010; VDV 2009]	18
Bild 6:	Prinzipieller Aufbau des Bahnkörpers [Kohler 2002].....	22
Bild 7:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Steckenkilometer durch Herstellung und Wartung des Unterbaus zweigleisiger Strecken, differenziert nach Art der Strecke und Verursachergruppen [Berechnungen des Öko-Instituts].....	24
Bild 8:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Steckenkilometer durch Herstellung und Wartung des Oberbaus zweigleisiger Strecken, differenziert nach Schwellentypen und Verursachergruppen [Berechnungen des Öko-Instituts].....	35
Bild 9:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Brückenkilometer durch den Bau zweigleisiger Brücken, differenziert nach Brückenart und Verursachergruppen (Lebensdauer: 60 Jahre) [Berechnungen des Öko-Instituts]	42
Bild 10:	Längenbezogener Anteil der geschlossenen bzw. offenen Bauweisen bei den jeweils zum Jahreswechsel im Bau befindlichen Fernbahntunneln [Haack 2009]	43
Bild 11:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Tunnelkilometer durch den Bau zweigleisiger Tunnel, differenziert nach Tunnelart und Verursachergruppen (Lebensdauer: 60 Jahre) [Berechnungen des Öko-Instituts].....	47
Bild 12:	Prinzipieller Aufbau der 16,7-Hz-Bahnenergieversorgung der DB AG [Fendrich 2007; modifiziert durch das Öko-Institut]	48
Bild 13:	Prinzipieller Aufbau eines Längskettenwerkes („Einfache Hochkette“) [Fendrich 2007].....	49

Bild 14:	Spezifische CO ₂ -Emissionen pro Streckenkilometer durch den Bau von Oberleitungen, differenziert nach Verursachergruppen [Berechnungen des Öko-Instituts]	58
Bild 15:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer durch die Herstellung der Infrastruktur zur Erzeugung und Verteilung von Diesel und Strom (bis Unterwerk), den Personennahverkehr (PNV), Personenfernverkehr (PFV) und Güterverkehr (GV) im Jahr 2008 [Richter 2010; eigene Berechnungen]	59
Bild 16:	Aufbau eines typischen Bahn-Signalkabels [Fendrich 2007]	61
Bild 17:	Abmessungen und Gewichte von Beton-Kabelkanälen mit einer Baulänge von einem Meter [BFL 2006]	64
Bild 18:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro zweigleisigen Streckenkilometer durch Herstellung und Wartung der Signal- und Kommunikationstechnik, differenziert nach Art der Strecke und Verursachergruppen [Berechnungen des Öko-Instituts]	68
Bild 19:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Gebäude durch den Bau von Personen- und Güterbahnhöfen sowie Werken differenziert nach Verursachergruppen (Lebensdauer: 60 Jahre) [Berechnungen des Öko-Instituts]	77
Bild 20:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau der Bahnhöfe und Werke differenziert nach den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr sowie Gebäudeart für eine Lebensdauer von 60 Jahren [Berechnungen des Öko-Instituts]	79
Bild 21:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km für verschiedene Streckentypen für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008 [DB 2009a; Berechnungen des Öko-Instituts]	82
Bild 22:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km und Strecken-Abschnitt für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008 [DB 2009a; Darstellung des DB Umweltzentrums]	83
Bild 23:	Anteile der Verkehrsarten und Schienennutzer (DB AG bzw. NE-Bahnen) an den Bruttotonnenkilometern bzw. CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für Bau und Unterhalt des DB-Netzes im Jahr 2008 [DB 2009a; Berechnungen des Öko-Instituts]	84
Bild 24:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für verschiedene Streckentypen differenziert nach Verkehrsart (Mittelwerte für DB AG und NE-Bahnen) für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008 [DB 2009a; Berechnungen des Öko-Instituts]	86

Bild 25:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur in Deutschland im Jahr 2008 [Berechnungen des Öko-Instituts].....	89
Bild 26:	Gesamtenergieverbrauch und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den stationären Bereich der DB AG im Jahr 2008 nach Verursacherguppen [DB 2009b; Berechnungen des Öko-Instituts]	90
Bild 27:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur, differenziert nach Verkehrsart und Verursacherguppen für die DB-Netz im Jahr 2008 [DB 2009b; Berechnungen des Öko-Instituts]	93
Bild 28:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung und Wartung von Triebfahrzeugen und lokbespannten Zügen [Berechnungen des Öko-Instituts]	99
Bild 29:	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 2008 [Richter 2010; Berechnungen des Öko-Instituts]	102
Bild 30:	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 [Berechnungen des Öko-Instituts]	104
Bild 31:	Ergebnisse verschiedener Studien zu den spezifischen CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge differenziert nach Verursacherguppen [Berechnungen des Öko-Instituts, Chester 2008, Frischknecht/Stucki 2009, UIC 2009]	107
Bild 32:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Gleiskilometer und pro Verkehrsleistung für verschiedene Verkehrsarten und Streckentypen für Bau und Unterhalt des DB-Netzes im Jahr 2008 [Berechnungen des Öko-Instituts]	115
Bild 33:	Spezifische CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer für den Fahrbetrieb, Bau/Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau/Unterhalt der Züge für das Jahr 2008	118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick zu den Systemgrenzen.....	12
Tabelle 2:	Überblick über die in dieser Studie verwendeten Lebensdauern	15
Tabelle 3:	CO ₂ - und THG-Emissionsfaktoren für verschiedene Materialien	19
Tabelle 4:	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 2007.....	20
Tabelle 5:	CO ₂ - und THG-Emissionen für die verwendeten Energieträger.....	21
Tabelle 6:	CO ₂ - und THG-Emissionen für Baumaschinen zum Ausgraben und Verfüllen von Erdmassen	21
Tabelle 7:	Verbrauch an Kies-Sand für Bau und Unterhalt der Planumsschicht, differenziert nach Neubaustrecken und übrigen Strecken	23
Tabelle 8:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Erstellung und Instandhaltung des Unterbaus für ein- und zweigleisige Strecken, differenziert nach Streckentyp (Lebensdauer: 60 Jahre)	24
Tabelle 9:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Erstellung und Instandhaltung des Unterbaus für ein- und zweigleisige Strecken differenziert nach Streckentyp für die Lebensdauer von 100 Jahren (Sensitivitätsberechnung).....	25
Tabelle 10:	Schienenprofile und deren Metergewichte	26
Tabelle 11:	Stahlverbrauch für Bau und Unterhalt der Schienen, differenziert nach Schientypen	27
Tabelle 12:	Materialaufwand für Bau und Unterhalt von Bahnschwellen, differenziert nach Schwellentypen.....	29
Tabelle 13:	Materialaufwand für Bau und Unterhalt von Schienenbefestigungen, differenziert nach Schwellentypen.....	30
Tabelle 14:	Schottervolumina für ein- und zweigleisige Strecken in Abhängigkeit von der Schwellenart (Überhöhung: 0 mm).....	31
Tabelle 15:	Schotterverbrauch für Bau und Unterhalt der Fahrbahnbettes, differenziert nach Schientypen	32
Tabelle 16:	Beton und Stahl für Bau und Unterhalt der Festen Fahrbahn.....	34
Tabelle 17:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Herstellung und Instandhaltung des Oberbaus für ein- und zweigleisige Strecken, differenziert nach eingesetzter Schienenart und verwendetem Schwellentyp.....	35

Tabelle 18:	Anzahl der Brücken und deren Länge im aktiven Netz der Deutschen Bahn AG im Jahr 2008 (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg).....	36
Tabelle 19:	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.....	38
Tabelle 20:	Betonverbrauch für den Überbau verschiedener zweigleisiger Talbrücken an der NBS Nürnberg-Erfurt	39
Tabelle 21:	Stahlmengen für ausgewählte Stahl-Eisenbahnbrücken in Deutschland.....	40
Tabelle 22:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Strecken-Kilometer durch den Bau von ein- und zweigleisigen Brücken, differenziert nach Brückenart und Lebensdauer	41
Tabelle 23:	Menge an Stahl und Beton zum Bau ausgewählter zweigleisiger Eisenbahntunnel in überwiegend bergmännischer Bauweise sowie die Menge des Ausbruchs in Deutschland	44
Tabelle 24:	Menge an Stahl und Beton zum Bau ausgewählter zweigleisiger Eisenbahntunnel in überwiegend offener Bauweise sowie die Menge des Ausbruchs in Deutschland.....	46
Tabelle 25:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch den Bau von ein- und zweigleisigen Tunnel, differenziert nach Tunnelart und Lebensdauer	47
Tabelle 26	Verbrauch an Kupfer und Bronze für Herstellung und Unterhalt von Oberleitungen für eine zweigleisige Strecke.....	50
Tabelle 27	Verbrauch an Beton, Stahl und Aluminium für Herstellung und Unterhalt von Oberleitungsmasten für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert)	52
Tabelle 28:	Verbrauch an Stahl, Kupfer, Ziegelsteinen und Beton für Herstellung und Unterhalt von Unterwerken für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert)	54
Tabelle 29:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen des Stroms aus dem öffentlichen Hochspannungsnetz für die Jahre 2005 und 2010 ohne und mit Materialvorleistungen	55
Tabelle 30:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro TJ Dieselkraftstoff für das Jahr 2005 ohne und mit Materialvorleistungen.....	56
Tabelle 31:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer (elektrifiziert) durch den Bau von Unterwerken und Oberleitung, differenziert nach Oberleitungstyp und Streckentyp.....	57

Tabelle 32:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer (elektrifiziert) durch den Bau von Unterwerken und Oberleitung, differenziert nach Oberleitungstyp und Streckentyp, bei einer Lebensdauer von 100 Jahren für langlebige Bauteile.....	58
Tabelle 33:	Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Haupt-, Vor- und Weichen-Signalen.....	61
Tabelle 34:	Verbrauch an Kupfer und PE für Herstellung und Unterhalt von Signal- und Kommunikationskabel aus Kupfer	63
Tabelle 35:	Betonverbrauch für Herstellung und Unterhalt von Kabelkanälen	64
Tabelle 36:	Verbrauch an Kupfer und PE für Herstellung und Unterhalt von Kabel für die Linienzugbeeinflussung von Ausbau- und Neubaustrecken (ABS und NBS)	65
Tabelle 37:	Verbrauch an Beton/Ziegelsteinen, Stahl, Kupfer und PE für Herstellung und Unterhalt von Stellwerken pro Gleiskilometer	66
Tabelle 38:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch die Errichtung von Kabeln, Kabelkanälen und Signalen.....	67
Tabelle 39:	Übersicht über die Kategorien der Personenbahnhöfe der Deutschen Bahn AG und deren Anzahl im Jahr 2009	69
Tabelle 40:	Anteil des Personennahverkehrs an den Zughalten in Bahnhöfen der Kategorie 1 bis 3.....	70
Tabelle 41:	Übersicht über Gebäudeinnenflächen, Bahnsteigflächen, Anzahl der Stockwerke und Materialmengen für die Errichtung von Bahnhöfen, differenziert nach Bahnhofskategorien.....	70
Tabelle 42:	Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Bahnhöfen	71
Tabelle 43:	Anzahl und prozentuale Verteilung der Werke auf die Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr im Jahr 2009.....	72
Tabelle 44:	Rechercheergebnisse zu Gebäudeflächen und Anzahl Stockwerke für ausgewählte Werke der Deutschen Bahn AG	73
Tabelle 45:	Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Instandhaltungswerken	74
Tabelle 46:	Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Güterbahnhöfen.....	75
Tabelle 47:	Jährliche CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau von Bahnhofs- und Werksgebäuden pro Gebäude für eine Lebensdauer von 60 und 100 Jahren.....	76
Tabelle 48:	Jährliche CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Bahnhöfe und Werke differenziert nach den Personennah-,	

	Personenfern- und Güterverkehr für eine Lebensdauer der Gebäude von 60 und 100 Jahren.....	78
Tabelle 49:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau der Bahnhöfe und Werke differenziert nach den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr für eine Lebensdauer der Gebäude von 60 und 100 Jahren	78
Tabelle 50:	Verkehrsleistungen der DB AG sowie der NE- und Werkbahnen im Jahr 2008, differenziert nach DB-Netz und Netz anderer Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU)	81
Tabelle 51:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km für das Netz der Deutschen Bahn AG im Jahr 2008	81
Tabelle 52:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für verschiedene Verkehrsarten und Nutzer (DB AG und NE-Bahnen) für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008.....	85
Tabelle 53:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km und Jahr für den Bau und Unterhalt des öffentlichen Netzes von Nicht-DB-Infrastrukturunternehmen sowie des nichtöffentlichen Netzes im Jahr 2008, differenziert nach Verkehrsarten	87
Tabelle 54:	Spezifische CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur für NE- und Werkbahnen in Deutschland im Jahr 2008.....	88
Tabelle 55:	Anteile der Verkehrsarten an den CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen innerhalb einer Verursacherguppe nach Angaben der DB AG für das Jahr 2008	91
Tabelle 56:	CO ₂ - und CO ₂ -Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur der DB- Netz im Jahr 2008 nach Verkehrsarten	92
Tabelle 57:	Leistungsmerkmale verschiedener Zugkonfigurationen.....	94
Tabelle 58:	Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von Triebfahrzeugen der Typen ICE 1 und ICE 2 (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 500.000 km/a)	96
Tabelle 59:	Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Nah- und Fernverkehrszügen (Lebensdauer: 40 Jahre).....	97
Tabelle 60:	Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Güterzügen (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 40.000 km/a)	98
Tabelle 61:	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.....	99

Tabelle 62:	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	101
Tabelle 63:	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]	108

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Erläuterung
ABS	Ausbaustrecke
BART	Bay Area Rapid Transit
CAHSR	California High Speed Rail
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
DB AG	Deutsche Bahn AG
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EPD	Environmental product declarations
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GIS	Geoinformationssystem
GV	Güterverkehr
GWP	Global Warming Potential
HDPE	High Density Polyethylen
HGS	Hochgeschwindigkeitsstrecke
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
ICE	Intercity-Express
IPCC	International Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LWL	Lichtwellenleiter
N ₂ O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NBS	Neubaustrecke
NE-Bahn	Nichtbundeseigene Eisenbahn
PCR	Product Category Rules
PE	Polyethylen
PFV	Personenfernverkehr
Pkm	Personenkilometer
PNV	Personennahverkehr
PVC	Polyvinylchlorid
SSU	Straßen, S- und U-Bahnen
StBA	Statistisches Bundesamt

Abk.	Erläuterung
STUVA	Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen
THG-Emissionen	Treibhausgasemissionen
TJ	Terajoule
TK	Telekommunikation
tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transport Emission Estimation Model
UIC	International Union of Railways (Internationaler Eisenbahnverband)
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VPE	vernetztes Polyethylen
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht
Zug-km	Zug-Kilometer

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, ein. Der letzte Schritt ist gerade bei Verkehrsmittelvergleichen zwingend notwendig, da oftmals Fahrzeuge eingesetzt werden, die mit Strom betrieben werden (z. B. Straßen-, S- und U-Bahnen (SSU), Eisenbahn, Elektrofahrzeuge). Diese Fahrzeuge weisen keine direkten Emissionen auf, sondern ausschließlich indirekte durch die Herstellung des Stroms.

In Deutschland werden in der Regel für emissionsseitige Umweltvergleiche die Daten des Verkehrsemissionsmodells Transport Emission Estimation Model (TREMOD) 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. Bild 1 zeigt beispielsweise für schienengebundene Verkehrsmittel die Differenzierung der CO₂- und Treibhausgasemissionen (gemessen als CO₂-Äquivalente) nach direkten und indirekten Emissionen für das Jahr 2008. Bei allen schienengebundenen Verkehrsmitteln dominieren aufgrund des hohen Anteils an Elektrotraktion die indirekten Emissionen die Gesamtemissionen.

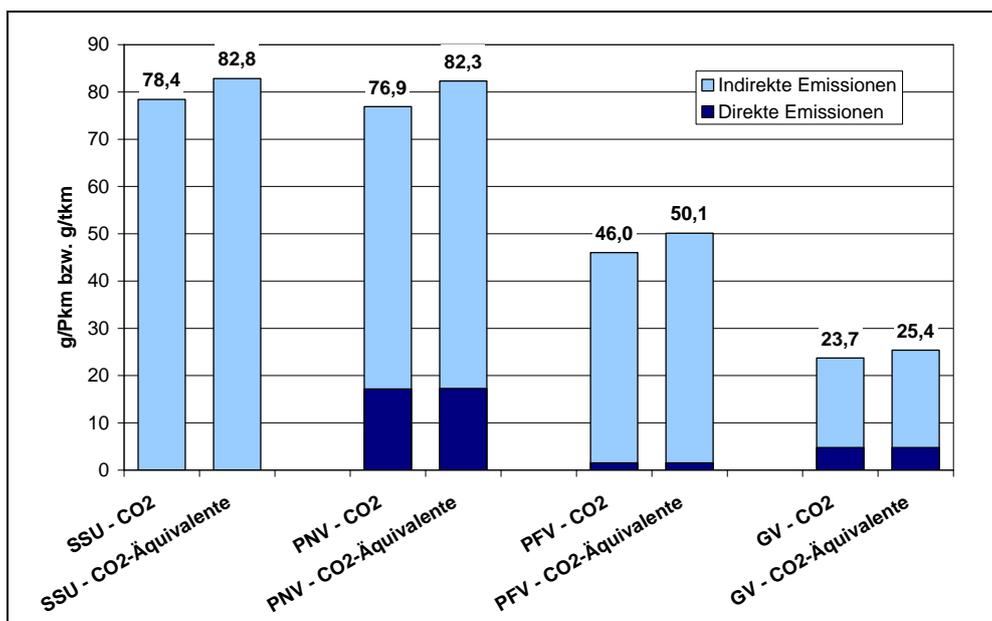


Bild 1: Direkte und indirekte CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen für schienengebundene Verkehre in Deutschland 2008 (SSU= Straßen, S- und U-Bahn; PNV = Personennahverkehr; PFV = Personenfernverkehr; GV = Güterverkehr) [Richter 2010]

Bei den Emissionsvergleichen von Verkehrsmitteln bisher nicht berücksichtigt sind die folgenden Bereiche:

- **Bau der Infrastruktur:** Emissionen durch die Herstellung der für den Bau benötigten Materialien, durch die Transporte der Materialien sowie durch die Baustellenenergie;
- **Instandhaltung der Infrastruktur:** Emissionen durch die für die Instandhaltung eingesetzten Materialien, die Transporte der Materialien und Bautätigkeiten;
- **Betrieb der Infrastruktur:** Emissionen insbesondere durch den Energieverbrauch der Infrastruktur (z. B. bei der Schiene: Bahnhöfe, Werke, Weichenheizungen und Signaltechnik);
- **Herstellung der Fahrzeuge:** Emissionen durch die verbauten Materialien differenziert für die Fahrzeugtypen (bei der Schiene auch inkl. Waggons).

In Verkehrsinfrastrukturen wie auch in Fahrzeugen werden bedeutsame Mengen an Rohstoffen verbaut (z. B. Beton, Stahl, Kupfer, Schotter, Holz), die bei der Herstellung zu erheblichen Umweltauswirkungen führen. Auch der Erhalt und der Betrieb der Infrastruktur tragen zu Umweltbelastungen bei. Für den Schienenverkehr, der in diesem Forschungsvorhaben gezielt untersucht werden soll, wurden in der Vergangenheit bereits in verschiedenen Studien die durch die Schieneninfrastruktur und Fahrzeugherstellung bedingten Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen ermittelt. Besonders bedeutsame Studien in diesem Zusammenhang sind:

- **für Deutschland:** Köser, H.; Herbst, G.; Konitzer, E.; Rozycki, C. v.: „Ökobilanzierung von Schienenverkehrssystemen am Beispiel des ICE-Verkehrs“. Gutachten der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Auftrag der Deutschen Bahn AG. Halle: 2002 [Köser et al. 2002];
- **für die Schweiz:** Frischknecht, R.; Stucki, M.: „Primärenergiefaktoren von Transportleistungen“. Version 1.3. Uster: 2009 [Frischknecht/Stucki 2009]¹; Spielmann, M.; Bauer, C.; Dones, R.; Tuchschnid, M.: „Life Cycle Inventories of Transport Services“. Data v2.0. ecoinvent report No. 14. Villingen/Uster: 2007 [Spielmann et al. 2007];
- **für den Hochgeschwindigkeitsverkehr in Europa:** Tuchschnid, M.: „Carbon Footprint of High-Speed railway infrastructure (Pre-Study)“. Bericht im Auftrag der International Union of Railways (UIC). Zürich: 2009 [UIC 2009]; die Materialdaten für diesen Bericht wurden der ebenfalls im Auftrag der UIC durchgeführten Studie von Systra Conseil entnommen [UIC 2010];
- **für die USA:** Chester, M. V.: „Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States“. Dissertation an der Universität von Kalifornien. Berkeley: 2008 [Chester 2008].

Für Deutschland liegen keine allgemein gültigen, aktuellen Aussagen zur Bedeutung der Schieneninfrastruktur und Fahrzeugherstellung für die Gesamtemissionsbilanz des Schienenverkehrs vor. Eine Abschätzung für die ICE-Hochgeschwindigkeitsstrecke

¹ Die Ergebnisse basieren auf Datensätzen des ecoinvent Datenbestandes v2.01.

Hannover-Würzburg kam zu dem Ergebnis, das rund 5 g Treibhausgase (berechnet als CO₂-Äquivalente) pro Personenkilometer (Pkm) auf den Bau und Erhalt der Infrastruktur und rund 1 g CO₂-Äquivalente/Pkm auf die Herstellung der Züge entfallen. Bezogen auf die Gesamtemissionen eines Fernverkehrszugs von rund 50 g CO₂-Äquivalenten/Pkm ergäbe sich damit eine Erhöhung der Gesamtemissionen von mehr als 10 %. Zu ähnlichen Beiträgen kommen auch die anderen zu diesem Thema durchgeführten Studien.

1.2 Projektziel

Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, spezifisch für Deutschland und für ein möglichst aktuelles Bezugsjahr die **Treibhausgasemissionen für den Bau, die Instandhaltung und den Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie für die Herstellung und den Unterhalt der Schienenfahrzeuge und Waggons zu ermitteln**. Es werden dabei sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Summe der Treibhausgasemissionen gemessen als CO₂-Äquivalente (siehe Kapitel 2.1) berechnet. Die Emissionen sollen einerseits pro Meter Schienenweg, andererseits pro Personenkilometer (Pkm) bzw. Tonnenkilometer (tkm) getrennt für

- Schienenpersonennahverkehr,
- Schienenpersonenfernverkehr sowie
- Schienengüterverkehr

ermittelt werden. Für den schienengebundenen innerstädtischen öffentlichen Personennahverkehr (Straßen-, S- und U-Bahnen) werden hingegen im Rahmen dieses Gutachtens keine Treibhausgasemissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge ermittelt.² Ebenso werden die infrastruktur- und fahrzeugbedingten Mehremissionen für andere Verkehrsmittel (z. B. Pkw) nicht in dieser Studie untersucht.

Letztendlich wird also in diesem Gutachten für den Schienenverkehr ermittelt, welche Beiträge an CO₂ bzw. CO₂-Äquivalenten noch zu den in Bild 1 ausgewiesenen Werten für die einzelnen Verkehrsarten hinzuaddiert werden müssten, um eine vollständige Emissionsbilanz zu erhalten. Die Ermittlung der Treibhausgasemissionen erfolgt dabei mit Hilfe einer orientierenden Stoffstromanalyse; eine detaillierte Ökobilanz würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Methodisch wird sich die Stoffstromanalyse aber an den Vorgaben der Product Category Rules für Schienenverkehrsinfrastruktur und Schienenfahrzeuge orientieren, die im Zusammenhang mit dem ISO-Standard 14025 (Umweltdeklarationen) und dem ISO-Standard 14040 ff. (Ökobilanzen) erstellt wurden (siehe Kapitel 2.1).

² Konkret bedeutet dies, dass die eigenen Streckennetze der S-Bahnen Berlin (Streckenlänge: 319 km) und Hamburg (Streckenlänge: 113 km) in dieser Studie unberücksichtigt bleiben. In anderen Städten mit S-Bahnen (z. B. München, Dresden oder Hannover) findet hingegen ein Mischbetrieb mit dem übrigen Bahnverkehr statt. In diesem Fall wird die Infrastruktur zwar mitbilanziert, aber bei der Allokation der Treibhausgasemissionen wird nur der um den S-Bahn-Betrieb bereinigte Teil dem übrigen Bahnverkehr zugerechnet.

1.3 Aufbau des Berichtes

In **Kapitel 2** erfolgt die **Beschreibung der methodischen Vorgehensweise** zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen beim Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie bei der Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge. 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. Für den **Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur** werden die verwendeten Materialmengen, die durchgeführten Transporte und die mit den Bautätigkeiten verbundenen Energieverbräuche ebenso wie die sich daraus errechneten Treibhausgasemissionen in **Kapitel 3** vorgestellt. Dabei wird auf die einzelnen Bereiche der Schieneninfrastruktur (Unter- und Oberbau, Energieversorgung, Bahnhöfe und Werke etc.) detailliert eingegangen. Die verwendeten Daten und Ergebnisse der Treibhausgasbilanz für den **Betrieb der Infrastruktur** finden sich in **Kapitel 4**, für die **Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge** in **Kapitel 5**. In **Kapitel 6** folgen die **Darstellung der Gesamtergebnisse** und der **Vergleich mit anderen Studien**. Als letztes inhaltliches Kapitel finden sich in **Kapitel 7** eine **Zusammenfassung der Ergebnisse** der Studie und die **Schlussfolgerungen** aus dem Gutachten. Die verwendete **Literatur** ist in **Kapitel 8** aufgeführt.

2 Methodisches Vorgehen

Derzeit gibt es noch keine allgemein anerkannte methodische Vorgehensweise zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen des Schienenverkehrs unter Einbeziehung der Schieneninfrastruktur und der Herstellung der Fahrzeuge. Die in Kapitel 1 aufgeführten Studien unterscheiden sich daher nicht nur in den Ergebnissen, sondern auch im methodischen Vorgehen. Aktuell wurde aber mit den „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“ (im Folgenden als „PCR for Railways“ bezeichnet) ein methodischer Rahmen geschaffen, wie der Bau und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie die Herstellung der Schienenfahrzeuge bei einer ökologischen Bewertung berücksichtigt werden sollen.

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 2009a]. 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). Bisher wird i. d. R. – wie bereits in Kapitel 1 ausgeführt – nur der Betrieb der Schienenfahrzeuge berücksichtigt.

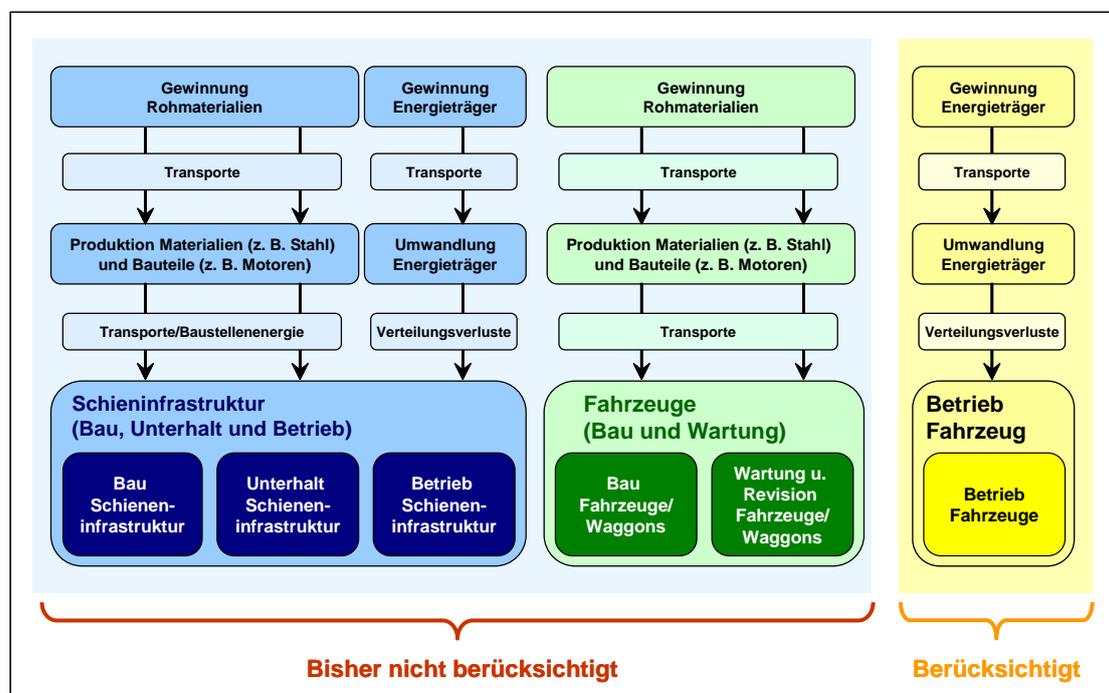


Bild 2: Einzelprozesse für eine umfassende Treibhausgasbilanz des Schienenverkehrs in Anlehnung an die Product Category Rules for Railways [PCR 2009a]

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) des Schienenverkehrs nach den methodischen Vorgaben der PCR for Railways. Die THG-Emissionen werden dabei – wie bereits ausgeführt – 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 basierend auf den PCR for Railways die Systemgrenzen für die Bilanzierung benannt. Daran anschließend werden in Kapitel 2.3 die Allokationsregeln ausgeführt. Kapitel 2.4 enthält die allgemein gültigen Daten, die für die Bilanzierung zugrunde gelegt werden.

2.1 Berechnungsprinzipien

Fokussierung auf Treibhausgasemissionen

Von den möglichen Umweltauswirkungen der Schienen- und Fahrzeuginfrastruktur werden in der vorliegenden Studie ausschließlich die CO₂-Emissionen und die Treibhausgasemissionen betrachtet. Die THG-Emissionen werden dabei als so genannte CO₂-Äquivalente berechnet. Hierzu werden neben Kohlendioxid (CO₂) auch andere treibhausgaswirksame Emissionen entsprechend ihrem Global Warming Potential (GWP) berücksichtigt.³ 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.

Aufgrund der geringen Bedeutung wird zum einen bei der Bilanzierung Schwefelhexafluorid (SF₆), das bei der Umwandlung von Strom in elektrischen Umspannwerken entsteht, nicht berücksichtigt [Spielmann et al. 2007]. Zum anderen werden mögliche THG-Emissionen, bedingt durch Änderungen der Landnutzung (z. B. durch permanente Abholzung von Waldflächen), nicht betrachtet, da die hierzu notwendigen Daten für das

³ Als Betrachtungszeitraum für die in der Studie verwendeten GWP-Faktoren werden 100 Jahre zugrunde gelegt.

deutsche Schienennetz nicht verfügbar sind. Im letzten Punkt weicht daher diese Studie von den Anforderungen der PCR for Railways ab.

Vorgehensweise bei der Berechnung

Die Berechnung der THG-Emissionen für Bau und Wartung der Schieneninfrastruktur sowie der Fahrzeuge/Waggons erfolgt auf Basis der eingesetzten Materialmengen. Hierbei werden die Emissionen berücksichtigt, die bei der Gewinnung der Rohstoffe, sowie deren Transporten und deren Verarbeitung zu den Grundmaterialien (wie z. B. Beton, Stahl, Kupfer) entstehen (siehe Bild 2). Ebenfalls betrachtet werden für die Schieneninfrastruktur die Emissionen, bedingt durch die Transporte der Materialien zur Eisenbahnstrecke und durch die Energieverbräuche auf den Baustellen an den Eisenbahnstrecken. Hingegen 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 Schienenfahrzeuge und Waggons. Aufgrund der geringen Bedeutung für die THG-Emissionen ist dies aber vertretbar (siehe hierzu Kapitel 5.1).

Während die so berechneten Emissionen für die Wartung dem Betrachtungsjahr direkt zugeordnet werden können, ist dies beim Bau der Infrastruktur und dem rollendem Material 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 beispielsweise ein Schienenfahrzeug 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 Kapitel 2.3 aufgeführt.

Die Berechnung der THG-Emissionen der Schieneninfrastruktur wie auch von Fahrzeugen und Waggons, 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].

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. Ein Beispiel hierfür ist der Unterbau für viele Schienenstrecken. Die Erdarbeiten und das Erstellen der Bahndämme wurden teilweise bereits vor mehr als 100 Jahren durchgeführt, so dass streng genommen die ökologischen Folgen bereits abgeschrieben sind. Grundsätzlich gibt es drei Lösungswege:

1. Die Lebensdauer für diese Komponenten wird realistischer gewählt und die Umweltauswirkungen werden über einen längeren Zeitraum abgeschrieben (z. B. 150 Jahre).

2. Die Umweltauswirkungen dieser Komponenten werden in der aktuellen Bilanz nicht mehr berücksichtigt.
3. Es wird auch für diese Komponenten über die Standard-Lebensdauer 1/x der Emissionen in der THG-Bilanz für die Schieneninfrastruktur angerechnet, wohl wissend, dass damit die Emissionen überschätzt werden.

Im Rahmen dieser Studie wurde der dritte Weg gewählt, um zum einen die Varianten unterschiedlicher Lebensdauern begrenzt zu halten, zum anderen nicht für das gesamte deutsche Schienennetz 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.

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 Inputseite 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 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. Grundsätzlich sollten als Quellen für generische Daten die bisher vorliegenden Studien verwendet werden (z. B. [Maibach et al. 1999; Spielmann et al. 1996; Köser et al. 2002; Frischknecht/Stucki 2009; UIC 2010]). 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 Jahreshdurchschnittswerten 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 Schienenfahrzeugen wird 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 Schieneninfrastruktur,
- den Betrieb der Schieneninfrastruktur und
- die Herstellung und den Unterhalt der Schienenfahrzeuge und Waggons

entstehen. Damit fokussiert die Studie also auf alle Upstream-Prozesse, die bisher bei Umweltanalysen des Schienenverkehrs unberücksichtigt blieben (siehe Bild 2). Die THG-Emissionen des Betriebs werden in dieser Studie nicht explizit ermittelt, sondern aus dem Verkehrsemissionsmodell TREMOD übernommen [IFEU 2005; Richter 2010].

Der Bau und der Unterhalt bzw. die Instandhaltung der Schieneninfrastruktur 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 (z. B. zerstörte Oberleitung). Zum anderen wird aber auch oftmals unter Instandhaltungsmaßnahmen der Ersatz von Infrastruktur verbucht, deren Lebensdauer überschritten ist. So wird zum Beispiel der Schienenstrang meist nach 30 Jahren vollständig erneuert. Dieser Ersatz

ist aber bereits darüber berücksichtigt, dass für alle verbauten Materialien eine Lebensdauer unterstellt wird, über die der ökologische Rücksack 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 diese Zusammenhänge klarer aufzuzeigen, werden in dieser Studie Bau und Unterhalt gemeinsam behandelt (siehe Kapitel 3).

Neben dem Errichtungsaufwand des Bestandnetzes und die jährlichen Instandhaltungsmaßnahmen im engeren Sinne stellt sich die Frage nach der Berücksichtigung des Neubaus von Schieneninfrastruktur. Grundsätzlich handelt es sich bei der vorliegenden Studie um eine Bestandsaufnahme der Schieneninfrastruktur zu einem bestimmten Zeitpunkt (zum Bezugsjahr siehe unten). 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 Streckenstilllegungen kommen, würde diese Vorgehensweise zu Über- oder Unterschätzungen der realen THG-Emissionen der Schieneninfrastruktur führen, da die Zeitpunkte der realen Inbetriebnahme der einzelnen Schieneninfrastrukturen unberücksichtigt bleiben. Die Länge des deutschen Schienennetzes hat sich aber in den letzten Jahren nur unwesentlich verändert. So nahm das Netz im Jahr 2008 netto lediglich um rund 200 Strecken-km ab, was einer prozentualen Abnahme von knapp 0,5 % entspricht [StBA 2009b].

Prozesse im Detail

Nach den PCR for Railways sollten für den Bereich **Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur** folgende Einzelprozesse berücksichtigt werden (siehe auch Bild 3) [PCR 2009a]:

- Unterbau für Gleisbett: Erdbewegungen (Bodenaushub, Aufschüttungen) zur Erstellung einer ebenen Bahntrasse, Erstellung eines Planums für das Schienenbett
- Gleisbett (Oberbau): Schotter, Schwellen, Schienen und Weichen
- Kunstbauten: Tunnel, Eisenbahnbrücken
- Energieversorgung (ab öffentlichem Netz): Oberleitung, Oberleitungsmasten, Umspannstationen, Verteilerstationen, Leitungen
- Signal- und Telekommunikationstechnik: Signale, Kabel, Gebäude für Zugsicherung, Sendemasten, Kabel für Zugsicherung und Telekommunikation
- Gebäude: Bahnhöfe, Güter-Terminals, Instandhaltungswerke
- Sonstige Infrastruktur: Straßen zur Wartung der Schieneninfrastruktur, Kanalisation, Schallschutzwände und Zäune

Wie bereits ausgeführt, behandeln die PCR for Railways Betrieb und Unterhalt der Schieneninfrastruktur gemeinsam. Bezogen auf den **Betrieb der Schieneninfrastruktur** wird ausschließlich der Energieverbrauch für die Weichenheizungen benannt. Im Rahmen dieser Studie werden

- der Energieverbrauch von Bahnhöfen und Werken,
- die Weichenheizungen,
- die Zugvorheizungen und
- die sonstigen stationären Verbraucher (z. B. auch Verwaltungen, Umschlag in Terminals)

unter Betrieb der Schieneninfrastruktur verbucht (siehe Bild 3 und Kapitel 4).

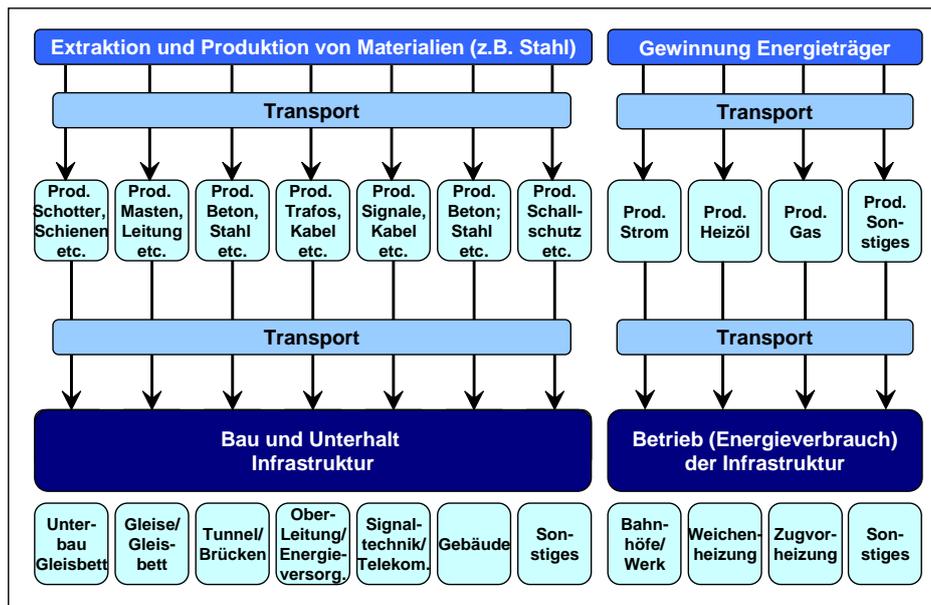


Bild 3: Schematischer Ablauf für die THG-Bilanz der Schieneninfrastruktur

Auf der Fahrzeugseite wird einerseits **die Herstellung und die Wartung der Schienenfahrzeuge sowie der Waggons** berücksichtigt. Aktuell werden für Schienenfahrzeuge eigene Product Category Rules erstellt (Product Category Rules for preparing an Environmental Product Declaration for rail vehicles [PCR 2009b]). Die dort aufgeführten Anforderungen sind allerdings für die Ziele dieser Studie zu detailliert. Basierend auf den Vorgaben der PCR for Railways wird ausschließlich eine orientierende Bilanz für die Lokomotiven, Triebfahrzeuge und Waggons erstellt (siehe Bild 4).

Nicht berücksichtigt werden entsprechend den Vorgaben der PCR for Railways:

- Straßen und Parkplätze an Bahnhöfen und Fracht-Terminals,
- Transporte von Personen und Gütern zu und von den Bahnhöfen und Fracht-Terminals,
- Herstellung von Produktionsanlagen und Fertigungsmitteln ebenso wie Aktivitäten von Personen.

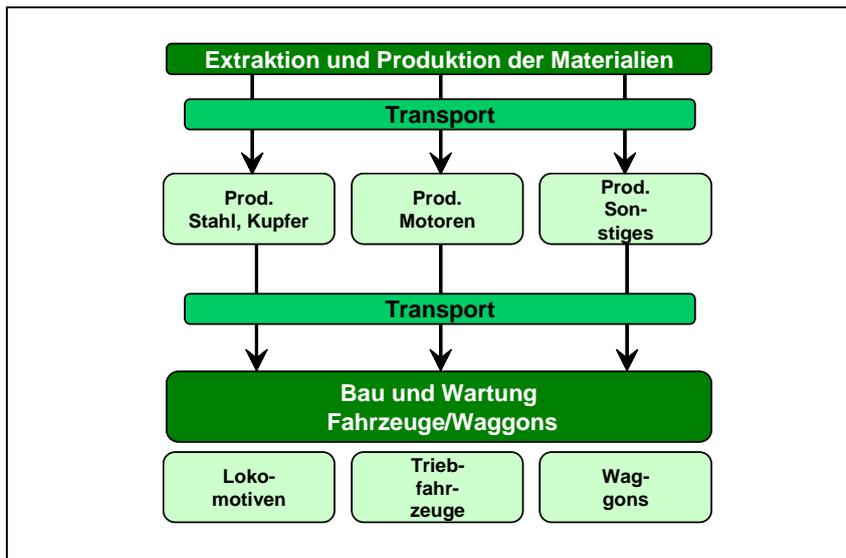


Bild 4: Schematischer Ablauf für die THG-Bilanz der Schienenfahrzeuge und Waggons

Überblick zu den Systemgrenzen

Die folgende Tabelle 1 fasst nochmals zusammen, welche Bereiche in der vorliegenden Studie bei der THG-Bilanzierung der Schieneninfrastruktur und -fahrzeuge berücksichtigt werden und welche nicht. Gleichzeitig wird durch Fettdruck aufgezeigt, welche Bereiche nach den PCR for Railways bilanziert werden sollten. Insbesondere im Bereich der sonstigen Infrastruktur werden hiervon einige Bereiche in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Überblick zu den Systemgrenzen

Bereich	Berücksichtigt in der Studie	Nicht berücksichtigt in der Studie
Bau und Unterhalt der Infrastruktur		
Unterbau für Gleisbett	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bodenaushub ▪ Aufschüttungen ▪ Planumsschutzschicht 	
Gleisbett (Oberbau)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schotter ▪ Schwellen ▪ Schienen und Weichen ▪ Befestigung Schienen 	
Kunstabauten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tunnel in geschlossener und offener Bauweise ▪ Eisenbahnbrücken 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßenbrücken
Energieversorgung (ab öffentlichem Netz)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oberleitung ▪ Oberleitungsmasten ▪ Umspannstationen ▪ Verteilerstationen ▪ Leitungen 	

Bereich	Berücksichtigt in der Studie	Nicht berücksichtigt in der Studie
Signal- und Telekommunikationstechnik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Signale ▪ Kabel ▪ Gebäude für Zugsicherung ▪ Kabel für Zugsicherung und Telekommunikation 	
Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bahnhöfe, ▪ Güter-Terminals ▪ Werke 	
Sonstige Infrastruktur		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen zur Wartung der Schieneninfrastruktur ▪ Kanalisation ▪ Schallschutzwände ▪ Zäune ▪ Straßen und Parkplätze an Bahnhöfen und Fracht-Terminals ▪ Herstellung von Produktionsanlagen und Fertigungsmitteln
Betrieb der Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weichenheizungen ▪ Energieverbrauch von Bahnhöfen ▪ Energieverbrauch von Werken, ▪ Zugvorheizungen ▪ sonstige stationäre Verbraucher 	
Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge/Waggons	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lokomotiven ▪ Triebfahrzeuge ▪ Waggons 	
Sonstiges		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transporte von Personen und Gütern zu und von den Bahnhöfen und Fracht-Terminals
<p>Fett gedruckt = Anforderung der Product Category Rules (PCR) for Railways. Quelle: Zusammenstellung des Öko-Instituts.</p>		

2.3 Allokation

Funktionale Einheit

Die THG-Emissionen durch Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge werden in dieser Studie für den Personennah- und Personenfernverkehr 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 Schieneninfrastruktur erfolgt auf die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr nach folgenden Schritten [PCR 2009a]:

1. Die berechneten Emissionen durch den Bau der gesamten Schieneninfrastruktur werden durch die Lebensdauer geteilt.

2. Zu den so ermittelten baubedingten jährlichen Emissionen werden 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 aller drei Verkehrsarten ergibt sich der Anteil der THG-Emissionen, der dem Güterverkehr zuzurechnen ist. Entsprechend wird auch für den Personennah- und Personenfernverkehr vorgegangen.
4. Die so ermittelten THG-Emissionen werden dann durch die jährlichen Verkehrsleistungen (Pkm oder tkm) der drei Verkehrsarten geteilt. 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 drei Verkehrsarten.

Betrieb der Infrastruktur

Die Energieverbräuche durch den Betrieb der Infrastruktur wurden von der Deutschen Bahn AG bereits auf die drei Verkehrsarten aufgeteilt und dem Öko-Institut entsprechend zur Verfügung gestellt. Eine weitergehende Allokation war in diesem Fall nicht notwendig. Da es sich beim Energieverbrauch durch den Betrieb der Infrastruktur bereits um jährliche Werte handelt, müssen lediglich die Energieverbrauchswerte und damit die THG-Emissionen durch die Verkehrsleistungen der jeweiligen Verkehrsarten geteilt werden.

Bau und Wartung der Schienenfahrzeuge und Waggons

Die Allokation der THG-Emissionen für Bau und Wartung des rollenden Materials auf die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr wird wie folgt durchgeführt:

1. Es werden für typische Zug-/Waggonkombinationen spezifisch für den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr die Emissionen für den Bau sowie für die Wartung während der gesamten Lebensdauer berechnet. Damit ist eine Aufteilung auf die drei Verkehrsarten nicht mehr nötig, da bereits die Emissionen auf Basis der typischen Zug-/Waggonkombinationen berechnet wurden. Die Emissionen beziehen sich damit auf einen typischen Durchschnittszug.
2. Die so pro Zug ermittelten Emissionen durch die Herstellung und Wartung werden dann durch die Lebensdauer der Schienenfahrzeuge bzw. Waggons geteilt.
3. Im letzten Schritt werden die jährlichen Emissionen durch die jährliche Fahrleistung und durch die durchschnittliche Fahrgastzahl bzw. Ladungszahl des Durchschnittszuges geteilt. Ergebnis sind THG-Emissionen pro Pkm bzw. tkm, differenziert nach den drei 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]. Für diese Studie wird im Basisfall mit einer Lebensdauer von 60 Jahren gerechnet, es wird aber auch eine Sensitivitätsrechnung mit einer Lebensdauer von 100 Jahre durchgeführt.

Neben den langlebigen Infrastrukturen gibt es auch Bestandteile, die eine kürzere Lebensdauer aufweisen (z. B. Schotter des Gleisbettes; Oberleitungen etc.). Für diese Bestandteile der Infrastruktur werden deshalb auch kürzere Lebensdauern verwendet, da sonst die Umweltwirkungen unterschätzt würden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Lebensdauern, die in dieser Studie verwendet wurden. Es kann für die einzelnen Module auch sein, dass einzelnen Komponenten (z. B. Oberleitung) kürzere Lebensdauern unterstellt wurden.

Tabelle 2: Überblick über die in dieser Studie verwendeten Lebensdauern

Bereich der Infrastruktur	Lebensdauer in Jahren	
	Basisbetrachtung	Sensitivitätsbetrachtung
Gleisunterbau	60	100
Schotterbett	15	x
Schienen	30	x
Schwellen	30-35	x
Tunnel	60	100
Brücken	60	100
Oberleitung/Energieversorgung	60	100
Fahrdraht	7-20	x
Signal-/Telekommunikationstechnik	60	100
Bahnhofsgebäude	60	100
Umschlag-Terminals	60	100
Werke	60	100
Schienenfahrzeuge	40	x
Waggons	40	x

Anmerkung: x = keine Sensitivitätsbetrachtung.
Quellen: eigene Zusammenstellung auf Basis von [PCR 2009a]; [Spielmann et al. 2007]; [Köser et al. 2002].

2.4 Datenquellen

Für die Berechnung der THG-Emissionen werden insbesondere in folgenden Bereichen Daten benötigt:

- Schieneninfrastruktur (Streckenlängen, Brücken- und Tunnellängen etc.),
- Verkehrsleistungen, die auf dem Netz erbracht werden,
- Materialmengen, die zum Bau und zur Wartung der Infrastruktur oder Fahrzeuge eingesetzt werden,
- Angaben zu den Transporten der eingesetzten Materialien,
- Energieverbräuche zum Betrieb der Infrastruktur und für Baustellen,
- spezifische Emissionsfaktoren für Materialien, Transporte und Energieträger (Strom, Wärme).

Im Folgenden wird ausgeführt, welche Quellen für die benötigten Daten in dieser Studie verwendet wurden. **Bezugsjahr** der Daten ist dabei das Jahr **2008**. Während Daten zur Verkehrsleistungen sich auf das gesamte Jahr 2008 beziehen, handelt es sich bei der betrachteten Schieneninfrastruktur um diejenige, auf der im Jahr 2008 Verkehre abgewickelt werden konnte (d.h. inkl. ggf. stillgelegte bzw. neu eröffnete Strecken).

Daten zur Infrastruktur und zur Verkehrsleistung

Für die Berechnung der Umweltauswirkungen durch Bau, Wartung und Betrieb der Schieneninfrastruktur sind detaillierte Daten für das Schienennetz in Deutschland notwendig. Des Weiteren kommt hinzu, dass zur Allokation der Umweltwirkungen zusätzlich Angaben zur Verkehrsleistung (Pkm, tkm) sowie zu den Bruttoleistungskilometern, differenziert nach Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr, benötigt werden. Diese Daten liegen nicht publiziert vor.

Aus diesem Grund hat das Öko-Institut für diese Fragen mit dem DB Umweltzentrum in diesem Gutachten zusammengearbeitet, dem entsprechende Detaildaten für das Netz der Deutschen Bahn AG vorliegen [DB 2009a]. Die Daten liegen differenziert für insgesamt 7.500 Einzelstreckenabschnitte vor (z. B. Flensburg bis Flensburg Süd: Streckenlänge 1.686 m). Die Einzelstreckenabschnitte sind so festgelegt, dass immer dann ein neuer Abschnitt beginnt, wenn sich eine Größe wesentlich ändert (i. d. R. Änderungen der Zugzahlen auf dem Streckenabschnitt). Das besondere an diesem Datensatz ist, dass dieser nicht nur die benötigten Infrastrukturangaben, sondern auch dazu passend Angaben zur Zugbelegung der einzelnen Streckenabschnitten enthält. Mit Hilfe dieser Daten konnten dann für jeden Streckenabschnitt die Zug-Kilometern sowie die Brutto-Tonnenkilometern differenziert nach den drei oben aufgeführten Zugarten berechnet werden. Zudem konnten für die Züge der DB AG auch die Verkehrsleistungen (Pkm bzw. tkm) berechnet werden. Weiterhin enthält der Datensatz für jeden Streckenabschnitt des Netzes der DB AG Angaben zur Belegung der Streckenabschnitte mit Zügen von Nichtbundeseigenen Eisenbahnen (so genannte NE-Bahnen). Als Kenngrößen zur Charakterisierung der Schieneninfrastruktur enthält der Datensatz pro Streckenabschnitt folgende Daten [DB 2009a]:

- Eindeutige Streckennummer,
- Streckenlänge,

- Maximale Streckengeschwindigkeit,
- Anzahl der Gleise,
- Streckenkategorie (FPlus, F1-6, Z1-2),
- 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),
- Zugbelegung differenziert nach Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr sowie nach DB AG und NE-Bahnen.

Die Berechnung der CO₂- und THG-Emissionen für die Schieneninfrastruktur erfolgt in diesem Gutachten auf Basis dieser Einzelstreckenabschnitte des Netzes der DB AG, da somit über Zugbelegungen und die daraus berechneten Brutto-Tonnenkilometer eine genaue Allokation der Umweltauswirkungen auf die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr möglich ist. Zudem ermöglicht diese Vorgehensweise Detailauswertungen auch für Teilnetze (z. B. für Mittelgebirgslagen, für das Hochgeschwindigkeitsnetz, für Bundesländer). Im Rahmen dieses Gutachtens werden aber ausschließlich aggregierte Daten für das Gesamtnetz Deutschlands oder für interessante Detailnetze dargestellt, da aus Datenschutzgründen die Publikation der Einzelstreckendaten nicht möglich ist.

Die Vorgehensweise ermöglicht somit eine detaillierte und umfassende THG-Bilanz für das Streckennetz der DB AG. Allerdings wird mit dem vorliegenden Datensatz nicht das vollständige Schienennetz in Deutschland erfasst (siehe Bild 5). Von den insgesamt rund 73.000 Kilometern Gleisen (ohne S-Bahn Berlin und Hamburg sowie U- und Straßenbahnen) werden derzeit 87 % von der DB AG betrieben (Stand: 31.2008) [DB 2009d; StBA 2009b, Bundesnetzagentur 2010].⁴ Für diesen Teil der Schieneninfrastruktur sind über den Datensatz des DB Umweltzentrums Detaildaten vorhanden. Rund 11 % bzw. 7.800 km werden aber von anderen öffentlichen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) betrieben und von 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 stehen damit für die Berechnung der Infrastruktur-bedingten THG-Emissionen keine Detaildaten analog zum DB-Netz zur Verfügung. Aus diesem Grund werden in diesem Gutachten in

⁴ Unberücksichtigt bleiben die S-Bahnen Berlin und Hamburg, die eigene Streckennetze besitzen und im Rahmen der Studie nicht berücksichtigt werden (rund 850 Gleis-km) [DB 2009d].

einem ersten Schritt die THG-Emissionen für das DB-Netz detailliert ermittelt (siehe Kapitel 3.8). In einem zweiten Schritt werden dann die Ergebnisse des DB-Netzes auf das restliche Schienennetz übertragen, wobei die Angaben zu den auf diesen Netzen erbrachten Verkehrsleistungen berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.9).

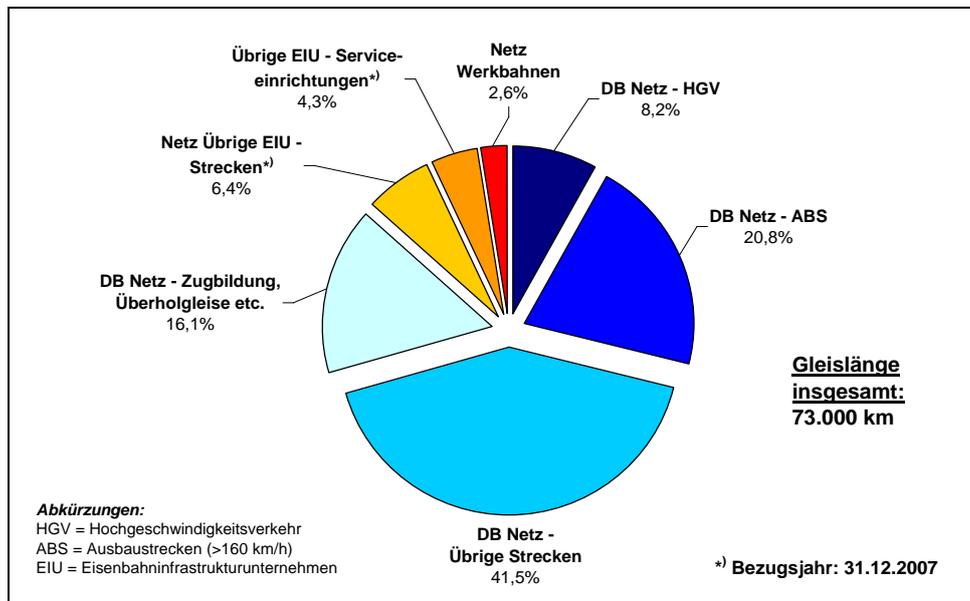


Bild 5: Gleislängen der Schieneninfrastruktur in Deutschland (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg) zum 31.12.2008 (öffentliches Netz der übrigen EIU: 31.12.2007) [StBA 2009b; DB 2009d; Bundesnetzagentur 2010; VDV 2009]

Materialmengen, Transportleistungen und Energieverbräuche

Die Herleitung der verwendeten Materialmengen, der benötigten Transportleistungen und der verbrauchten Energiemengen für Schieneninfrastruktur und -fahrzeuge wird in den nächsten Kapiteln 3 bis 5 ausführlich beschrieben. Wie von den PCR for Railways gefordert, werden hierbei spezifische Daten aus bereits vorliegenden Untersuchungen als Datenbasis verwendet [Maibach et al. 1999; Spielmann et al. 1996; Köser et al. 2002; Frischknecht/Stucki 2009; UIC 2010]. Angaben zu den Transporten im Zusammenhang mit dem Bau und der Wartung der Schieneninfrastruktur sind ebenfalls in diesen Studien enthalten. I. d. R. werden diese Angaben in dieser Studie übernommen und durch weitere Quellen ergänzt. Die Energieverbräuche für den Betrieb der Schieneninfrastruktur werden von der DB AG zu Verfügung gestellt [DB 2009b].

Emissionsfaktoren für Materialien

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 3 aufgeführt. In der Regel handelt es sich dabei um durchschnittliche Produktionsmixe 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).

Tabelle 3: CO₂- und THG-Emissionsfaktoren für verschiedene Materialien

Material	Einheit	CO₂	CO₂-Äquivalente
Sand, ab Werk	kg/kg	0,002	0,002
Kies, zerkleinert, ab Mine	kg/kg	0,004	0,004
Kalkstein, ab Mine	kg/kg	0,002	0,002
Zement, unspezifiziert, 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	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, ab Werk	kg/kg	0,223	0,233
Polyethylen (HDPE), Granulat, ab Werk	kg/kg	1,574	1,929
Polyvinylchlorid (PVC), ab Werk	kg/kg	1,834	1,967
Glasfaserverstärkter 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

Quelle: ecoinvent v2.1 [ecoinvent 2009].

Transporte

Für die Transporte wurden für diese Studie spezifische CO₂- und THG-Emissionsfaktoren pro Tonnenkilometer aus dem Verkehrsemissionsmodell TREMOD Version 4.17 entnommen [Gohlisch 2008]. 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.

Tabelle 4: 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 2007

Fahrzeugtypen	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	g/tkm	g/tkm
Solo-Lkw zGG ≤ 7,5 t	366,4	371,9
Solo-Lkw z GG > 7,5-12 t	311,2	314,9
Solo-Lkw zGG >12-14 t	256,5	259,6
Solo-Lkw zGG >14-20 t	229,2	231,6
Solo-Lkw zGG >20-26 t	223,0	225,1
Solo-Lkw zGG >26 t	199,3	201,1
Last-/Sattelzug/AT zGG ≤ 28 t	174,5	176,4
Last-/Sattelzug/AT zGG >28-34 t	109,1	110,2
Last-/Sattelzug/AT zGG >34-40 t	82,5	83,2
Bahn	26,7	28,6

zGG = zulässiges Gesamtgewicht
Quelle: TREMOD v4.17 [Gohlisch 2008].

Energieverbräuche

Für die Berechnung der CO₂- und THG-Emissionen durch den Strom- und Wärmeverbrauch werden für dieses Gutachten spezifische Emissionsfaktoren aus dem Energie- und Stoffstrommodell Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS Version 4.5) entnommen. GEMIS wurde im Auftrag verschiedener Bundes- und Landesministerien vom Öko-Institut entwickelt und ist über die Internetseite www.oeko.de/service/gemis/ kostenlos verfügbar. Die in dieser Studie verwendeten Emissionsfaktoren sind in Tabelle 5 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.

Tabelle 5: CO₂- und THG-Emissionen für die verwendeten Energieträger

Energie	Einheit	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
Strom - Mittelspannung	g/kWh _{el}	613,9	639,6
Erdgas	g/kWh	226,7	254,4
Fernwärme	g/kWh _{th}	228,8	243,8
Heizöl	kg/Liter	3,15	3,19
Flüssiggas	kg/Liter	1,89	1,93
Quelle: GEMIS 4.5 [Fritsche et al. 2008].			

Für die Herstellung des Unterbaus sind Erdarbeiten notwendig. Zum Ausheben der Erdmassen werden i. d. R. Bagger eingesetzt, zum Verfüllen der Baugruppe oftmals Planiertraupen. Die Energieverbräuche dieser Fahrzeuge werden pro Stunde angegeben. Unter der Annahme, dass pro Stunde rund 75 m³ 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 6 enthalten. Quelle der Daten ist die Ökobilanzdatenbank ecoinvent.

 Tabelle 6: 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	038
Planiertraupe	kg/m ³ Erde	0,49	0,49
Quellen: ecoinvent v2.1 [ecoinvent 2009]; [UIC 2010].			

3 Daten und Ergebnis für die Schieneninfrastruktur (Bau und Unterhalt)

3.1 Unterbau der Schienentrasse

Der prinzipielle Aufbau eines Bahnkörpers ist in Bild 6 dargestellt. Sind keine Kunstbauten wie Tunnel oder Brücken vorhanden, besteht der Unterbau einer Schienentrasse aus einer Foundationsschicht aus Kies und Sand – auch als Planum bezeichnet – und dem vorhandenen Boden (Untergrund). Oftmals macht aber die Trassenführung notwendig, dass Eisenbahndämme aufgeschüttet oder Einschnitte in den Untergrund gegraben werden müssen. Im Folgenden werden die THG-Emissionen für Bau und Wartung der Planumsschicht sowie die THG-Emissionen, bedingt durch die Erdarbeiten zum Graben von Einschnitten oder Aufschütten von Dämmen, bestimmt.

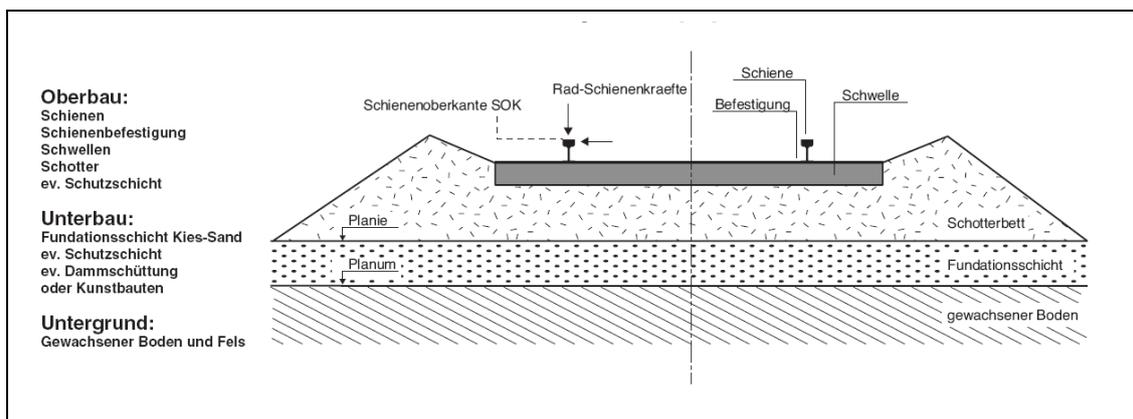


Bild 6: Prinzipieller Aufbau des Bahnkörpers [Kohler 2002]

Planum

Die Foundationsschicht aus Kies-Sand dient einerseits dazu, dass das Niederschlagswasser vom Untergrund ferngehalten wird. Zum anderen dient sie als Frostschutz [Fiedler 2005]. In der Regel wird sie als 40 cm dicke Schicht ausgeführt. Die Breiten der Planumsschicht sind bei Neubaustrecken 8,60 m für eingleisige und 13,30 m für zweigleisige Bauausführungen. Bei Ausbaustrecken betragen die entsprechenden Breiten 6,60 m bzw. 11,00 m [Fiedler 2005].

Für diese Studie wurden diese Breiten sowie eine Schichthöhe von 40 cm für die Berechnungen zugrunde gelegt. Die Werte für Ausbaustrecken wurden für alle Strecken außer den Neubaustrecken verwendet. Mit der Dichte für Kies-Sand von 2,80 t/m³ kann somit der Materialbedarf pro Streckenkilometer für ein- und zweigleisige Strecken ermittelt werden. Diese Werte sind in Tabelle 7 ausgewiesen. Ausgehend von einer Lebensdauer von 60 Jahren für das Planum wurde der jährliche Errichtungsaufwand berech-

net. Für die Materialaufwände für die Instandhaltung der Planumsschicht liegen keine Daten vor, weshalb dieser Teil in dieser Studie unberücksichtigt bleibt.

Tabelle 7: Verbrauch an Kies-Sand für Bau und Unterhalt der Planumsschicht, differenziert nach Neubaustrecken und übrigen Strecken

	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>
1-gleisige Strecke					
- Neubaustrecke	t	9.632	160,5	0,0	160,5
- Übrige Strecken	t	7.392	123,2	0,0	123,2
2-gleisige Strecken					
- Neubaustrecken	t	14.896	248,3	0,0	248,3
- Übrige Strecken	t	12.320	205,3	0,0	205,3
Quellen: [Fiedler 2005]; [Köser et al. 2002]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Für die Berechnung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau wurden die in Tabelle 7 aufgeführten Werte mit dem Emissionsfaktor für Kies-Sand (siehe Kapitel 2.4) verknüpft. Zusätzlich zu den materialbedingten THG-Emissionen wurden die Emissionen durch den Transport der Planumsschicht zur Baustelle und den anschließenden Abtransport des Kies-Sandes nach Ende der Lebensdauer berücksichtigt. Für diese Transporte wurden Bahntransporte über eine Entfernung von 20 km angesetzt [Köser et al. 2002].

Erdarbeiten

Wie bereits ausgeführt, sind für das möglichst steigungsarme Verlegen der Schienentrasse Einschnitte und Aufschüttungen notwendig. Laut Systra Conseil [UIC 2010] werden für Neubaustrecken durchschnittlich pro zweigleisigen Streckenmeter rund 180 m³ Erde ausgehoben und 135 m³ verfüllt. Für die übrigen zweigleisigen Strecken wurden basierend auf Daten von Köser et al. [2002] ein Aushub von rund 75 m³/m und eine Verfüllmenge von 25 m³/m ermittelt. Für die Berechnung der ausgehobenen und verfüllten Erdmassen für eine eingleisige Strecke wurde angenommen, dass diese 60 % einer zweigleisigen Strecke entsprechen.

Auf Basis der Daten wurden in dieser Studie die mit diesen Erdbewegungen verbundenen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen, verursacht durch die eingesetzten Baumaschinen, ermittelt. Dabei wurde für das Ausbaggern der Erde angenommen, dass diese Arbeiten zu 70 % von Baggern und zu 30 % von Planierraupen durchgeführt werden. Beim Verfüllen wurden genau umgekehrte Verhältnisse angenommen [UIC 2010]. Die für die Bagger und Planierraupen verwendeten Emissionsfaktoren sind in Kapitel 2.4 aufgeführt. Zusätzlich wurde der Ab- und Antransport der Erdmassen berücksichtigt. Basierend auf den Angaben von Systra Conseil [UIC 2010] wurde jeweils ein Bahntransport über eine Strecke von einem Kilometer unterstellt.

CO₂- und THG-Emissionen

Die mit dem Bau der Planumsschicht und den Erdarbeiten zur Erstellung von Bahndämmen und Einschnitten verbundenen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer können bei einer unterstellten Lebensdauer von 60 Jahren der Tabelle 8 entnommen werden. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer liegen mit rund 3,5 t/a für eine eingleisige Strecke und 5,6 t/a für eine zweigleisige Strecke fast doppelt so hoch wie für übrige Strecken (Bestandsstrecken).

Tabelle 8: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Erstellung und Instandhaltung des Unterbaus für ein- und zweigleisige Strecken, differenziert nach Streckentyp (Lebensdauer: 60 Jahre)

	Eingleisig		Zweigleisig	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Neubaustrecke	3,4	3,5	5,5	5,6
Planum	1,6	1,6	2,4	2,5
Erdarbeiten	1,9	1,9	3,1	3,2
Übrige Strecken	1,8	1,8	3,0	3,0
Planum	1,2	1,2	2,0	2,1
Erdarbeiten	0,6	0,6	1,0	1,0

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.

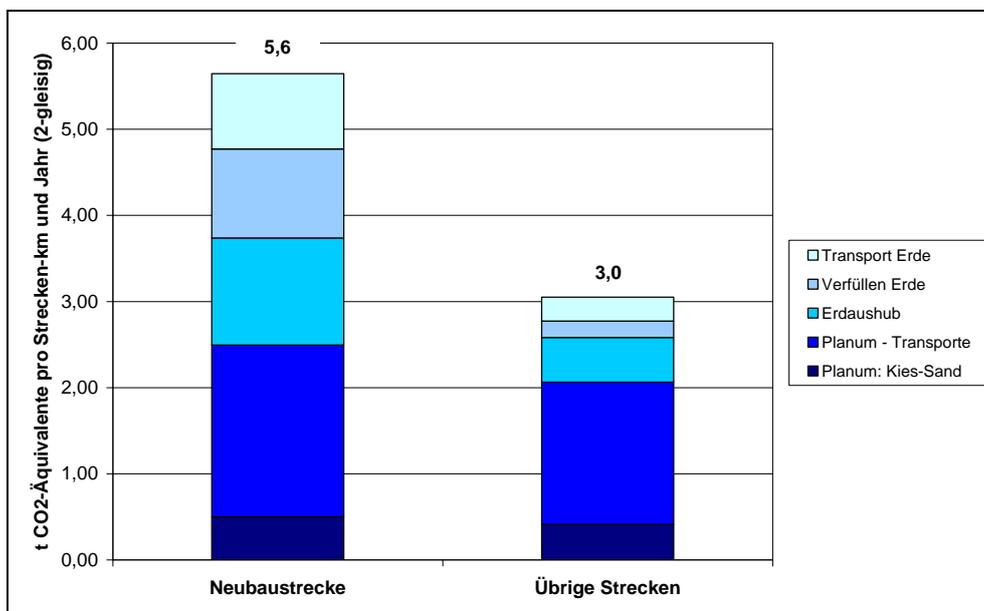


Bild 7: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Herstellung und Wartung des Unterbaus zweigleisiger Strecken, differenziert nach Art der Strecke und Verursachergruppen [Berechnungen des Öko-Instituts]

Bild 7 zeigt für eine zweigleisige Strecke die CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Bau und Wartung des Unterbaus, differenziert nach Verursachern. Die materialbedingten THG-Emissionen durch den Einsatz des Kies-Sandes sind sowohl für die Neubaustrecke als auch für die übrigen Strecken gering (rund 10 % der Gesamtemissionen). Stark emissionsrelevant sind die Transporte des Kies-Sandes zur Baustelle. Bei Neubaustrecken entfallen rund ein Drittel und bei den übrigen Strecken mehr als die Hälfte der Emissionen auf diesen Bereich. Die Erdarbeiten und die damit verbundenen Transporte spielen insbesondere bei Neubaustrecken eine große Rolle. Auf diese Bereiche entfällt dort mehr als die Hälfte der Emissionen für den Bereich des Unterbaus. Bei den übrigen Strecken entfällt auf diese Bereiche rund ein Drittel der Emissionen.

Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse für die Erstellung und Instandhaltung des Unterbaus unter Berücksichtigung einer Lebensdauer von 100 Jahren, wie sie im Rahmen der Sensitivitätsberechnungen (siehe Kapitel 6.2) verwendet werden. Die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen reduzieren sich dabei für jeden Streckentyp auf 60 % der Emissionen des 60-Jahre-Falles (siehe Tabelle 8).

Tabelle 9: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Erstellung und Instandhaltung des Unterbaus für ein- und zweigleisige Strecken differenziert nach Streckentyp für die Lebensdauer von 100 Jahren (Sensitivitätsberechnung)

	Eingleisig		Zweigleisig	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Neubaustrecke	2,1	2,1	3,3	3,4
Planum	0,9	1,0	1,5	1,5
Erdarbeiten	1,1	1,1	1,9	1,9
Übrige Strecken	1,1	1,1	1,8	1,8
Planum	0,7	0,7	1,2	1,2
Erdarbeiten	0,4	0,4	0,6	0,6
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.				

3.2 Oberbau der Schienentrasse

Der Oberbau besteht – wie in Bild 6 gezeigt – i. d. R. aus Schienen, Schwellen, Befestigungsmitteln und Schotterbett. Um höhere Achslasten und Geschwindigkeiten zu ermöglichen, werden in jüngster Zeit auch verschiedene Formen des schwellen- und schotterlosen Oberbaus, die so genannten „Festen Fahrbahnen“ eingesetzt. Derzeit sind im Schienennetz rund 800 km Feste Fahrbahnen vorhanden, was rund 1,4 % des DB-Netzes entspricht [Fiedler 2005; DB 2009]. Im Folgenden werden in dieser Studie die benötigten Materialmengen für Bau und Wartung des Schienenstranges in Schotterbauweise ermittelt. Abschließend wird auf die Feste Fahrbahnen eingegangen. Un-

berücksichtigt bleiben bei der folgenden Betrachtung Weichen. Die verfügbare Datengrundlage [z. B. Köser et al. 2002 oder UIC 2010] ist so unzureichend, dass auf eine Berücksichtigung in dieser Studie verzichtet wurde. Die Analysen von Systra Conseil [UIC 2010] zeigen zudem den geringen Einfluss der Weichen auf das Gesamtergebnis der THG-Emissionen.

Schienen

Schienen werden in Europa aus Flusstahl nach dem Sauerstoffblasverfahren hergestellt [Fiedler 2005; Fendrich 2007]. Elektro Stahl mit hohen Anteilen an Sekundärstahl kommt bei der Schienenherstellung nicht zum Einsatz. Für die Berechnungen in diesem Gutachten wird daher der Prozess „Stahl, Konverter“ mit hohen Anteilen an Primärstahl verwendet.

Relevant für die verbauten Materialmengen sind die eingesetzten Schienenprofile in Deutschland, die sich im spezifischen Gewicht in kg/m unterscheiden (siehe Tabelle 10). Der Datensatz der DB AG unterscheidet die Schientypen, so dass die verschiedenen Materialmengen pro Schienenkilometer in Abhängigkeit vom Schientyp in die Berechnungen eingehen. Im Schienennetz der DB AG (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg) dominiert mit rund 36 % die S 54-Schiene. Rund 34 % der Gleiskilometer entfallen auf den Schienenprofiltyp UIC 60 und rund 23 % auf den Schienenprofiltyp S 49. Ca. 5 % sind sonstige Schientypen und für 2 % liegen keine Angaben zum Schientyp vor [DB 2009a]. Die letzten beiden Gruppen werden bei der Berechnung der THG-Emissionen bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten über 160 km/h wie Schienen des Typs UIC 60 behandelt, unter dieser Geschwindigkeit als S 54.

Tabelle 10: Schienenprofile und deren Metergewichte

	Einheit	S 49	S 54	UIC 60
Querschnitt	mm ²	6297	6947	7686
Stahl pro Schiene	kg/m	49,43	54,54	60,34
Stahl - eingleisige Strecke	t/Gleis-km	98,86	109,08	120,68
Stahl – zweigleisige Strecke	t/Gleis-km	197,72	218,16	241,36
Quellen: [DB 2009a]; [Fendrich 2007].				

Tabelle 11 gibt einen Überblick über den jährlichen Stahlverbrauch für die drei Schientypen pro Streckenkilometer. Die Berechnungen basieren auf einer Lebensdauer der Schienen von 30 Jahren [Köser et al. 2002]. Der Instandhaltungsaufwand liegt bei 0,5 m Schiene pro eingleisigen Strecken-Kilometer. Der sich daraus ergebende jährliche Stahlaufwand ist ebenfalls in Tabelle 11 enthalten [Köser et al. 2002]. Auf Basis der sich insgesamt ergebenden jährlichen Stahlverbräuche wurden die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Jahr und Streckenkilometer berechnet. Zusätzlich wurde dabei berücksichtigt, dass die Schienen zum Einbau über eine Strecke von 400 km mit der Bahn transportiert werden [Köser et al. 2002]. Zusätzlich wurde entsprechend ein Abtransport der Schienen nach Ende der Lebensdauer berücksichtigt.

Tabelle 11: Stahlverbrauch für Bau und Unterhalt der Schienen, differenziert nach Schienentypen

Schienentyp	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
1-gleisige 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
2-gleisige 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]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Schwellen

Im Schotterbett werden Schienen im Allgemeinen auf folgenden Schwellentypen verlegt [Matthews 2007; Werner 2008]:

- Betonschwellen,
- Holzschwellen oder
- Stahlschwellen

Im Netz der DB AG (ohne Anteil Fester Fahrbahnen und S-Bahnen Berlin und Hamburg) entfallen 2008 rund 75 % der Gleiskilometer auf Betonschwellen und rund 16 % auf Holzschwellen. 7 % der Gleise sind mit Stahlschwellen ausgestattet. Unter 2 % der Schwellen sind sonstige Schwellentypen bzw. nicht zuzuordnende Schwellentypen [DB 2009a]. Diese Zahlen belegen die hohe Bedeutung der Betonschwellen im Bestandsnetz der DB AG. Sonstige Schwellen und Strecken ohne Angaben werden für die Berechnung der THG-Emissionen bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit über 160 km/h den Betonschwellen, unter dieser Geschwindigkeit den Holzschwellen zugeordnet.

In Deutschland werden fast ausschließlich **Spannbeton-Einblockschwellen** des Typs B 70 verlegt.⁵ Diese 2,60 m langen Betonschwellen wiegen ohne Befestigung 280 kg, wovon rund 2,5 % auf den Bewehrungsstahl entfallen (7 kg pro Schwelle) [Werner 2008]. Das verbaute Betonvolumen beträgt 114 Liter [ThyssenKrupp 2006]. Bei einem üblichen Schwellenabstand von 60 cm ergeben sich damit pro eingleisigen Streckenkilometer 455 Tonnen Beton bzw. 11,7 Tonnen Bewehrungsstahl. Das Volumen des ver-

⁵ In der Schweiz und Frankreich kommen auch Zweiblockschwellen zum Einsatz. Die beiden Betonschwellen in diesem System sind mit einem Spurhalter aus einem L- oder T-förmigen Stahlprofil miteinander verbunden.

bauten Betons beläuft sich somit auf 190 m³ pro Gleis-km. Für eine zweigleisige Strecke belaufen sich die Materialmengen auf 910 Tonnen bzw. 380 m³ Beton und 23,3 Tonnen Bewehrungsstahl.

Nach Köser et al. [2002] werden für zweigleisige Strecken 1.000 Tonnen Beton und 40 Tonnen Stahl pro Kilometer benötigt. Nach Systra Conseil [UIC 2010] liegen die Werte bei zweigleisigen Hochgeschwindigkeitsstrecken bei 213 m³ Beton und 133 Tonnen Stahl. Der berechnete Stahlanteil, der auf Basis der Angaben von Werner [2008] ermittelt wurde, liegt im Vergleich zu den anderen Studien tendenziell niedriger, wird aber dennoch in dieser Studie zugrunde gelegt, da dieser Wert im Rahmen einer detaillierten Ökobilanz zu Schwellentypen ermittelt wurde.

Im Bereich der **Holzschwellen** kommen überwiegend Harthölzer wie Eichen- und Buchenhölzer zum Einsatz [Matthews 2007]. Seit den 1960er Jahren werden aber in Deutschland fast nur noch Buchenschwellen verwendet [Lewark 1991]. Aus diesem Grund wird für die Bilanz der Einsatz von Buchenschwellen zugrunde gelegt. Das Volumen einer Buchenschwelle mit 2,6 m Länge liegt nach Werner [2008] bei 0,108 m³. Aufgrund der Verarbeitungsschritte wird jedoch für die Herstellung der Schwellen eine Buchenholzmenge von 0,225 m³ benötigt (= 153 kg/Schwelle). Um die Haltbarkeit der Holzschwellen zu erhöhen, werden Holzschwellen nach dem Doppel-Rüping-Verfahren mit Teeröl imprägniert [Matthews 2007]. Nach Werner [2008] nehmen Buchenschwellen rund 130 kg Teeröl pro m³ auf – pro Schwelle ergibt sich damit nochmals eine Teerölmenge von 14 kg Teeröl pro Schwelle. Umgerechnet auf eine eingleisige Strecke (Abstand 60 cm) ergibt sich pro Gleis-km damit ein Verbrauch von 375 m³ Buchenholz und von 23,4 Tonnen Teeröl. Eine zweigleisige Strecke benötigt pro Kilometer damit 750 m³ Buchenholz und 46,8 Tonnen Teeröl.

Bei den **Stahlschwellen** sind so genannte Trogswellen und Y-Swellen zu unterscheiden. Trogswellen werden aber seit Beginn der 1980er Jahre nicht mehr eingesetzt [Matthews 2007; Fiedler 2005]. Y-Stahlschwellen wiegen 143 kg. Für einen Kilometer Gleislänge werden bei einem Abstand der Schwellen von 60 cm 803 Y-Swellen benötigt. Insgesamt ergibt sich damit pro Kilometer Strecke ein Stahlbedarf von 114,8 t bei einer eingleisigen Strecke und 229,7 t bei einer zweigleisigen Strecke [Thyssen-Krupp 2006]. Trogswellen wiegen 73,8 kg/Schwelle. Bei einem Verlegabstand von 60 cm ergeben sich somit 123,0 Tonnen Stahl/km für eingleisige Strecken und 246,0 Tonnen Stahl/km für zweigleisige Strecken [Werner 2008]. Für die weiteren Berechnungen werden beide Stahlschwellentypen zu je 50 % berücksichtigt.

Tabelle 12 fasst die Ergebnisse für die verschiedenen Schwellentypen zusammen. Für die Berechnung der jährlichen Errichtungsaufwände wird für Stahl- und Holzschwellen eine durchschnittliche Lebensdauer von 30 Jahren, für Betonschwellen von 35 Jahren angenommen [Werner 2008]. Für die Instandhaltung wird ein jährlicher Ersatzbedarf von einer Schwelle pro 2 km eingleisiger Bahnstrecke unterstellt [Köser et al. 2002]. Der sich daraus ergebende jährliche Instandhaltungsbedarf ist ebenfalls in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Materialaufwand für Bau und Unterhalt von Bahnschwellen, differenziert nach Schwellentypen

Schwellentyp	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
1-gleisige Strecke					
- Betonschwelle					
Beton	m ³	190,0	5,43	0,06	5,49
Bewehrungsstahl	t	11,7	0,33	0,00	0,34
- Holzschwelle					
Buchenholz	m ³	375,0	12,50	0,11	12,61
Imprägnieröl	t	23,4	0,78	0,01	0,79
- Stahlschwelle					
Stahl, Konverter	t	118,9	3,96	0,05	4,02
2-gleisige Strecken					
- Betonschwelle					
Beton	m ³	380,0	10,86	0,11	10,97
Stahl	t	23,3	0,67	0,01	0,67
- Holzschwelle					
Holz	m ³	750,0	25,00	0,23	25,23
Imprägnieröl	t	46,8	1,56	0,01	1,57
- Stahlschwelle					
Stahl	t	237,8	7,93	0,11	8,04
Quellen: [Werner 2008]; [Köser et al. 2002]; [ThyssenKrupp 2006]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Auf Basis der jährlichen Materialverbräuche werden wiederum durch die Verknüpfung mit den materialeitigen Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 2.4) die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen berechnet. Hierbei wird für den Stahl in Betonschwellen der Prozess „Bewehrungsstahl“ zugrunde gelegt, für Stahlschwellen „Stahl aus dem Konverter“ mit hohem Primärstahlanteil. Zusätzlich zu den materialbedingten Emissionen wurden noch die Emissionen durch die Transporte der Schwellen berücksichtigt. Hierbei wurde von einem Bahntransport über eine Distanz von 300 km ausgegangen. Für die Demontage der Schwellen nach dem Ende der Lebensdauer wird wiederum ein entsprechender Transport berücksichtigt. In der Bilanz unberücksichtigt bleiben die THG-Emissionen, die durch die Herstellung der Schwellen in der Fabrik entstehen (z. B. Imprägniervorgänge bei Holzschwellen). Grundsätzlich sind diese Daten verfügbar [Werner 2008], sind aber in dieser Studie zu weitführend, da auch an anderen Stellen Verarbeitungsprozesse unberücksichtigt bleiben (z. B. Herstellung von Signalen).

Befestigung der Schienen auf den Schwellen

Die Materialmengen für die Befestigung der Schienen auf den Schwellen hängen vom Schwellentyp ab [Fiedler 2005; Werner 2008]. Nach Werner [2008] werden bei einem

Verlegabstand von 60 cm für Betonschwellen rund 7,7 kg Eisenteile und 2,0 kg Kunststoffteile (als Zwischenlagen) pro Meter eingleisiger Schienenstrecke eingesetzt. Köser et al. [2002] gehen von 20 kg Eisenteilen pro Meter eingleisiger Strecke aus. Systra Conseil [UIC 2010] führen für eingleisige Hochgeschwindigkeitsstrecken einen Wert von 13,3 kg Eisenteilen pro Meter an. Für diese Studie werden die Werte von Werner [2008] zugrunde gelegt, da diese Quelle auch Angaben zu den anderen Schwellenarten enthält.

Tabelle 13: Materialaufwand für Bau und Unterhalt von Schienenbefestigungen, differenziert nach Schwellentypen

Schwellentyp	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
1-gleisige Strecke					
- Betonschwelle					
Eisenteile	t	7,7	0,22	0,00	0,22
Kunststoffteile (PE)	t	2,0	0,06	0,00	0,06
- Holzschwelle					
Eisenteile	t	43,2	1,44	0,01	1,45
Kunststoffteile (PE)	t	0,4	0,01	0,00	0,01
- Stahlschwelle					
Eisenteile	t	9,1	0,30	0,00	0,31
Kunststoffteile (PE)	t	0,4	0,01	0,00	0,01
2-gleisige Strecken					
- Betonschwelle					
Eisenteile	t	15,3	0,44	0,00	0,44
Kunststoffteile (PE)	t	4,0	0,12	0,00	0,12
- Holzschwelle					
Eisenteile	t	86,4	2,88	0,03	2,91
Kunststoffteile (PE)	t	0,9	0,03	0,00	0,03
- Stahlschwelle					
Eisenteile	t	18,3	0,61	0,01	0,61
Kunststoffteile (PE)	t	0,9	0,03	0,00	0,03
Quellen: [Werner 2008]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Im Vergleich zu Betonschwellen werden für Holzschwellen pro eingleisigen Streckenmeter mit 43,2 kg Eisenteilen und 0,4 kg Kunststoffteilen deutlich höhere Materialmengen benötigt. Für Stahlschwellen ergeben sich für eingleisige Strecken Werte von 9,1 kg Eisenteilen und 0,4 kg Kunststoffteilen pro Meter [Werner 2008]. Tabelle 13 fasst die Ergebnisse des Errichtungsaufwandes für die drei Schwellentypen pro Streckenkilometer nochmals zusammen. Für die Umrechnung des jährlichen Errichtungsaufwandes wurden die Lebensdauern der Schwellen zugrunde gelegt (Holz- und Stahlschwellen).

len: 30 Jahre, Betonschwellen: 35 Jahre). Der Materialaufwand für Instandhaltungsmaßnahmen wurde analog zu den Schwellen ermittelt: Pro Jahr wird eine Schwelle auf einer 2 km langen eingleisigen Strecke im Mittel ausgetauscht (siehe oben) [Köser et al. 2002].

Für die Berechnung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen wurden die Emissionsfaktoren für „niedriglegierten Stahl aus dem Produktionsmix“ für die Eisenteile und „Polyethylen (PE)“ für die Kunststoffteile zugrunde gelegt. Des Weiteren wurde angenommen, dass zum Einbau die Schienenbefestigungen ebenso wie die Schwellen mit der Bahn über eine Entfernung von 300 km transportiert werden. Die entsprechende Transportentfernung wurde auch für die Demontage der Schienen unterstellt.

Schotter

Die Schwellen und Schienen sind im Netz der DB AG zu mehr als 98 % in Schotter verlegt [DB 2009a]. Dabei hängt die benötigte Schottermenge von der Schwellenart, von der Anzahl der Gleise (ein- oder zweigleisig), der Schichtdicke des Schotters (normal: 30 cm) und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (bis 160 km/h und darüber) ab [Matthews 2007, Fiedler 2005]. Im Rahmen dieser Studie wurden die in Tabelle 14 aufgeführten Schottervolumina verwendet. Diese Volumina wurden mit Hilfe des von der DB AG erstellten Excelrechentools zur Berechnung des Bettungsquerschnitts ermittelt (Annahmen: Schotterbettdicke: 30 cm, Geschwindigkeit bis 160 km/h, Überhöhung: 0 mm, Gleisabstand: 4 m).⁶ Die Ergebnisse zeigen, dass der Schotterbedarf von Betonschwellen über Holzschwellen hin zu Stahlschwellen abnimmt.

Tabelle 14: Schottervolumina für ein- und zweigleisige Strecken in Abhängigkeit von der Schwellenart (Überhöhung: 0 mm)

	Beton- schwelle	Holz- schwelle	Trogstahl- schwelle	Y-Stahl- schwelle
	<i>m³/m</i>	<i>m³/m</i>	<i>m³/m</i>	<i>m³/m</i>
Eingleisige Strecken	2,17	1,84	1,33	1,49
Zweigleisige Strecken	4,30	3,72	2,73	3,21
Quelle: Bettungsquerschnittsberechnungstool der DB AG (siehe Fußnote 6).				

Basierend auf den Ergebnissen der Tabelle 15 und unter Verwendung einer Schotterdichte von 1,65 t/m³ wurden die Schottermassen für die Schwellentypen berechnet. Darauf aufbauend wurde unter Verwendung einer durchschnittlichen Lebensdauer des Schotterbettes von 15 Jahren der jährliche Errichtungsaufwand durch den Bau ermittelt. Für die Instandhaltung wurde unterstellt, dass durch das Stopfen und Reinigen des Schotterbettes pro Jahr 0,1 % der Schottermasse ersetzt werden muss [Köser et al. 2002].

⁶ Siehe http://www.oberbauhandbuch.de/fileadmin/Image_Archive/ystahlschwelle/ppt/RO%2014-2005,%20Anl.%20,%20Bettungsquerschnittsberechnung_07.06.2005.xls.

Tabelle 15: Schotterverbrauch für Bau und Unterhalt der Fahrbahnbettes, differenziert nach Schienentypen

Schwellentyp	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
1-gleisige Strecke					
- Betonschwellen	t	3.573	238,2	3,6	241,8
- Holzschwellen	t	3.030	202,0	3,0	205,1
- Stahlschwellen	t	2.319	154,6	2,3	156,9
2-gleisige Strecken					
- Betonschwellen	t	7.099	473,3	7,1	480,4
- Holzschwellen	t	6.141	409,4	6,1	415,5
- Stahlschwellen	t	4.907	327,1	4,9	332,0
Quellen: [Köser et al. 2002]; Bettungsquerschnittsberechnungstool der DB AG (siehe Fußnote 6), Berechnungen des Öko-Instituts.					

Die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch das Schotterbett ergeben sich wiederum aus der Verknüpfung der Schottermengen mit den für Schotter spezifischen Emissionsfaktoren („Schotter, zerkleinert, ab Mine“; siehe Tabelle 3). Zusätzlich wird der An- und Abtransport des Schotters mit der Bahn berücksichtigt. Die Transportentfernung für den Antransport liegt bei 200 km [Köser et al. 2002]. Für den Abtransport wird eine Transportentfernung von 100 km unterstellt. Das Stopfen und Reinigen des Schotterbettes benötigt ebenfalls Energie. Es wird unterstellt, dass zwei Stopf- bzw. Reinigungsvorgänge pro Lebensdauer des Schotterbettes stattfinden. Nach Weiß [2000] benötigen entsprechende Maschinen rund 150 Liter Diesel pro Stunde, wobei im Durchschnitt 180 m Gleis pro Stunde bearbeitet werden können. Damit ergibt sich ein Verbrauch von 850 Liter Diesel pro eingleisigen Strecken-Kilometer. Dieser Wert wurde den Berechnungen zugrunde gelegt.

Feste Fahrbahn

Feste Fahrbahnen haben zwar im Bestandsnetz lediglich einen Anteil an der Gleislänge von unter 2 %, gewinnen aber für Hochgeschwindigkeitsstrecken immer mehr an Bedeutung. Deshalb werden sie in dieser Studie getrennt betrachtet. Bei einer Festen Fahrbahn werden die Gleise nicht in Schotter, wie im herkömmlichen Oberbau, sondern in ein Bett aus Beton und Stahl verlegt. Die Feste Fahrbahn ermöglicht eine gleich bleibende Höhenlage der Gleise, wodurch die Schwingungen der Gleise reduziert werden und somit den Reisenden einen höheren Fahrkomfort erfahren. Feste Fahrbahnen werden insbesondere bei Neubaustrecken (NBS) für den Hochgeschwindigkeitsverkehr eingesetzt. Auf der NBS Köln-Rhein/Main wurde zum Beispiel über eine Länge von 155 km eine feste Fahrbahn eingesetzt.

In Wesentlichen ist allen FF-Systemen gleich, dass das Schotterbett durch eine lastverteilende Tragplatte aus Beton oder Asphalt ersetzt wird, auf die dann die Schienen elastisch gelagert montiert werden. In Deutschland sind verschiedene Systeme von Festen Fahrbahnen im Einsatz. So kann beispielsweise die Betontragschicht als Trog ausgebildet sein, in dem der Gleisrost mit Betonschwellen festgelegt und mit Beton vergossen wird. Bei einem anderen System werden die Betonschwellen mit Hilfe von Rahmen in die Betontragschicht eingebaut und festgelegt [Matthews 2007]. Als Betonschwellen kommen bei diesen Systemen Zweiblockschwellen zum Einsatz (Gewicht: rund 220 kg ohne Befestigung) [DW 2006].

Auf der NBS Köln-Rhein/Main wurden für die Erstellung der 155 km langen Festen Fahrbahn insgesamt 185.000 m³ Beton für den Trog und 120.000 m³ Füllbeton verwendet [Ohne Autor 2002]. Das entspricht rund 2.000 m³ pro zweigleisigen Streckenkilometer. Angaben zum Gewicht des eingesetzten Bewehrungsstahls lagen nicht vor. Hinzu kommen durch die verlegten Betonschwellen weitere 300 m³ Beton und 23,3 t Bewehrungsstahl pro zweigleisigen Streckenkilometer. Auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt war geplant, für eine 18,3 km lange Feste Fahrbahn rund 24.000 m³ Beton für die Fahrbahnplatte und 5.000 m³ Beton für den Mittelkern verwendet [Kirchner 2005]. Dies entspricht einem durchschnittlichen Betonverbrauch von 1.600 m³ pro zweigleisigen Streckenkilometer. Weiterhin sollen rund 110 t Bewehrungsstahl pro zweigleisigen Streckenkilometer eingesetzt werden [Kirchner 2005]. In dieser Studie werden die Werte der NBS Köln-Rhein/Main übernommen (Fahrbahn und Betonschwellen) und um die Bewehrungsstahlangaben der NBS Nürnberg-Ingolstadt ergänzt. Die verwendeten Materialdaten für den Bau einer Festen Fahrbahn sind in Tabelle 17 enthalten.

Für die Berechnung der jährlichen Herstellungsbedingten Materialmengen wird eine Lebensdauer von 60 Jahren unterstellt [Köser et al. 2002]. Auf eine Sensitivitätsrechnung mit einer Lebensdauer von 100 Jahren wird aufgrund der geringen Bedeutung der Festen Fahrbahnen im Netz der DB AG verzichtet. Für die Materialmengen der jährlichen Instandhaltung wurden einerseits für die Betonschwellen die oben getroffenen Annahmen übernommen (0,5 Schwellen pro eingleisigem Strecken-km). Für die Feste Fahrbahn selbst wurde ein Instandhaltungsbedarf von 1/3 % der verbauten Gesamtmenge Fester Fahrbahnen angenommen [Köser et al. 2002]. Zur Umrechnung auf eingleisige Strecken wurde 50 % der Materialmenge einer zweigleisigen Strecke angenommen.

Für die Transporte wurde angenommen, dass der Antransport des Betons für den Bau der Festen Fahrbahn mit einem Solo-Lkw mit einem zGG über 26 t erfolgt. Die Transportentfernung beträgt 20 km. Der benötigte Bewehrungsstahl wird über 300 km mit der Bahn antransportiert. Des Weiteren wurde angenommen, dass die Schwellen mit der Bahn über eine Entfernung von 300 km transportiert werden.

Tabelle 16: 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
1-gleisige Strecke					
- Beton	m ³	1.132	18,9	3,3	22,2
- Bewehrungsstahl	t	66	1,1	0,2	1,3
2-gleisige Strecken					
- 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]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

CO₂- und THG-Emissionen

Tabelle 17 gibt zum einen für die Schienen, zum anderen für die Summe aus Schotterbett bzw. Feste Fahrbahn, Befestigung der Schienen und Schwellen die spezifischen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer wieder. Die Gesamtbelastung des Oberbaus ergibt sich aus der Summe beider Werte. Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellung und Wartung der Schienen in etwa zu gleich hohen Emissionen führen wie der Bau und die Wartung des Schotterbettes, der Schienenbefestigungen und der Schwellen. Lediglich bei der Verwendung von Stahlschwellen und von Festen Fahrbahnen liegen die THG-Emissionen der Schwellen plus Schotterbett/Fahrbahn höher (siehe Tabelle 17).

Um die Gesamtbelastung durch die Herstellung und Wartung des Oberbaus zu erhalten, wurden in Bild 8 verschiedene Schwellentypen mit einer UIC-60-Schiene für eine zweigleisige Strecke kombiniert. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen liegen für eine zweigleisige Strecke mit Betonschwellen und Schotter bei rund 30 t pro Streckenkilometer und Jahr. Die Werte für Holzschwellen liegen in leicht höher (32 t/Strecken-km/a). Stahlschwellen im Schotterbett weisen mit 39 t CO₂-Äquivalenten pro Streckenkilometer und Jahr die höchsten Emissionswerte auf. Im Vergleich zu Betonschwellen im Schotterbett weisen Feste Fahrbahnen mit 36 t CO₂-Äquivalente pro zweigleisigen Streckenkilometer trotz der unterstellten deutliche längern Lebensdauer von 60 Jahren nennenswert höhere THG-Emissionen auf.

Die Detailanalyse der Berechnungsergebnisse zeigt, dass bei Holzschwellen die Emissionsvorteile in den Bereichen Schwellen und Schotter (geringere Mengen) gegenüber Betonschwellen durch die Mehremissionen im Bereich der Gleisbefestigung überkompensiert werden (siehe Bild 8). Bei Stahlschwellen werden die Emissionsvorteile bei der Gleisbefestigung und beim Schotter vollständig durch die Emissionsnachteile bei der Schwelle selbst aufgebraucht. Bei Festen Fahrbahnen führt der Einsatz von Beton für die Erstellung der Fahrbahn erwartungsgemäß zu so hohen Emissionen, dass die über denen des ersetzten Schotters liegen.

Tabelle 17: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Herstellung und Instandhaltung des Oberbaus für ein- und zweigleisige Strecken, differenziert nach eingesetzter Schienenart und verwendetem Schwellentyp

	Eingleisig		Zweigleisig	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Schienen				
Schiene S 49	6,3	6,8	12,6	13,7
Schiene S 54	7,0	7,6	13,9	15,1
Schiene UIC 60	7,7	8,4	15,4	16,7
Schotterbett, Befestigung und Schwellen				
Betonschwellen	6,1	6,4	12,2	12,8
Holzschwellen	6,9	7,6	13,9	15,2
Stahlschwellen	10,4	11,2	20,9	22,6
Feste Fahrbahn	9,4	9,8	18,9	19,6

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.

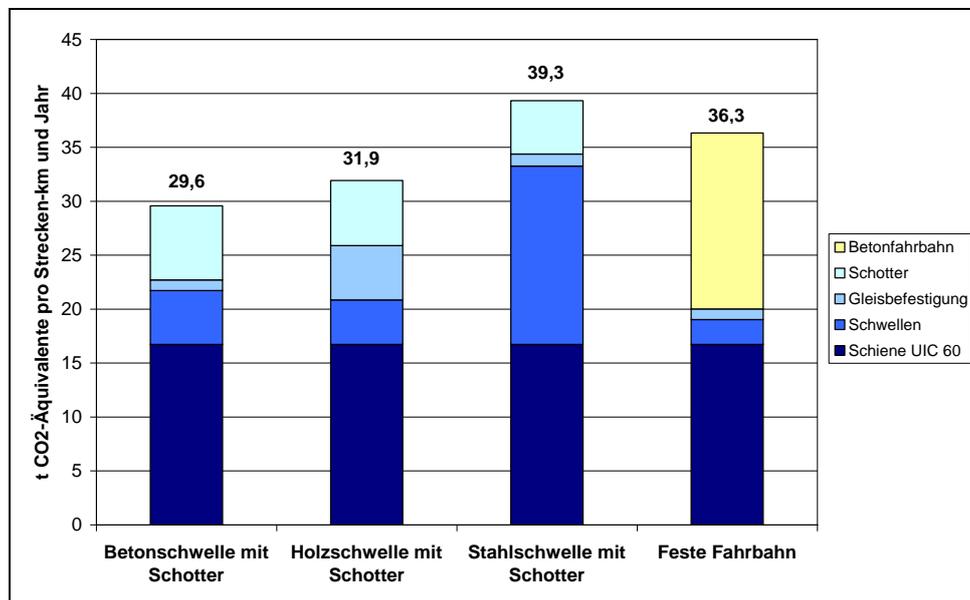


Bild 8: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch Herstellung und Wartung des Oberbaus zweigleisiger Strecken, differenziert nach Schwellentypen und Verursachergruppen [Berechnungen des Öko-Instituts]

3.3 Brücken

Insgesamt befinden sich im aktiven Netz der Deutschen Bahn AG im Jahr 2008 rund 26.900 Brücken (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg, siehe Tabelle 18) [DB 2009a]. Davon entfallen rund 46 % auf Brücken über Straßen und rund 29 % auf Brücken über Wasserläufe, Kanäle etc. Berücksichtigt man die Länge der einzelnen Brücken, kann die Gesamtlänge der Brücken im DB-Netz ermittelt werden. Die Gesamtlänge aller Brücken liegt bei rund 611 km. Vergleicht man die prozentuale Verteilung der Anzahl der Brücken mit der prozentualen Verteilung der Gesamtbrückenlängen ergibt sich ein leicht verändertes Bild: Zwar dominieren die beiden Hauptbrückenarten über Wasser und Straße auch die Gesamtbrückenlänge. Bei dieser Betrachtung gewinnen die Talbrücken aber stark an Beutung. Obwohl sie nur einen Anteil von 0,6 % an der Anzahl haben, liegt ihr Anteil bei der Gesamtlänge aller Brücken bei rund 8,1 %. Dies ist auf die große durchschnittliche Länge der Brücken zurückzuführen (286 m/Brücke, im Durchschnitt: 23 m/Brücke). Brücken über Fuß- und Radwege oder an Bahnhöfen verlieren dahingegen bei der Gesamtlängen-Analyse an Bedeutung (siehe Tabelle 18).

Der Datensatz der DB AG zum Netz, der dieser Studie zugrunde gelegt wird, hat für jeden Streckenabschnitt die Länge der Brücken sowie die Zuordnung der Brücken zu einer der oben aufgeführten Kategorien. Damit sind im Datensatz der DB AG alle Brücken des aktiven Streckennetzes enthalten; unberücksichtigt bleiben Brücken von stillgelegten Streckenabschnitten. Aussagen zu den Materialien der Brücken sind in dem Datensatz jedoch nicht enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass die aufgrund der hohen Betonmengen ökologisch relevanten Talbrücken i. d. R. aus Spannbeton bzw. Stahlbeton gefertigt sind. Viele der Brücken über Straßen hingegen sind Stahlbetonbrücken oder nach dem Prinzip Walzträger in Beton erstellte Brücken. Diese sind von den eingesetzten Materialmengen mit dem Überbau einer Talbrücke (also ohne Pfeiler) vergleichbar. Über Flüsse führen hingegen oftmals Stahlbrücken.

Tabelle 18: Anzahl der Brücken und deren Länge im aktiven Netz der Deutschen Bahn AG im Jahr 2008 (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg)

	Anzahl der Brücken	Anteil an der Anzahl	Gesamtlänge der Brücken	Anteil an der Gesamtlänge	Durchschnittl. Länge
	<i>Anzahl</i>	<i>in %</i>	<i>km</i>	<i>in %</i>	<i>m/Brücke</i>
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: Berechnungen des Öko-Instituts.					

Da in dem von der DB AG zur Verfügung gestellten Datensatz keine detaillierteren Informationen zur Art der Brücke zur Verfügung gestellt werden können [DB 2009a], wird grundsätzlich mit drei Brückenarten gearbeitet, die folgenden Einsatzbereichen zugeordnet werden:

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

Eine Publikation der deutschen Bahn aus dem Jahr 2005 zeigt, dass diese Vereinfachung durchaus gerechtfertigt ist. Zum Zeitpunkt der Publikation gab es rund 8.300 Brücken aus Stahl im Schienennetz der DB AG [DB 2005]; diese Zahl deckt sich weitestgehend mit der Anzahl der Brücken über Wasserläufe etc. (siehe Tabelle 18). Die Publikation zeigt aber auch, dass es rund 8.800 Gewölbe-Brücken gibt, die nicht aus Beton gefertigt sind [DB 2005]. Die Emissionen dieser Brücken werden durch die gewählte Vorgehensweise sicherlich überschätzt (siehe Kapitel 2.1).

Im Folgenden werden die eingesetzten Baumaterialien, die notwendigen Transporte sowie die benötigte Baustellenenergie für die drei Brückenarten ermittelt. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass Straßenbrücken über Bahntrassen in dieser Studie grundsätzlich nicht betrachtet werden, da sonst die Information vorliegen müsste, welche Infrastruktur zuerst da war (Henne-Ei-Problem). Dies ist für Bahn-Neubaustrecken klar erkennbar, für ein Bestandsnetz, wie es in dieser Studie untersucht wird, ist dies nicht ermittelbar.

Talbrücken

Zur Ermittlung der für den Bau notwendigen Materialmengen für zweigleisige Talbrücken wurde eine Analyse verschiedener Brücken an den Neubaustrecken Hannover-Würzburg, Köln-Rhein/Main, Mannheim-Stuttgart und Nürnberg-Erfurt durchgeführt (siehe Tabelle 19). Die analysierten Brücken haben eine Länge von 173 bis 1.681 m. Die verbaute Betonmenge bewegt sich im Bereich zwischen 4.100 und 70.000 m³. Normiert man die Betonmengen auf die Brückenlänge, variiert die Betonmenge zwischen 17,5 m³ und 48,3 m³ pro Meter Brücke. Für diese Studie wurde mit dem spezifischen Betonverbrauch pro Brückenmeter weiter gerechnet; um Ausreißer nicht so stark zu gewichten, wurde nicht der Mittelwert, sondern der Median der ermittelten Werte zugrunde gelegt. Demnach werden 32 m³ Beton pro laufenden Brückenmeter verbaut. Analog wurde beim Stahlverbrauch vorgegangen, der je nach Brücke zwischen 2,67 und 7,24 t/tm variiert. Für die Berechnung wurde der Median von 3,5 Tonnen pro Brückenmeter verwendet.

Köser et al. [2002] haben für den Bau von Talbrücken geringere Werte ermittelt: 23 m³ Beton und 3 Tonnen Stahl pro zweigleisigen Brücken-Meter. Für diese Studie werden aber unabhängig davon die selbst recherchierten Werte zugrunde gelegt. Für die Berechnung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen werden diese Werte mit den spezifischen Emissionsfaktoren, wie sie in Tabelle 3 vorgestellt wurden, verknüpft. Für Stahl wurde unterstellt, dass 85 % der Stahlmenge Bewehrung und 15 % Konstruktionsstahl sind. Als Konstruktionsstahl wurde für die Berechnung Primärstahl verwendet. Um die

jährlichen Errichtungsaufwände zu ermitteln, wurde für Brücken von einer Lebensdauer von 60 Jahren ausgegangen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, wird zusätzlich eine Sensitivität mit einer Lebensdauer von 100 Jahren gerechnet (siehe Kapitel 0).

Tabelle 19: 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		
Fuldataalbrücke 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
Fuldataalbrücke 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.⁷

Weiterhin wurde für die Berechnung ein Dieserverbrauch für Maschinen für den Bau der Brücken von 8,4 Liter pro zweigleisigen Brückenkilometer unterstellt [Köser et al. 2002]. Für die Transporte wurde angenommen, dass der Antransport des Betons mit Solo-Lkw mit einem zGG über 26 t erfolgt. Die Transportentfernung beträgt 20 km. Der Stahl für den Bau der Brücke wird über 300 km mit der Bahn antransportiert. Zu guter Letzt wird berücksichtigt, dass pro Brückenmeter durchschnittlich ein Erdaushub von 26 m³ notwendig ist. Für den Transport weg von der Baustelle wird ein 40-Tonnen-Lastzug unterstellt, der eine Strecke von 5 km zurücklegt.

⁷ Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>, www.arge-nbs.de und www.baustellen-doku.info.

Angaben zum Materialbedarf für die Instandhaltung der Brücken liegen nicht vor. Aus diesem Grund wurden keine Material- und Energieverbräuche im Zusammenhang mit Instandhaltungsmaßnahmen im Rahmen dieser Studie berücksichtigt. Dies gilt auch für die im Folgenden vorgestellten Brückentypen.

Betonbrücken über Straßen etc.

Für Brücken aus z. B. Stahlbeton über Straßen, Radwege oder Fußwege liegen keine spezifischen Daten vor. Allerdings sind sie materialeitig vergleichbar mit dem Überbau großer Talbrücken. Für sechs der oben aufgeführten Talbrücken waren für diesen Überbau getrennte Betonmengen angegeben (siehe Tabelle 20). Demnach lagen die spezifischen Betonverbräuche zwischen 12,7 und 15,5 m³ pro zweigleisigen Brückenmeter. Der Median liegt bei 14,0 m³ pro Meter und wird in dieser Studie für sonstige Betonbrücken verwendet. 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. Es wird wieder unterstellt, dass 85 % Bewehrungs- und 15 % Konstruktionsstahl sind.

Tabelle 20: 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. ⁸			

Für die Transporte wurden die analogen Annahmen bezüglich Fahrzeugtyp und Transportweite wie bei den Talbrücken getroffen. Für den Transport des Erdaushubs wurde davon ausgegangen, dass lediglich rund 20 % der Menge einer großen Talbrücke abtransportiert werden müssen. Der Energieverbrauch für den Bau der Brücke wurde über

⁸ Recherchen auf der Internetseite www.baustellen-doku.info.

das Verhältnis der Betonmengen zur Betonmenge einer Talbrücke ermittelt. Demnach werden 6,1 Liter Diesel pro zweigleisigen Brückenmeter benötigt [Köser et al. 2002].

Für Brücken nach dem Prinzip Walzträger in Beton liegen lediglich für zwei zweigleisige Talbrücken Materialmengen vor (Talbrücke Hasenpohl und Kochenbachtalbrücke). Die Betonmengen liegen bei 26 bzw. 34 m³ pro laufenden Brückenmeter und damit in der Größenordnung der Spannbeton-Talbrücken (siehe oben). Der Stahlverbrauch erreicht mit 9,3 bzw. 12,1 Tonnen pro Meter deutlich höhere Werte als bei den oben aufgeführten Talbrücken. Übertragen auf die niedrigeren Brücken über Straßen würde dies bedeuten, dass bei dieser Bauform von Betonmengen in Höhe von rund 15 m³/m Beton ausgegangen werden kann, aber deutlich höhere Stahlmengen erwartet werden müssen (rund die dreifache Menge – also rund 4,5-5,0 t/m). Da keine verlässlichen Daten für diese Bauform vorliegen, werden in dieser Studie ausschließlich die Angaben einer einfachen Betonbrücke verwendet.

Tabelle 21: Stahlmengen für ausgewählte Stahl-Eisenbahnbrücken in Deutschland

	Länge	Breite	Stahlmenge		
	m	m	t	t/m	t/m ²
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
Grüntaler 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.⁹

Stahlbrücken

Tabelle 21 zeigt für Stahl-Eisenbahnbrücken in Deutschland die eingesetzten Stahlmengen. Die aufgeführten Brücken haben eine Länge von 405 bis 2.486 m; die Stahlmenge variiert entsprechend stark zwischen 3.500 und 14.740 t. Pro laufenden Brückenmeter liegt der Stahlverbrauch zwischen 6,6 und 11,1 t; der Median liegt bei 8,6 t. Da die betrachteten Brücken unterschiedlich breit sind, wurde auch der spezifische Verbrauch pro m² Brückenfläche berechnet. Hier waren die Werte zwischen 0,4 und 0,8 t/m² Brücke. Für diese Studie wird der Median von 0,6 t/m² Brücke und eine Breite von 13 Metern für eine zweigleisige Strecke zugrunde gelegt. Damit ergibt sich ein

⁹ Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite> und www.muengstener-bruecke.de.

Stahlverbrauch von 7,2 t pro zweigleisigen Brückenmeter. Es wird ausschließlich Primärstahl für die Berechnung der CO₂- und THG-Emissionen verwendet. Für weitere Materialien wie Beton liegen keine Angaben vor; sie werden daher nicht berücksichtigt.

Für die Energieverbräuche, Baustellenenergie sowie Transporte werden für die Stahlbrücken die identischen Werte der Gruppe Betonbrücken über Straßen benutzt. Lediglich die zu transportierenden Mengen sind bei der Stahlbrücke anders als bei den einfachen Betonbrücken.

CO₂- und THG-Emissionen

Basierend auf den verbauten Materialienmengen, der eingesetzten Baustellenenergie und den durchgeführten Transporten konnten unter Berücksichtigung der Lebensdauern jährliche CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Strecken-Kilometer für ein- und zweigleisige Talbrücken, Brücken über Straßen und Stahlbrücken (i. d. R. über Wasserläufe) berechnet werden. Für eingeleisige Brücken wurde unterstellt, dass bei deren Bau 60 % der Emissionen von zweigleisigen Brücken entstehen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 22 wiedergegeben. Demnach liegen die CO₂-Emissionen durch den Bau zweigleisiger Brücken zwischen 113 t und 259 t pro Brückenkilometer und Jahr. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen liegen zwischen 118 und 270 t pro Brückenkilometer und Jahr. Während Talbrücken und Stahlbrücken ähnlich hohe THG-Emissionen verursachen, liegen die Emissionen einfacher Betonbrücken über Straßen deutlich niedriger (bei rund 45 % der Emissionen einer Talbrücke).

Tabelle 22: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Strecken-Kilometer durch den Bau von ein- und zweigleisigen Brücken, differenziert nach Brückenart und Lebensdauer

	Eingleisig		Zweigleisig	
	CO₂	CO₂-Äquivalente	CO₂	CO₂-Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Lebensdauer 60 Jahre				
Talbrücke – Spannbeton	155,5	162,0	259,1	270,0
Betonbrücke über Straße	67,6	70,5	112,7	117,5
Stahlbrücke	135,8	147,4	226,3	245,7
Lebensdauer 100 Jahre				
Talbrücke – Spannbeton	93,3	97,2	155,5	162,0
Betonbrücke über Straße	40,6	42,3	67,6	70,5
Stahlbrücke	81,5	88,4	135,8	147,4
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.				

Wird statt mit einer Lebensdauer von 60 Jahren mit einer Lebensdauer von 100 Jahren gerechnet, reduzieren sich die jährlichen Emissionen durch den Bau der Brücken auf 60 %. Damit liegen beispielsweise die CO₂-Äquivalent-Emissionen für zweigleisige Brücken im Bereich von 71 bis 162 t pro Brückenkilometer (siehe Tabelle 22).

Den Anteil der Verursachergruppen an den spezifischen jährlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen, verursacht durch den Bau zweigleisiger Brücken, zeigt Bild 9 (Lebensdauer: 60 Jahre). Wie das Bild zeigt, tragen der Energieverbrauch der Baumaschinen und die Transportvorgänge nur einen geringen Anteil zu den THG-Emissionen eines Brückenbaus bei. Der Großteil der Emissionen wird durch die Materialien Beton und Stahl verursacht. Bei dem Typ Brücken über Straßen führen damit die im Vergleich zu Talbrücken geringeren Beton- und Stahlmengen zu deutlich niedrigeren THG-Emissionen.

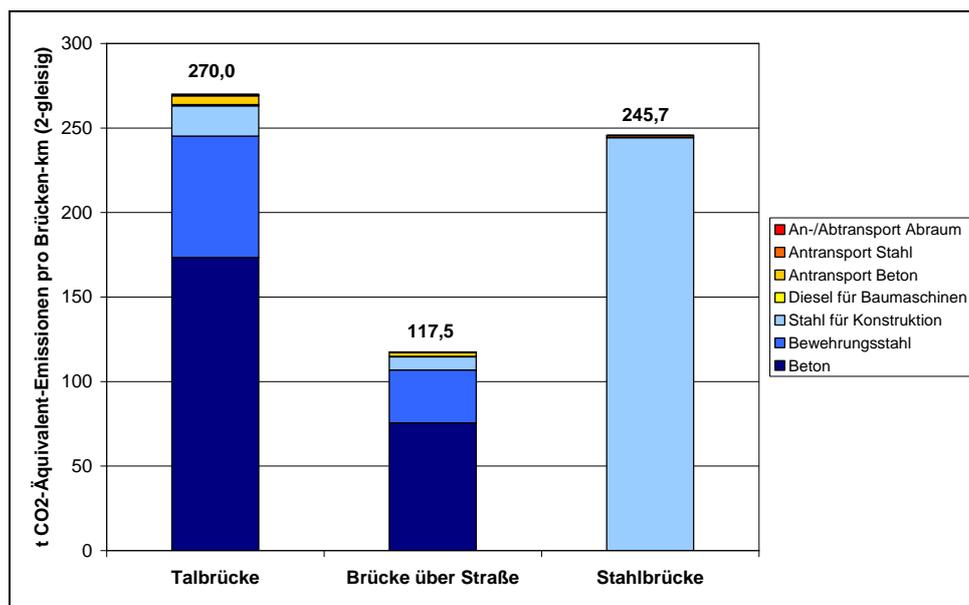


Bild 9: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Brückenkilometer durch den Bau zweigleisiger Brücken, differenziert nach Brückenart und Verursachergruppen (Lebensdauer: 60 Jahre) [Berechnungen des Öko-Instituts]

3.4 Tunnel

Das aktuelle Netz der Deutschen Bahn AG (ohne S-Bahn Berlin und Hamburg) verfügt im Jahr 2008 über 598 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 452 km [DB 2009d]. Die Durchschnittslänge eines Tunnels liegt damit bei rund 760 m. Für alle Streckenabschnitte, die in der für diese Studie verwendeten Infrastrukturdatei der DB AG enthalten sind, sind Angaben zur Anzahl der Tunnel sowie zu deren Länge enthalten. Zusätzliche Angaben zu den Bauformen der Tunnel sind in der Datei hingegen nicht vorhanden.

So ist beispielsweise nicht bekannt, ob die Tunnel in geschlossener und damit bergmännischer Bauweise oder in offener Bauweise erstellt wurden. Bei der bergmännischen Bauweise erfolgt die Herstellung des Tunnels mittels Bohr- und Sprengvortrieb bzw. Baggerausbruch oder mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine. Bei der offenen Bauweise erfolgt der Bau des Tunnels in einer offenen Baugrube, die nach Fertigstellung wieder verfüllt wird. Beide Bauformen unterscheiden sich beim Bedarf an Beton und Stahl erheblich, so dass aus ökologischer Sicht eine Unterscheidung notwendig ist.

Nach einer Statistik der STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen hat die geschlossene Bauweise bei den in Bau befindlichen Fernbahntunneln in den letzten 10 Jahren kontinuierlich an Bedeutung gewonnen; heute liegt deren Anteil weit über 90 % (siehe Bild 10) [Haack 2009]. Allerdings dürfte im Tunnelbestand die offene Bauweise einen Anteil von 20-25 % haben. Auf der NBS Hannover-Würzburg liegt beispielsweise der Anteil der offenen Bauweise sogar bei 40 %.

Da keine detaillierten Informationen in den Daten der DB AG vorliegen, wird für die Berechnungen in dieser Studie von einem durchschnittlichen Tunnel ausgegangen, der zu 25 % in offener Bauweise und zu 75 % in geschlossener Bauweise erstellt ist. Um diesen durchschnittlichen Tunnel berechnen zu können, werden im Folgenden einerseits die Materialvorleistungen für den Bau eines Tunnels in geschlossener bzw. bergmännischer Bauweise und andererseits die eines Tunnels in offener Bauweise ermittelt.

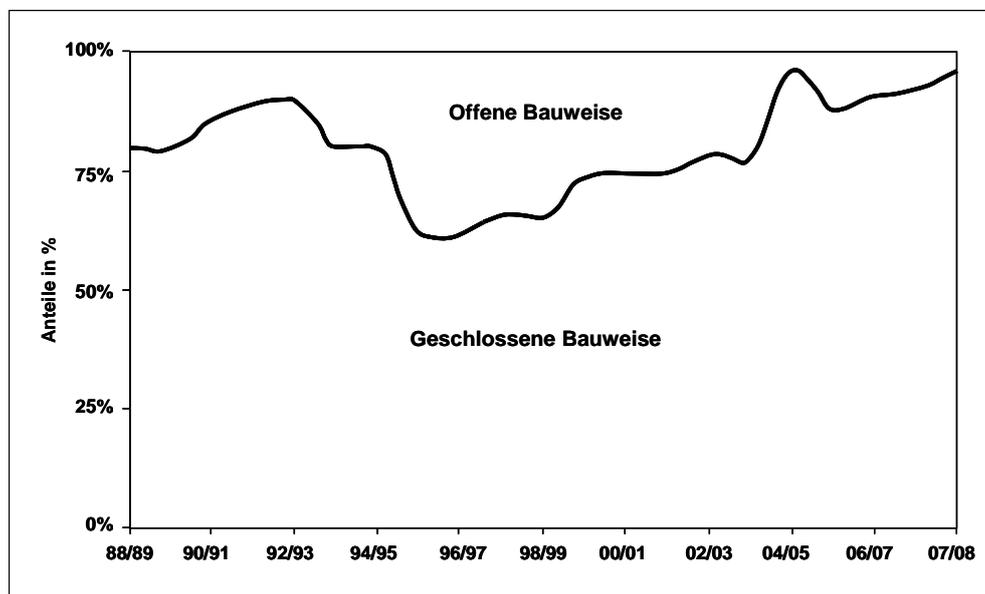


Bild 10: Längenbezogener Anteil der geschlossenen bzw. offenen Bauweisen bei den jeweils zum Jahreswechsel im Bau befindlichen Fernbahntunneln [Haack 2009]

Tunnel in bergmännischer Bauweise

Tabelle 23 gibt die Ergebnisse einer Recherche zu den Beton- und Stahlverbräuchen beim Bau von zweigleisigen Eisenbahntunneln wieder. Bei den betrachteten Tunneln mit einer Länge zwischen 474 und 10.525 m wurden Betonmengen zwischen 9.735 und 340.000 m³ und Stahlmengen zwischen 154 und 20.000 t verbaut. Pro laufenden zweigleisigen Tunnelmeter ergibt sich damit ein Betonverbrauch von 11,0 bis 79,6 m³; der Median, der in dieser Studie verwendet wird, liegt bei 37,2 m³ Beton/m. Die verbauten Stahlmengen liegen zwischen 0,2 und 6,9 t pro Tunnelmeter in zweigleisiger Tunnelausführung. Hier liegt der Median bei 1,6 t Stahl/m – dieser Wert wurde wiederum für die Berechnungen in dieser Studie verwendet.

Tabelle 23: 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		
Ramholztunnel	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		
Medium	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.¹⁰

Im Vergleich zu anderen Studien sind die verwendeten Betonverbräuche deutlich höher. So weisen Köser et al. [2002] für zweigleisige Tunnel in bergmännischer Bauweise lediglich Betonverbräuche in Höhe von 19 m³ pro zweigleisigen Tunnelmeter aus. Der Stahlverbrauch liegt hingegen niedriger als in der erwähnten Studie (dort 2,1 t/tm). Auch Systra Conseil [UIC 2010] nennen in einer aktuellen Studie mit 20,3 m³ Beton und 0,2 t Stahl deutlich geringere Werte. Nach einer detaillierteren Analyse der Angaben scheinen diese Studien aber lediglich den Betonverbrauch für die eigentlichen Tunnelröhren berücksichtigt zu haben, die zur Sicherung der Tunnel eingesetzte Spritzbetonmenge (rund 50 % der Gesamtmenge) jedoch nicht.

Wie bei den Brücken werden die ermittelten Materialleistungen für den Bau über die Lebensdauer von 60 Jahren auf ein Jahr heruntergebrochen und die jährlichen Errichtungsaufwände mit den entsprechenden Emissionsfaktoren für die Materialien ver-

¹⁰ Recherchen auf den Internetseiten <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>, www.arge-nbs.de, www.kuk.de und www.beton-informationen.de.

knüpft. Für Stahl wird ausschließlich der Emissionsfaktor für Bewehrungsstahl verwendet. In einer Sensitivitätsberechnung wird zusätzlich der jährliche Errichtungsaufwand bei einer Lebensdauer von 100 Jahren berechnet. Angaben zu den jährlichen Instandhaltungsaufwänden von Tunneln liegen nicht vor; sie werden daher in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Neben den THG-Emissionen durch die verbauten Materialien wurden auch die Emissionen durch den Bau des Tunnels und durch den Transport der Materialien berücksichtigt. Für den Stromverbrauch auf der Baustelle, der überwiegend durch die Tunnelbohrmaschine entsteht, werden pro zweigleisigen Tunnelmeter 2,2 MWh benötigt. Hinzu kommen noch rund 140 Liter Diesel pro zweigleisigen Tunnelmeter für Baumaschinen [Köser et al. 2002]. Für den Transport des Betons werden wie bei den Brücken ein Lkw mit einem zGG größer 26 Tonnen und eine Transportweite von 20 km angesetzt. Für den Stahl wird ein Bahntransport über 300 km unterstellt [Köser et al. 2002]. Die in Tabelle 23 ebenfalls ausgewiesenen Massen für den Ausbruch werden in der Regel zum Verfüllen der Rampen für die Ein- und Ausfahrten an den Tunneln benutzt. Es wird ein mittleres Ausbruchvolumen von 128 m³ pro zweigleisigen Tunnelmeter unterstellt (Median). Der Abtransport der Massen erfolgt mit einem Sattelzug mit einem zGG von 40 t über eine Strecke von 5 km.

Tunnel in offener Bauweise

Die für diese Studie recherchierten Material- und Ausbruchsmengen für Tunnel in offener Bauweise sind in Tabelle 24 dargestellt. Die vier betrachteten Tunnel haben eine Länge zwischen 670 und 2.502 m. Dabei wurden zwischen 35,3 und 69,9 m³ Beton und 3,4 und 9,0 t Stahl pro zweigleisigen Tunnelmeter verbaut. Die in dieser Studie verwendeten Medianwerte liegen bei 49,0 m³ Beton und 6,1 t Stahl pro zweigleisigen Tunnelmeter. Auch diese Werte liegen im Vergleich zu Studien von Köser et al. [2002] höher. Dort werden Betonverbräuche von 30,4 m³ und Stahlverbräuche von 2,8 t pro zweigleisigen Tunnelmeter ausgewiesen. Systra Conseil [UIC 2010] hingegen kommen in einer aktuellen Studie mit 45,9 m³ Beton und 5,6 t Stahl pro zweigleisigen Tunnelmeter auf ähnlich hohe Werte wie die, die in dieser Studie verwendet werden. Daten zur Instandhaltung der Tunnel in offener Bauweise liegen in keiner Untersuchung vor, daher wurde dieser Bereich in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Für den Bau offener Tunnel entfällt der Stromverbrauch für die Tunnelbohrmaschine. Für die Baustelle wird damit lediglich noch rund ein Viertel des Stromverbrauches einer Baustelle in geschlossener Bauweise benötigt (rund 500 kWh pro zweigleisigen Tunnelmeter). Auch der Dieserverbrauch liegt mit rund 100 Liter pro zweigleisigen Tunnelmeter niedriger (rund ein Drittel) als bei Tunnel in bergmännischer Bauweise. Dafür fällt mehr Ausbruchmaterial an, das abtransportiert und teilweise später wieder verfüllt werden muss. Insgesamt sind dies rund 300 m³ pro zweigleisigen Tunnelmeter. Für die Berechnungen werden für den Abtransport und Rücktransport jeweils 5 km unterstellt. Bezüglich des verwendeten Lkw werden die Angaben, die für Tunnel in geschlossener Bauweise getroffen wurden, übernommen. Dies gilt auch für die Transporte der Bauma-

terialien (Beton, Stahl). Unterschiedlich ist lediglich, dass bei Tunnel in offener Bauweise höhere Transportmenge anfallen (siehe oben).

Tabelle 24: Menge an Stahl und Beton zum Bau ausgewählter zweigleisiger Eisenbahntunnel in überwiegend offener Bauweise sowie die Menge des Ausbruchs in Deutschland

	<i>Länge</i>	<i>Anteil berg. B.</i>	<i>Betonverbrauch</i>		<i>Stahlverbrauch</i>		<i>Ausbruch</i>	
	<i>M</i>	<i>in %</i>	<i>m³</i>	<i>m³/m</i>	<i>t</i>	<i>t/m</i>	<i>Mill. m³</i>	<i>m³/m</i>
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
Rauhebergtunnel	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.¹¹

CO₂- und THG-Emissionen

Das Berechnungsergebnis für die spezifischen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch den Bau von ein- und zweigleisigen Tunneln in geschlossener und offener Bauweise zeigt Tabelle 25. Für die Berechnung der Emissionen ein-gleisiger Tunnel wurde wie bei den Brücken die vereinfachte Annahme getroffen, dass für deren Bau 60 % der Emissionen von zweigleisigen Tunneln anfallen. Bei einer Lebensdauer von 60 Jahren entfallen damit auf bergmännisch erstellte Tunnel rund 272 Tonnen CO₂ und 281 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Streckenkilometer und Jahr. Bei offener Bauweise liegen die entsprechenden Emissionen bei 421 bzw. 439 Tonnen und damit rund 56 % höher als bei Tunneln in bergmännischer Bauweise.

Wird für Tunnel von einer Lebensdauer von 100 Jahren ausgegangen (Sensitivitätsbe-trachtung), reduzieren sich die THG-Emissionen auf 60 %. In diesem Fall besäßen Tunnel in offener Bauweise geringere THG-Emissionen als alle Tunnelbauformen, die mit einer Lebensdauer von 60 Jahren gerechnet wurden (also auch geringere als Tun-nel in geschlossener Bauweise, siehe Tabelle 25).

Bild 11 zeigt für eine Lebensdauer von 60 Jahren die CO₂-Äquivalent-Emissionen von zweigleisigen Tunneln in bergmännischer und offener Bauweise pro Tunnelkilometer. In dieser Abbildung sind zusätzlich die Verursacher der Emissionen aufgeführt. Bei beiden Tunnelarten dominieren die Emissionen bedingt durch die Herstellungsaufwände der

¹¹ Recherchen auf der Internetseite <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>.

Materialien Beton und Stahl (bergmännische Bauweise: 86 % der THG-Emissionen, offene Bauweise: 94 %). Bei Tunnel in bergmännischer Bauweise trägt auch der Stromverbrauch des Tunnelbohrers und der Baustelle nennenswert zu den Emissionen bei. Auf diesen Bereich entfallen rund 8 % der THG-Emissionen.

Tabelle 25: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch den Bau von ein- und zweigleisigen Tunnel, differenziert nach Tunnelart und Lebensdauer

	Eingleisig		Zweigleisig	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Lebensdauer 60 Jahre				
Tunnel – bergmännisch	163,2	168,3	271,9	280,5
Tunnel – offene Bauweise	252,6	263,2	421,0	438,6
Lebensdauer 100 Jahre				
Tunnel – bergmännisch	97,9	101,0	163,2	168,3
Tunnel – offene Bauweise	151,6	157,9	252,6	263,2

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.

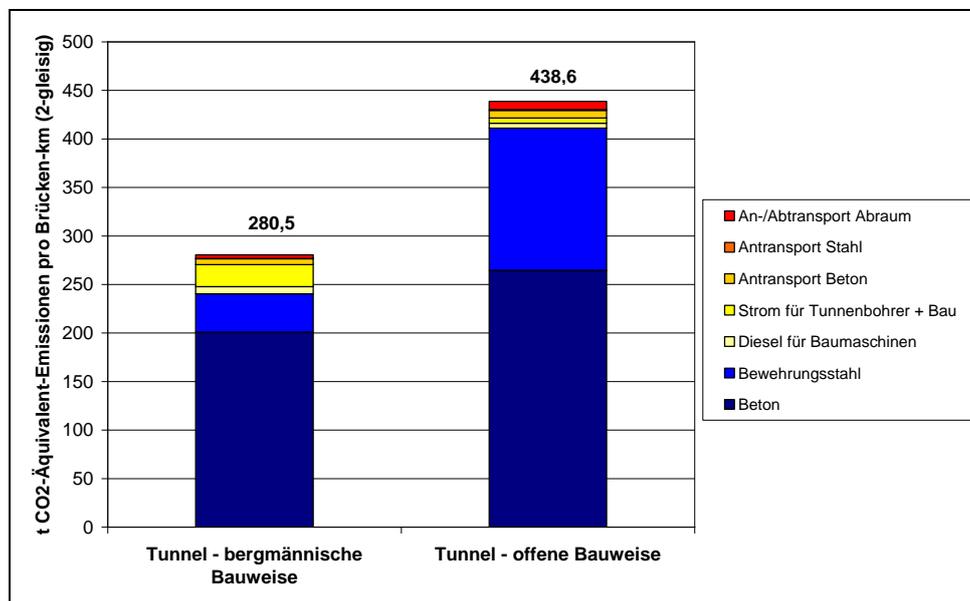


Bild 11: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Tunnelkilometer durch den Bau zweigleisiger Tunnel, differenziert nach Tunnelart und Verursachergruppen (Lebensdauer: 60 Jahre) [Berechnungen des Öko-Instituts]

3.5 Energieversorgung (einschließlich Oberleitung)

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]. Wie Bild 12 zeigt, bezieht die DB AG für den elektrischen Fahrbetrieb ihren Fahrstrom mit der Frequenz 16,7 Hz

- aus bahneigenen Stromerzeugungsanlagen (Bahnstrom),
- über Umformerwerke aus dem öffentlichen Netz der Elektrizitätsversorger (EVU) sowie
- im Stromaustausch von den Österreichischen (ÖBB) und Schweizer Bundesbahnen (SBB).

Von den Erzeugungsanlagen bzw. Umformerwerken wird der Bahnstrom über ein separates, bahneigenes 110-kV-Stromleitungsnetz zu den so genannten Unterwerken geleitet, in denen die Spannung auf 15 kV transformiert und in die Oberleitungsanlagen eingespeist wird. In den neuen Bundesländern gibt es neben diesem zentralen Netz Streckenabschnitte, die direkt aus den Umformerwerken versorgt werden (dezentrales Bahnenergienetz, rechter Teil von Bild 12) [Kiewert et al. 2009; Fendrich 2007; Weiland/Falkenhagen 2007].

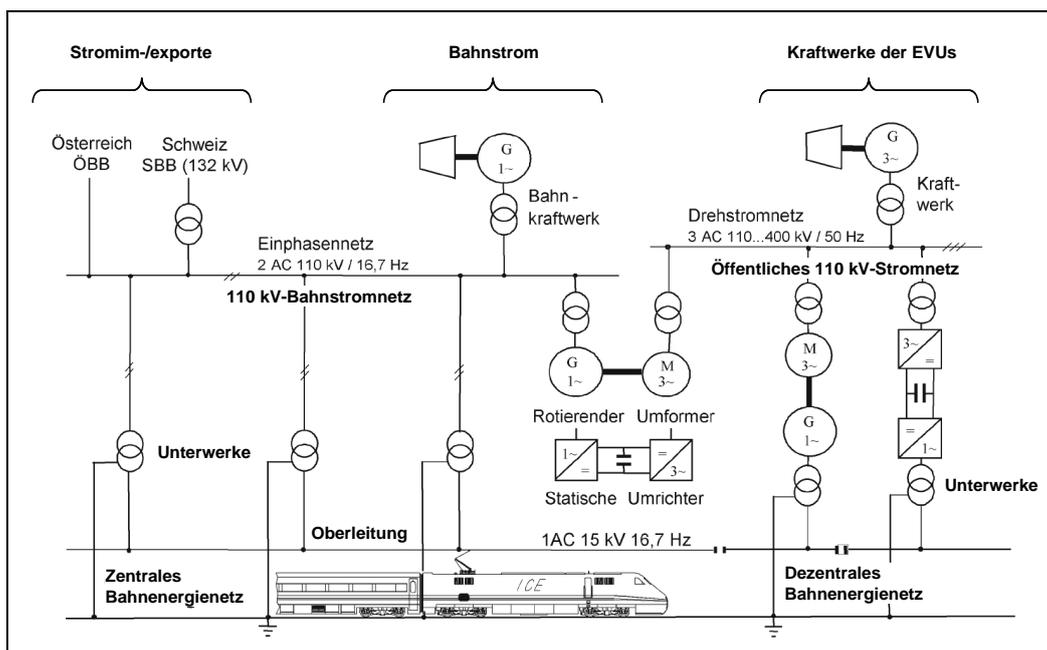


Bild 12: Prinzipieller Aufbau der 16,7-Hz-Bahnenergieversorgung der DB AG [Fendrich 2007; modifiziert durch das Öko-Institut]

Während die Oberleitungen sowie die Unterwerke dem Fahrweg zugeordnet werden können und daher wie alle vorangegangenen Größen auf einen Streckenkilometer bezogen werden können, ist dies bei allen vorgelagerten Energiebereitstellungsprozessen (Bahnstromkraftwerke der DB, Bahnstromnetz, öffentliches Netz, Umformerwerke) nur bedingt möglich und sinnvoll. Die für den Bau und den Unterhalt dieser Infrastrukturen

notwendigen Materialmengen sowie die daraus resultierenden THG-Emissionen sollten daher besser auf die erzeugte Energie (in kWh) bezogen werden und direkt in die spezifischen THG-Emissionsfaktoren pro Pkm bzw. tkm eingerechnet werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden schwerpunktmäßig die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung und Instandhaltung der Oberleitungen (einschließlich Masten) und der Unterwerke ermittelt. Die vorgelagerten Prozesse der Energiebereitstellung (Erzeugung und Verteilung bis Unterwerk) werden nur grob betrachtet; eine Detailanalyse ist aufgrund der geringen Bedeutung für die Gesamtumweltauswirkungen in dieser Studie nicht möglich.

Neben der Bereitstellung von Fahrstrom ist auch die Bereitstellung von Diesel zu berücksichtigen. Die im Verkehrsemissionsmodell TREMOD enthaltenen spezifischen THG-Emissionen enthalten zwar die indirekten energiebedingten Emissionen für die Bereitstellung von Dieseldieselkraftstoff (siehe Bild 1) [Knörr et al. 2005]. Nicht enthalten sind aber wie beim Strom die THG-Emissionen, die durch die Produktion der entsprechenden Energieinfrastrukturen (z. B. Raffinerien, Tankstellen) entstehen. Wie beim Strom können diese Emissionen nicht einzelnen Streckenabschnitten zugerechnet werden. Daher werden diese THG-Emissionen pro TJ Diesel erhoben, so dass sie zusätzlich zu den indirekten energiebedingten Emissionen bei der Emissionsberechnung berücksichtigt werden können. Wie beim Strom können im Rahmen dieser Studie diese THG-Emissionen nur näherungsweise erhoben werden.

Fahrdraht und Aufhängung

Laut Fendrich [2007] werden für Vollbahnen in Europa bis auf wenige Ausnahmen „Einfache Hochketten-Oberleitungen“ verwendet. Zu den Hochketten gehören Tragseil, Hänger, so genannte Y-Beiseile und der eigentliche Fahrdraht. Sie werden auch als Längskettenwerk bezeichnet. Bild 13 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer einfachen Hochkette.

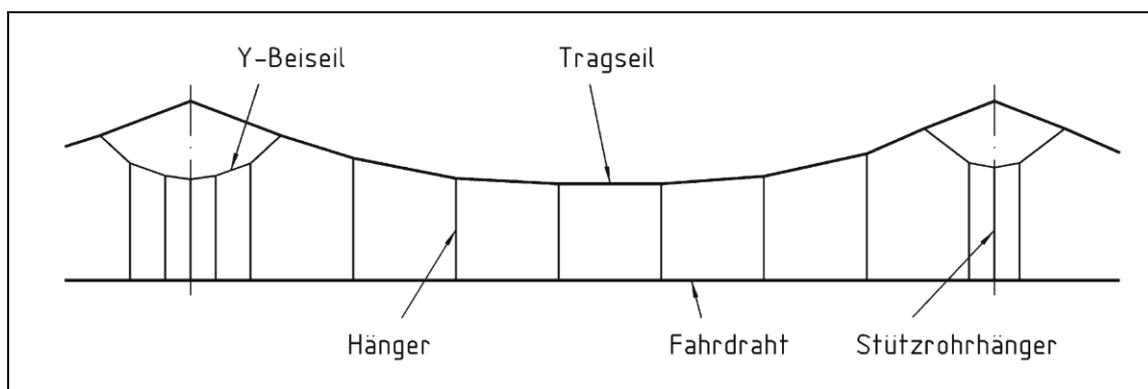


Bild 13: Prinzipieller Aufbau eines Längskettenwerkes („Einfache Hochkette“) [Fendrich 2007]

Laut Fendrich [2007] kommen in Deutschland ausschließlich Rillenfahrdrähte mit der Klemmrille A und einer Querschnittsfläche von 80 mm² (nur in bestehenden Anlagen),

100 mm² und 120 mm² zur Anwendung. Dabei werden Drähte aus Kupfer, Kupfer-Silber-Legierung (CuAg0,1) und Kupfer-Magnesium-Legierung (CuMg0,5) eingesetzt. Da Fahrdrähte aus sehr reinem Kupfer bestehen müssen, wurden für die Berechnung der THG-Emissionen die Emissionsfaktoren für primäres Kupfer verwendet (siehe Tabelle 3). Die Fahrdrähte mit einem Querschnitt von 100 mm² weisen Kilometergewichte von 0,9 t, diejenigen mit Querschnitten von 120 mm² Kilometergewichte von 1,1 t auf. Letztere werden für die Oberleitungstypen Re 250 und Re 330 eingesetzt, die für Höchstgeschwindigkeiten von 280 bzw. 330 km/h zugelassen sind [Fendrich 2007].

Das gesamte Kettengewicht einer Oberleitung des Typs Re 330 beträgt nach Fendrich [2007] 22,5 N/m, was einer Masse von 2,3 t pro Kilometer Oberleitung entspricht. Die entsprechenden Werte für eine Oberleitung des Typs Re 250 sind 18 N/m bzw. 1,8 t/Oberleitungs-km. Für alle anderen Strecken liegen die Kettengewichte bei 14 N/m bzw. die Kettenmassen bei 1,4 t/Oberleitungs-km. Die Differenz zwischen diesen Massenangaben und denen des Fahrdrahts gehen auf die Trag- und Beiseile sowie Hänger zurück (siehe Bild 13). Da diese Hilfstragseile i. d. R. aus Bronze gefertigt werden, werden bei der Berechnung der THG-Emissionen diese Materialmengen mit den entsprechenden Emissionsfaktoren für Bronze verknüpft (siehe Tabelle 3).

Tabelle 26 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]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Bei der Lebensdauer für den Fahrdraht gehen Köser et al. [2002] von 7 Jahren für Hochgeschwindigkeitsstrecken aus. Nach Auskunft der Deutschen Bahn AG liegen die mittleren Standzeiten der Fahrdrähte in der Größenordnung zwischen 10 und 30 Jahren, wobei in Bahnhofsbereichen und auf stark beanspruchten Strecken (Zugfrequenz, Geschwindigkeit) die Oberleitungen häufig und auf Nebenstrecken in größeren Zeitabständen ausgetauscht werden müssen [Hillenbrand et al. 2005]. Für die Berechnungen im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass der Fahrdraht von

Hochgeschwindigkeitsstrecken (HGS), wie von Köser et al. [2002] ermittelt, alle 7 Jahre ausgetauscht wird. Auf Ausbaustrecken (50 % Re 250, 50 % Re 200) mit Geschwindigkeiten über 160 km/h wird von einer mittleren Standzeit von 10 Jahren ausgegangen. Für alle anderen Strecken wird eine mittlere Standzeit von 20 Jahren unterstellt. Für die Trag- und Beiseile sowie Hänger wird – unabhängig vom Streckentyp – eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen. Weiterhin wurde angenommen, dass sich die jährlichen Instandhaltungen auf rund 1/3 % des Materialbestandes der Oberleitungen belaufen [Köser et al. 2002].

Die sich daraus ergebenden Materialmengen für die Oberleitung sind in Tabelle 26 zusammengefasst. Unberücksichtigt bleiben hierbei mögliche Speiseleitungen (Bahnstromleitungen), die teilweise von den Unterwerken zu entfernter liegenden Oberleitungsabschnitten führen und ebenfalls an den Fahrleistungsmasten aufgehängt sind. Weiterhin unberücksichtigt bleiben Quertragwerke, die oftmals in Bahnhofsbereichen eingesetzt werden [Fendrich 2007]. Für eine eingleisige Strecke wird von 50 % der in Tabelle 26 aufgeführten Materialmengen ausgegangen.

Oberleitungsmasten

Im Netz der DB AG werden sowohl Masten aus Beton als auch aus Stahl eingesetzt. Der von der DB AG zur Verfügung gestellte Datensatz enthält keine Angaben zur Art der Masten [DB 2009a]. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass Betonmasten, insbesondere für Hochgeschwindigkeitsstrecken (HGS) und Ausbaustrecken (ABS), eingesetzt werden. Für die übrigen Strecken wird der Anteil der Stahlmasten auf 80 % geschätzt [Steger et al. 2010].

Betonmasten werden auch als Schleuderbetonmasten bezeichnet. Sie sind konisch gestaltet und besitzen einen innen liegenden Hohlraum. Die bei der DB AG eingesetzten Betonmasten unterscheiden sich laut Fendrich [2007] hinsichtlich der Güte des verwendeten Betons (B 65, B 95). Bei der Berechnung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen wurde auf den Emissionsfaktor „Beton, hohe Anforderungen, ab Werk“ zurückgegriffen und damit keine unterschiedlichen Betonqualitäten berücksichtigt.

Nach Köser et al. [2002] liegt für zweigleisige Hochgeschwindigkeitsstrecken der Betonverbrauch für Masten einschließlich Fundament bei rund 91,6 t/km (38,2 m³/km) sowie der Stahlverbrauch bei 44,4 t/km. Der Mastabstand wird dabei mit maximal 65 Meter angegeben. Systra Conseil [UIC 2010] geben für eine ebenfalls zweigleisige Hochgeschwindigkeitsstrecke einen Betonverbrauch von 34 m³/km und einen Stahlverbrauch von 34,5 t/km an. Der Mastabstand beträgt hierbei 58 m. Im Rahmen dieser Studie wurden sowohl für HGS als auch für ABS die leicht höheren Werte von Köser et al. [2002] verwendet. Für das übrige Netz wurde angenommen, dass der Mastabstand 80 m beträgt [Fendrich 2007]. Danach ergeben sich für zweigleisige Strecken ein Betonverbrauch von 31,0 m³/km und ein Stahlverbrauch von 36,1 t/km.

Steger et al. [2010] weisen pro Stahlmast einen Materialbedarf von 0,5 t Stahl aus. Bei einem Mastabstand von 80 m und einer zweigleisigen Strecke ergibt sich somit ein Materialbedarf von 12,5 t Stahl pro Streckenkilometer. Zusätzlich sind für das Fundament nochmals rund 7,5 m³ Beton und 33,6 t Stahl zu berücksichtigen [Köser et al. 2002].

Tabelle 27 Verbrauch an Beton, Stahl und Aluminium für Herstellung und Unterhalt von Oberleitungsmasten für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert)

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
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 2009a]; [Steger et al. 2010]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Der Mast besteht aber nicht nur aus dem eigentlichen Pfosten und dem Fundament. Vielmehr ist jeder Pfosten mit einem Aluminium-Ausleger ausgestattet, an dem die Hochkette (Fahrdrabt plus Trageseile) befestigt ist. Zudem sind noch Leitungen für die Erdungen sowie Radspanner für das Spannen der Oberleitungen notwendig. Diese zusätzlichen Bauteile benötigen pro zweigleisigen Kilometer von HGS oder ABS rund 4,3 t Aluminium, 6,6 t Stahl und 0,1 m³ Beton [Köser et al. 2002]. Für übrige zweigleisige Strecken werden bei einem Mastabstand von 80 m 3,5 t Aluminium, 5,3 t Stahl und 0,1 m³ Beton pro Kilometer benötigt. Unberücksichtigt bleiben hingegen die für die Iso-

lation verwendeten Keramik-Isolatoren, da hierfür keine entsprechenden Emissionsfaktoren vorlagen [ecoinvent 2009].

In Tunnel entfallen die Masten und deren Fundament. Daher wurden in dieser Studie für Tunnelstrecken lediglich die Materialverbräuche für Ausleger, Erdungen und Radspanner berücksichtigt. Als Lebensdauer für alle Komponenten der Oberleitungsmasten wurden in dieser Studie entsprechend den PCR for Railways 60 Jahre angenommen [PCR 2009a]. Damit liegt die verwendete Lebensdauer etwas unter der von Köser et al. [2002] (70 Jahre) und etwas über der von Systra Conseil [UIC 2010] (50 Jahre). Die Materialaufwände für die jährliche Instandhaltung wurden nach Köser et al. [2002] pauschal mit 1/3 % des Errichtungsaufwandes berechnet. Die in dieser Studie verwendeten Materialmengen für die Oberleitungsmasten sind in Tabelle 27 dargestellt.

Bei der Bestimmung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen wurden zudem die Transporte der Oberleitungsmaste (einschließlich Oberleitung) berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass Stahl, Aluminium und Kupfer über eine Distanz von 300 km mit der Bahn und Beton über eine Entfernung von 20 km mit einem Solo-Lkw mit einem zGG über 26 t transportiert werden.

Unterwerke

In Deutschland gab es im Jahr 2008 rund 180 Unterwerke [Kiewert et al. 2009]. Bezogen auf das gesamte elektrifizierte Netz der DB AG von 33.400 Gleiskilometern kommt damit im Schnitt auf alle 170 km ein Unterwerk [DB 2009d]. Allerdings dürfte bei stark befahrenen Strecken (z. B. Hochgeschwindigkeitsstrecken) der Abstand geringer sein als bei Nebenstrecken. Köser et al. [2002] gehen davon aus, dass an zweigleisigen Hochgeschwindigkeitsstrecken der Abstand zwischen den Unterwerken rund 20 km beträgt. Dies würde bedeuten, dass ein Unterwerk auf rund 40 Gleiskilometer kommt. Systra Conseil [UIC 2010] gehen für zweigleisige Hochgeschwindigkeitsstrecken von 50 km Abstand zwischen Unterwerken aus, was einem Unterwerk pro 100 Gleiskilometer entspricht. Im Abstand von 10 km sind allerdings nach Systra Conseil [UIC 2010] zusätzlich noch kleinere Unterwerke angesiedelt. Da für diese Studie keine detaillierteren Daten zu den Abständen der Unterwerke speziell für einzelne Strecken vorlagen, wurde mit den Durchschnittswerten der DB AG für das Jahr 2008 gerechnet [Kiewert et al. 2009; DB 2009d].

Für die größeren Unterwerke geht Systra Conseil [UIC 2010] von 100 t Stahl und 61,3 t Kupfer aus, für die kleineren Unterwerke von 20 t Stahl und 22,5 t Kupfer. Unberücksichtigt bleiben hierbei die Beton- und Ziegelmengen für das Gebäude. Köser et al. [2002] gehen pro Unterwerk für Transformatoren und Installationsmaterial von 68 t Stahl und 13,4 t Kupfer aus. Für das Gebäude nehmen sie an, dass rund 22 m³ Beton für das Fundament und 250 t Mauerwerk/Ziegelsteine verbaut wurden. Für diese Studie werden – der konservativen Vorgehensweise der Studie folgend – die höheren Werte von Systra Conseil [UIC 2010] für Transformatoren und Installationsmaterial verwendet und um die Gebäudedaten von Köser et al. [2002] ergänzt.

Tabelle 28 gibt einen Überblick über die benötigten Materialmengen pro elektrifizierten zweigleisigen Streckenkilometer (180 Unterwerke, 30.500 Gleis-km). Für die Umrechnung der Errichtungsaufwände auf das Jahr wurde für das Fundament und das Gebäu-

de eine Lebensdauer von 60 Jahren unterstellt [PCR 2009a]. Für die Trafos und Installationen wird eine Standzeit von 15 Jahren unterstellt [Köser et al. 2002]. Die Materialaufwände für die jährlichen Instandhaltungen werden als so gering angesehen, dass sie vernachlässigt werden [Köser et al. 2002].

Tabelle 28: Verbrauch an Stahl, Kupfer, Ziegelsteinen und Beton für Herstellung und Unterhalt von Unterwerken für eine zweigleisige Strecke (elektrifiziert)

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
- 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]; Berechnungen des Öko-Instituts.

Neben dem Materialverbrauch wurden auch bei den Unterwerken die Transporte der Materialien berücksichtigt. Es wurde davon ausgegangen, dass Kupfer und Stahl mit der Bahn transportiert werden (300 km), Beton und Ziegelsteine hingegen mit einem Solo-Lkw mit zGG. über 26 t (20 km).

Energieerzeugung und Verteilung bis Unterwerk

Wie bereits in der Einleitung ausgeführt, ist im Rahmen dieser Studie keine detaillierte Analyse der mit der Stromherstellung und Verteilung bis zum Unterwerk verbundenen Materialmengen und den daraus resultierenden THG-Emissionen möglich (siehe Bild 12). Zudem ist es nicht sinnvoll, dass diese Emissionen bestimmten Streckenabschnitten zugeordnet werden. Sie sollten vielmehr auf die verbrauchte Kilowattstunde Strom bezogen werden, auch wenn diese Vorgehensweise von Vorgaben der PCR for Railways abweicht [PCR 2009a].

Um eine Einschätzung zur Größenordnung der damit zusammenhängenden THG-Emissionen zu erhalten, wird in dieser Studie auf das vom Öko-Institut entwickelte Stoffstrommodell GEMIS 4.5 (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme Version 4.5) zurückgegriffen. Dieses EDV-Tool wurde vom Öko-Institut in den Jahren 1987-1989 entwickelt und in den Folgejahren ständig aktualisiert [Fritsche et al. 2008].¹² GEMIS enthält Grund-Emissionsdaten zur Bereitstellung von Energieträgern (Prozessketten- und Brennstoffdaten) sowie zu verschiedenen Technologien zur Bereitstellung von Wärme und Strom. Weiterhin enthält GEMIS Emissionsdaten für die Herstellung von

¹² Die GEMIS-Version 4.5 wird kostenfrei unter www.oeko.de/service/gemis/ zum Download angeboten.

Materialien. Je nach Bedarf können somit die Emissionen von Energieträgern mit und ohne Berücksichtigung der Materialien zur Herstellung der Anlagen zur Energieumwandlung (z. B. Kraftwerke, Raffinerien) und Verteilung (z. B. Hochspannungsnetze) berechnet werden.

Diese Möglichkeit wird explizit zur Untersuchung des Einflusses der Materialvorleistungen für die Bahnstrombereitstellung genutzt. Zwar enthält GEMIS 4.5 kein aktuelles Bahnstromnetz, aber in Näherung können die Ergebnisse für das öffentliche Stromnetz herangezogen werden. Tabelle 29 zeigt für die Jahre 2005 und 2010 den Einfluss der Baumaterialien auf die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Stroms aus dem öffentlichen Hochspannungsnetz [Fritsche et al. 2008]. Demnach erhöhen sich bei Einbezug der Herstellungsaufwände von Kraftwerken und Überlandleitungen die THG-Emissionen um 1,1 bis 1,2 %, bezogen auf den Wert ohne Materialvorleistungen. Diese Erhöhung wird im Rahmen dieser Studie auch auf den Bahnstrom übertragen und schlägt damit prozentual analog auf die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionsfaktoren pro Personen- bzw. Tonnenkilometer der Elektrotraktion durch, die im Verkehrsemissionsmodell TREMOD hinterlegt sind (siehe unten).

Tabelle 29: 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]; Berechnungen des Öko-Instituts.				

Bereitstellung von Dieselkraftstoff

Auch die bisher bei Umweltvergleichen unberücksichtigten Emissionen, verursacht durch die Herstellung der Raffinerien oder Tankstellen, lassen sich nicht sinnvoll den Streckenabschnitten zuordnen. Sie müssen bezogen auf eine definierte Energieeinheit Diesel ermittelt werden. Auch für diese Analyse wird keine eigene tiefgehende Recherche durchgeführt, sondern wiederum auf das Stoffstrommodell GEMIS 4.5 zurückgegriffen [Fritsche et al. 2008].

Die Materialvorleistungen, bezogen auf ein TJ Diesel, betragen für das Jahr 2005 rund 390 kg CO₂ bzw. 430 g CO₂-Äquivalente (siehe Tabelle 30). In GEMIS unberücksichtigt bleiben dabei Materialaufwände zur Herstellung von Tankstellen. Aktuell betreibt DB

Energie rund 188 Tankstellen für Schienenfahrzeuge,¹³ die jede im Durchschnitt rund 1,7 Mill. Liter Diesel pro Jahr abgibt [Dube 2008]. Basierend auf Informationen zu den Tankanlagen der DB Energie GmbH in Chemnitz und Limburg wurde der mittlere Materialbedarf für eine Tankstelle auf rund 12 t Stahl für einen 80.000-Liter-Tank, 6 t Stahl für Gebäude und Auffangwannen unter den Gleisen sowie rund 40 m³ Beton für das Fundament geschätzt [Weco 2006]. Als Lebensdauer wurden 30 Jahre für Tank und Auffangwanne sowie 60 Jahre für das Fundament unterstellt. Tabelle 30 zeigt die mit der Tankstelleninfrastruktur verbundenen zusätzlichen THG-Emissionen pro TJ Diesel. Diese sind mit rund 25 g CO₂ bzw. CO₂-Äquivalenten fast vernachlässigbar klein.

Bezieht man die THG-Emissionen, die durch die Herstellung der Anlagen der Dieselproduktion entstehen, in die spezifischen THG-Emissionsfaktoren von Diesel, wie sie in TREMOD verwendet werden, mit ein, erhöht sich der CO₂-Emissionsfaktor pro TJ Diesel um 0,5 %, der CO₂-Äquivalent-Emissionsfaktor um 0,6 % (siehe Tabelle 30). Wie beim Strom wird diese prozentuale Erhöhung auf die TREMOD-THG-Emissionsfaktoren übertragen. Konkret bedeutet dies, dass die THG-Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer für die Dieseltraktion prozentual analog ansteigen (siehe unten).

Tabelle 30: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro TJ Dieseldieselkraftstoff 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 [Richter 2010]; GEMIS 4.5 [Öko-Institut 2008]; Berechnungen des Öko-Instituts.		

CO₂- und THG-Emissionen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt, werden ausschließlich die THG-Emissionen, bedingt durch die Herstellung und Wartung der Oberleitungen, Oberleitungsmasten sowie der Unterwerke, den elektrifizierten Strecken direkt zugeordnet. Tabelle 31 zeigt die spezifischen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer für Hochgeschwindigkeitsstrecken (HGS), Ausbaustrecken über 160 km/h (ABS) und übrige Strecken. Weiterhin wird zwischen freier Strecke und Tunnelstrecke

¹³ Siehe www.dbenergie.de/site/dbenergie/de/leistungen/tankdienste/tankdienste.html (abgerufen am 19.1.2010).

unterschieden. Die höchsten Emissionen mit 3,5 t CO₂ und 3,8 t CO₂-Äquivalenten pro Kilometer und Jahr entfallen für Oberleitungen mit Masten auf zweigleisige Hochgeschwindigkeitsstrecken außerhalb von Tunnels. Im Vergleich zu HGS liegen die THG-Emissionen der übrigen Strecken unabhängig vom Mastentyp rund 30 % niedriger. In Tunnels entfallen die Masten für die Oberleitungen, weshalb dort die CO₂ und CO₂-Äquivalent-Emissionen um 40 bis 55 % niedriger liegen als auf Strecken außerhalb von Tunnels. Die Unterwerke führen nochmals zu rund 0,3 t CO₂ bzw. CO₂-Äquivalenten pro zweigleisigen Streckenkilometer. Im Vergleich zu den Oberleitungen einschließlich Masten sind diese Emissionen von nach geordneter Bedeutung.

Tabelle 31: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer (elektrifiziert) durch den Bau von Unterwerken und Oberleitung, differenziert nach Oberleitungstyp und Streckentyp

	Eingleisig		Zweigleisig	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Oberleitung inkl. Mast				
HGS – Betonmasten	x	x	3,5	3,8
HGS – Tunnel	1,0	1,1	2,0	2,2
ABS – Betonmasten	1,5	1,6	3,0	3,2
ABS – Tunnel	0,8	0,9	1,6	1,7
Andere Strecken - Betonmasten	1,1	1,2	2,3	2,4
Andere Strecken - Stahlmasten	1,3	1,4	2,5	2,7
Andere Strecken – Tunnel	0,5	0,6	1,1	1,2
Unterwerke	0,1	0,2	0,3	0,3
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.				

Bild 14 zeigt die Summe der CO₂-Äquivalent-Emissionen aus Oberleitungen, Oberleitungsmasten sowie Unterwerken, differenziert nach Streckentyp, Streckenart (mit und ohne Tunnel) sowie Verursachergruppe. Den größten Anteil an den THG-Emissionen außerhalb der Tunnels haben die verbauten Stahlmengen. Die Kupferkabel tragen insbesondere bei HGS und ABS zu einem erheblichen Anteil zu den Emissionen bei. Durchweg bei allen Streckentypen tragen die Aluminiumausleger zur Befestigung des Längskettenwerkes (Fahrdrabt und Aufhängung) mit einem bedeutsamen Anteil zu den Gesamt-THG-Emissionen bei.

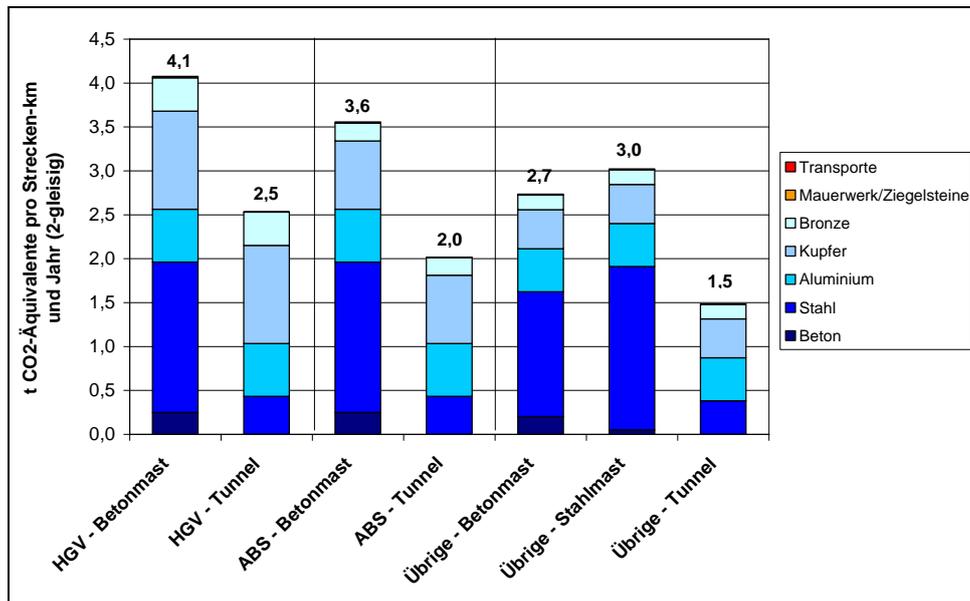


Bild 14: Spezifische CO₂-Emissionen pro Streckenkilometer durch den Bau von Oberleitungen, differenziert nach Verursachergruppen [Berechnungen des Öko-Instituts]

Tabelle 32: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer (elektrifiziert) durch den Bau von Unterwerken und Oberleitung, differenziert nach Oberleitungstyp und Streckentyp, bei einer Lebensdauer von 100 Jahren für langlebige Bauteile

	Eingleisig		Zweingleisig	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Oberleitung inkl. Mast				
HGS – Betonmasten	x	x	2,7	3,0
HGS – Tunnel	0,9	1,0	1,8	1,9
ABS – Betonmasten	1,1	1,2	2,3	2,4
ABS – Tunnel	0,7	0,7	1,3	1,4
Andere Strecken - Betonmasten	0,8	0,9	1,6	1,8
Andere Strecken - Stahlmasten	0,9	1,0	1,8	2,0
Andere Strecken – Tunnel	0,4	0,5	0,9	0,9
Unterwerke	0,1	0,2	0,3	0,3
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.				

Da ein Teil der bei Oberleitungen, Masten und Unterwerken verbauten Komponenten langlebig ist, wird im Rahmen der Sensitivitätsberechnung analysiert, wie sich die THG-Emissionen pro Streckenkilometer ändern, wenn für diese statt 60 Jahren eine Lebensdauer von 100 Jahren unterstellt wird. Das Ergebnis zeigt Tabelle 32. Da viele Kompo-

nenen (z. B. Fahrdrabt) ohnehin kurzlebiger sind, schlägt die Lebensdauerverlängerung sich nur zum Teil im Ergebnis nieder. Statt der maximal möglichen Minderung von 40 % liegen die Minderungen für die Oberleitungen und Masten bei 15-25 %. Für die Unterwerke wirkt sich die Minderung sogar noch geringer aus (rund 5 %).

Für die Stromerzeugung und Verteilung des Bahnstroms bis Unterwerk sowie für die Bereitstellung des Diesels wurden in den vorangegangenen Kapiteln prozentuale Erhöhungen der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Kilowattstunde Strom bzw. pro TJ Diesel für die Herstellungsaufwände der Kraftwerke, Überlandleitungen, Raffinerien und Tankstellen ermittelt. Diese prozentualen Werte können direkt auf die im Verkehrsemissionsmodell TREMOD hinterlegten spezifischen THG-Emissionsfaktoren angewandt werden. Da diese Faktoren multiplikativ in die Emissionsberechnungen eingehen, erhöhen sich damit auch die spezifischen THG-Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer der Elektro- bzw. der Dieseltraktion prozentual um diese Werte. Da sich allerdings die Energieverbräuche von Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr deutlich unterscheiden, führt diese prozentuale Erhöhung zu, absolut gesehen, unterschiedlichen Werten. Sie sind in Bild 15 dargestellt. Diese Werte müssen ebenfalls wie die pro Streckenkilometer ermittelten Werte als Teil der Emissionen der Verkehrsinfrastruktur zu den in Bild 1 dargestellten THG-Emissionsfaktoren hinzuaddiert werden (siehe Kapitel 3.8).

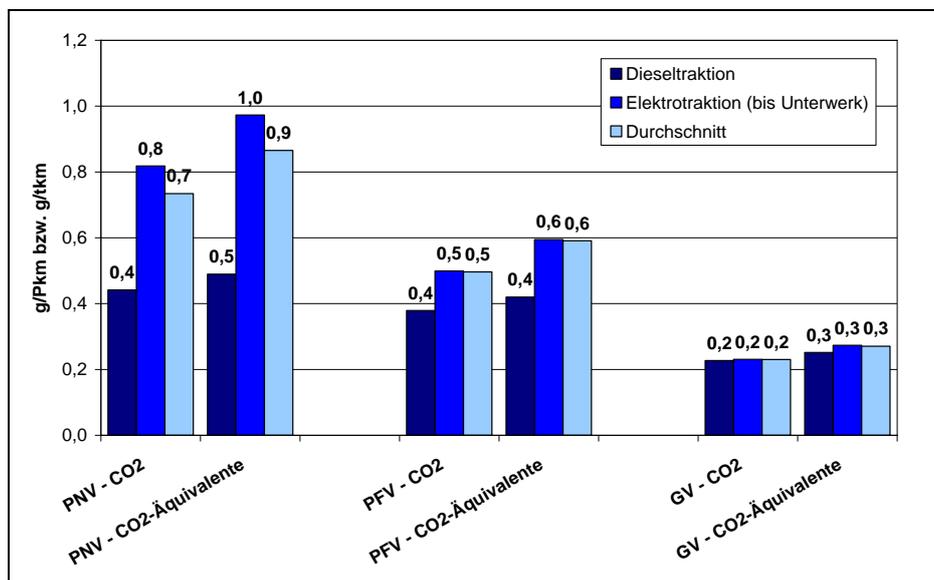


Bild 15: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer durch die Herstellung der Infrastruktur zur Erzeugung und Verteilung von Diesel und Strom (bis Unterwerk), den Personennahverkehr (PNV), Personenfernverkehr (PFV) und Güterverkehr (GV) im Jahr 2008 [Richter 2010; eigene Berechnungen]

3.6 Signaltechnik und Telekommunikation

Für den sicheren Betrieb des Schienenverkehrs existiert eine aufwendige Signal- und Kommunikationstechnik entlang der Bahnstrecken. Grundsätzlich sind die Fahrwege in Einzelabschnitte eingeteilt (so genannte Blockabschnitte), in die ein Zug nur einfahren kann, wenn der Abschnitt frei ist. Die Freigabe erfolgt durch die Signale, die i. d. R. von Stellwerken aus gesteuert werden. In Ausbau- und Neubaustrecken kommen zudem weitere technische Systeme, die so genannte Linienzugbeeinflussung (siehe unten), zum Einsatz, um den sicheren Fahrbetrieb für Geschwindigkeiten über 160 km/h zu gewährleisten [Fendrich 2007; Matthews 2007].

Im Folgenden werden die Materialmengen für die Errichtung und Wartung der Signale, der Signal- und Kommunikationskabel, der zur Verlegung notwendigen Kabelschächte, der Linienzugbeeinflussung sowie der Stellwerke ermittelt und darauf aufbauend die THG-Emissionen der Signaltechnik und Kommunikationstechnik. Unberücksichtigt bleiben hierbei die rund 2.900 Basisstationen für das Mobilfunksystem GSM-Rail (Global System for Mobile Communication – Rail), das sich derzeit bei der Deutschen Bahn im Aufbau befindet und im Zusammenhang mit der Einführung des Europäischen Zug-Kontroll-Systems (ETCS – European Train Control System) steht [Matthews 2007].

Signale

Systra Conseil [UIC 2010] gehen davon aus, dass auf der zweigleisigen Neubaustrecke LGV Est von Vaires-sur-Marnes nach Baudrecourt 1.000 Signale mit einem Gewicht von jeweils 100 kg installiert sind. Dies bedeutet, dass pro zweigleisigen Streckenkilometer rund 3,3 Signale stehen. Köser et al. [2002] geben an, dass auf der zweigleisigen 40 km langen Modellstrecke Halle-Leipzig 84 Haupt- und Vorsignale (2,1 Signale pro zweigleisigen Streckenkilometer) sowie 76 Signale an Weichen errichtet sind (1,9 Signale/Strecken-km). Das Gewicht der Haupt- und Vorsignale wird mit 800 kg Stahl und 600 kg Beton angegeben. Für die Weichen-Signale wird hingegen von einem Gewicht von 30 kg Stahl ausgegangen. Keles [2007] nennt als Gewichte für Signale ohne Betonfuß zwischen 350 kg und 600 kg, wobei im Einzelfall auch Gewichte bis 800 kg auftreten können. Die Annahmen von Köser et al. [2002] und Keles [2007] unterscheiden sich also deutlich von denen von Systra Conseil [UIC 2010]. Auch die angenommenen Lebensdauern liegen bei Köser et al. [2007] mit 25 Jahren für Haupt- und Vorsignale bzw. 15 Jahren für Weichen-Signale deutlich unter denen von Systra Conseil [UIC 2010] (50 Jahre). In Anbetracht des relativ geringen Einflusses der Signale auf das Gesamtergebnis und im Sinne einer konservativen Abschätzung wurden in der vorliegenden Studie die höheren Annahmen von Köser et al. [2002] übernommen. Der jährliche Instandhaltungsaufwand wurde entsprechend dieser Arbeit mit 0,5 % des Errichtungsaufwandes angesetzt. Der Materialverbrauch bei eingleisigen Strecken wird mit 60 % des Verbrauches für eine zweigleisige Strecke geschätzt. Zudem wurde davon ausgegangen, dass die Signale über eine Entfernung von 400 km mit einem 40-t-Last-/Sattelzug transportiert werden.

Tabelle 33: Verbrauch an Beton und Stahl für Herstellung und Unterhalt von Haupt-, Vor- und Weichen-Signalen

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
Eingleisige Strecke					
- Beton	m ³	0,42	0,02	0,00	0,02
- Stahl	t	0,80	0,03	0,00	0,04
Zweigleisige Strecken					
- Beton	m ³	0,70	0,03	0,00	0,03
- Stahl	t	1,34	0,06	0,01	0,06

Quellen: [Köser et al. 2002]; Berechnungen des Öko-Instituts.

Kabel für Signaltechnik und Telekommunikation

Die Signale sind über parallel zu den Strecken laufende Kabel mit den Stellwerken verbunden. Zusätzlich laufen parallel zur Strecke die so genannten Streckenfernmelde-kabel, die zur bahninternen betrieblichen Kommunikation genutzt werden [Fendrich 2007]. Kabel, die der Übertragung der Streckensignale dienen, sowie Kabel zur Kommunikation besitzen i. d. R. klassische Kupferadern. Aktuell werden aber auch vermehrt Konstruktionen mit Lichtwellenleitern (LWL) aus hochreinem Siliziumoxid eingesetzt, welche sich durch Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Beeinflussung und sehr hohe Datenübertragungskapazitäten auszeichnen. [Fendrich 2007].

Laut Fendrich [2007] werden bei Kupferkabeln für Isoliermaterial überwiegend Polyvinylchlorid (PVC) und vernetztes Polyethylen (VPE) verwendet (siehe Bild 16). Abhängig von der elektrischen Beanspruchung und den Eigenschaften der Isoliermaterialien müssen Kabel durch eine elektrische Schirmung aus metallenen Aufbauelementen ergänzt werden. Der Nennquerschnitt von Kupferschirmen ist in DIN VDE 0276 geregelt. Als Mantelmaterial werden laut Fendrich [2007] in der Regel PVC und Polyethylen (PE) verwendet.

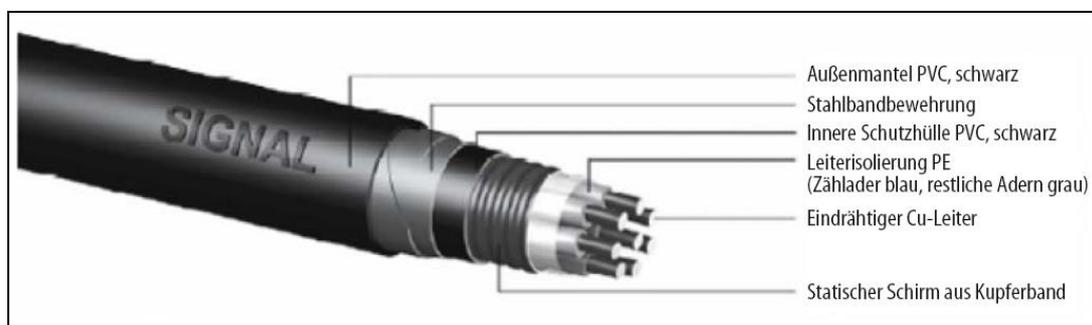


Bild 16: Aufbau eines typischen Bahn-Signalkabels [Fendrich 2007]

Um die Materialaufwände der verlegten Kabel zu bestimmen, wurden Literaturwerte mit Angaben von Herstellern verglichen. Köser et al. [2002] gehen davon aus, dass pro laufenden Kabel-Kilometer 0,3 t Kupfer und 0,2 t Polyvinylchlorid (PVC) benötigt werden. Systra Conseil [UIC 2010] hingegen geht beim Kupfer von deutlich höheren Werten aus: 1,8 t Kupfer und 0,2 t PE pro Kabel-Kilometer. Aus dem Produktangebot eines Herstellers¹⁴ von Bahnkabeln geht hervor, dass der Median von rund 240 gelisteten Signalkabel mit einem Mantel aus Polyethylen (PE) ein Gewicht von 1,14 t/km aufweist. Der durchschnittliche Massenanteil des Kupfers beträgt dabei 60 %. Damit ergeben sich pro Kabel-Kilometer Materialmengen von 0,68 t Kupfer und 0,46 t PE – mit diesen Angaben wird im Rahmen dieser Studie gerechnet. Weitere Kabeltypen (z. B. LWL-Kabel) werden im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die Anzahl der parallel zur Strecke verlegten Kabel hängt von der Anzahl der Signale und damit von der Entfernung vom Stellwerk, der Art der Stellwerke (bei mechanischen Stellwerken ist die Anzahl der Kabel geringer) und von der Art der Strecke (Neubaustrecken, Nahverkehrsstrecken) ab. Zudem liegen parallel zu den Signal- und Telekommunikationskabeln oftmals auch noch Starkstromkabel (50 Hz). Eine genaue Anzahl von Kabeln festzulegen, ist daher nur schwer möglich. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Kabel im Vergleich zu den reinen Streckenlängen oftmals länger sind.

Köser et al. [2002] gehen von drei parallel liegenden Kabel für die zweigleisige Strecke Halle-Leipzig aus, wobei jedes Kabel zudem 25 % länger ist als die Eisenbahnstrecke selbst. Insgesamt ergeben sich somit 3,6 km Kabel pro zweigleisigen Streckenkilometer. Bei Systra Conseil [UIC 2010] liegt für die erwähnte Neubaustrecke LGV-Est der vergleichbare Wert bei 13,3 km Kabel pro zweigleisigen Streckenkilometer. Da es keine abgesicherten Werte für die Kabellängen gibt, wird für alle Strecken mit einer durchschnittlichen Kabellänge von 8,5 km pro zweigleisigen Streckenkilometer gerechnet.

Auch in Bezug auf die Lebensdauer der Kabel unterscheiden sich die Literaturquellen. Nach Fendrich [2007] kann je nach Belastungen und Umgebungseinflüssen mit einer Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren gerechnet werden. Systra Conseil [UIC 2010] gehen ebenfalls von einer Lebensdauer von 50 Jahren aus, während Köser et al. [2002] lediglich eine Lebensdauer von 15 Jahren annehmen. In der vorliegenden Studie wurde mit einer mittleren Standzeit von 30 Jahren gerechnet. Die Materialmengen für die Herstellung der Kabel, wie sie in dieser Studie verwendet wurden, sind in Tabelle 34 dargestellt. In der vorliegenden Studie wurde angenommen, dass der Errichtungsaufwand einer eingleisigen Strecke 60 % einer zweigleisigen Strecke entspricht. Die Materialmengen für die jährliche Instandhaltung wurden mit 0,5 % der Herstellungsaufwände angesetzt [Köser et al. 2002]. Für die Berechnung der THG-Emissionen wurden als Prozesse „Kupfer, primär, ab Raffinerie“ sowie „Polyethylen (HDPE), Granulat, ab Werk“ verwendet (siehe Tabelle 3). Neben den Umweltauswirkungen der Materialien wurden auch die Transporte der Kabel betrachtet. Dabei wurde angenommen, dass die Komponenten über eine Distanz von 400 km mit einem Sattelzug mit zGG von 40 t transportiert werden.

¹⁴ Recherchen auf der Internetseite: <http://www.bayka.de/go.aspx?pb=N> (abgerufen am 08.02.2010)

Tabelle 34: Verbrauch an Kupfer und PE für Herstellung und Unterhalt von Signal- und Kommunikationskabel aus Kupfer

	Einheit	Errichtungsaufwand		Instandhaltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
1-gleisige Strecke					
- Kupfer	t	3,46	0,12	0,02	0,13
- Polyethylen (HDPE)	t	2,35	0,08	0,01	0,09
2-gleisige Strecken					
- Kupfer	t	5,77	0,19	0,03	0,22
- Polyethylen (HDPE)	t	3,92	0,13	0,02	0,15
Quellen: [Köser et al. 2002]; [UIC 2010]; [Fendrich 2007]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Kabelkanal

Die parallel zur Strecke verlegten Signal-, Telekommunikations- und Stromkabel werden überwiegend in Kabelkanälen verlegt. Es gibt hierbei verschiedene Bauformen aus Kunststoffen, Stahl (meist aufgeständert) und Beton. Die Kabelkanäle aus Beton sind am weitesten verbreitet und werden im Rahmen dieser Studie zugrunde gelegt [Fendrich 2007].

Köser et al. [2002] gehen von einem Betongewicht von 90 t pro Kabelkanal-Kilometer für eine zweigleisige Strecke aus; Systra Conseil [UIC 2010] berücksichtigen diese Materialaufwendungen nicht explizit. Eigene Recherchen bei Herstellern¹⁵ von Betonelementen für Kabelkanäle für Bahnstrecken haben ergeben, dass das Gewicht an Beton mit 90 kg tendenziell zu niedrig ist. Das nachfolgende Bild zeigt die Spezifikationen von Kabeltrögen eines Herstellers, welche nach den Vorschriften der DB AG und des Eisenbahnbundesamtes gefertigt werden. Das verwendete Material ist Beton B 35 nach DIN 1045. Danach liegt das Gewicht pro Meter Kabelkanal (inkl. Deckel), abhängig von der Kanalgröße, zwischen 104 und 264 kg [BFL 2006] (siehe Bild 17). Bei einem anderen Hersteller liegen die Werte zwischen 93 und 264 kg Beton pro Kabelkanal-Kilometer.¹⁶ In der vorliegenden Studie wird von einem mittleren Gewicht von 200 kg Beton pro Meter Kabelkanal ausgegangen. Zusätzlich wird unterstellt, dass für jede zweigleisige Strecke ein Kabelkanal benötigt wird.

¹⁵ Siehe www.graspointner.at/kabeltroege_kabelkanaele.html und www.bfl-gmbh.de.

¹⁶ Siehe www.graspointner.at/kabeltroege_kabelkanaele.html.

Kabelkanal Größe	lichte	lichte	Gewicht		
	Weite	Höhe	Trog	Deckel	gesamt
Größe I	100	160	84	10	104
Größe II	240	155	124	20	164
Größe III	240	260	176	20	216
Größe III a.i.F	345	155	143	27	197
Größe IV	540	160	180	42	264

Bild 17: Abmessungen und Gewichte von Beton-Kabelkanälen mit einer Baulänge von einem Meter [BFL 2006]

Die Lebensdauer wurde nach Köser et al. [2002] mit 25 Jahren angesetzt. Analog zu den anderen Komponenten der Signal- und Kommunikationsinfrastruktur wurde nach Köser et al. [2002] davon ausgegangen, dass der jährliche Instandhaltungsaufwand bei 0,5 % des Errichtungsaufwandes liegt. Somit ergeben sich die in Tabelle 35 aufgeführten Materialverbräuche. Im Falle einer eingleisigen Strecke wird davon ausgegangen, dass der Materialverbrauch in der Höhe von 60 % des Verbrauches einer zweigleisigen Strecke liegt. Zudem wurde davon ausgegangen, dass die Betonfertigteile über eine Entfernung von 400 km mit einem Sattelzug mit zGG von 40 t transportiert werden.

Tabelle 35: Betonverbrauch für Herstellung und Unterhalt von Kabelkanälen

	Einheit	Errichtungs- aufwand		Instand- haltung	Insgesamt
		pro km	pro km und a	pro km und a	pro km und a
1-gleisige Strecke	t	50,0	2,00	0,25	2,25
2-gleisige Strecken	t	83,3	3,33	0,42	3,75

Quellen: [BFL 2006]; [Köser et al. 2002]; Berechnungen des Öko-Instituts.

Linienzugbeeinflussung

Die konventionelle Signalisierung mit Vor- und Hauptsignal kann nur auf Eisenbahnstrecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 160 km/h durchgeführt werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die Zeit des Triebfahrzeugführers ab, ortsfeste Signale lang genug wahrzunehmen. Zudem müsste aufgrund der immer länger werdenden Bremswege der Abstand zwischen Vor- und Hauptsignalen drastisch erhöht werden, was wiederum die Leistungsfähigkeit der Strecke reduzieren würde [Matthews 2007].

Aus diesem Grund ist für Ausbau- und Neubaustrecken, die nach Definition für Geschwindigkeiten über 160 km/h zugelassen sind, zur Überwachung des Fahrverhaltens von Zügen die bereits erwähnte Linienzugbeeinflussung (LZB) vorgeschrieben. Kernstück des Systems sind Streckenzentralen mit Rechnerausstattung, die mit den Stellwerken und Streckenzentralen verbunden sind. Weiterhin sind Linienleiterschleifen im

Gleis verlegt, die induktiv den Datenaustausch mit den Schienenfahrzeugen ermöglichen [Matthews 2007].

Da keine Angaben zu den verbauten Materialien der Streckenzentralen vorliegen, können sie im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Dies ist aber durchaus vertretbar, da die Streckenzentralen Abstände von 30-60 km aufweisen und daher materialseitig von untergeordneter Bedeutung sein dürften. Die Linienleiterschleifen bestehen aus zwei Kupferkabeln, von denen eines in der Gleismitte, eines im Schienenfuß verlegt ist. Alle 100 m werden die Kabel getauscht [Matthews 2007]. Pro zweigleisigen Streckenkilometer werden somit rund 4,1 km Kabel verlegt (mit Berücksichtigung der Kabelkreuzungen). Die Materialmengen werden analog den Kabeln für Signaltechnik und Telekommunikation berechnet (siehe oben). Für eingleisige Strecken wird die halbe Materialmenge zugrunde gelegt. Die in dieser Studie verwendeten Materialmengen für die LZB von Ausbau- und Neubaustrecken (ABS und NBS) sind in Tabelle 36 aufgeführt.

Tabelle 36: Verbrauch an Kupfer und PE für Herstellung und Unterhalt von Kabel für die Linienzugbeeinflussung von Ausbau- und Neubaustrecken (ABS und NBS)

	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>
1-gleisige ABS und NBS					
- Kupfer	t	1,39	0,05	0,01	0,05
- Polyethylen (HDPE)	t	0,94	0,03	0,00	0,04
2-gleisige ABS und NBS					
- Kupfer	t	2,79	0,09	0,01	0,11
- Polyethylen (HDPE)	t	1,89	0,06	0,01	0,07
Quellen: [Matthews 2007]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Stellwerke

Der Bestand an Stellwerken im Netz der DB AG betrug im Jahr 2008 rund 4.480 Stück [DB 2009d]. Es existieren verschiedene Bauformen: mechanische Stellwerke, elektromechanische Stellwerke, Drucktastenstellwerke und elektronische Stellwerke. Neu errichtete Stellwerke der DB AG werden als elektronische Stellwerke realisiert [Köser et al. 2002], dennoch haben die mechanischen Stellwerke auch heute noch einen Anteil von 35 % [Kötting 2010].

Köser et al. [2002] und Systra Conseil [UIC 2010] betrachten den Materialaufwand von Stellwerken an Neubaustrecken. Systra Conseil [UIC 2010] gehen von 50 m² großen Gebäuden mit jeweils 4 t Stahlkomponenten aus, wogegen Köser et al. [2002] von 91 t Beton bzw. Ziegelsteinen, 8 t Stahl, 0,45 t Kupfer, 0,5 t Kunststoffen und 0,4 t Öl ausgeht. Der von Systra Conseil verwendete ecoinvent-Datensatz (Gebäude, Halle) basiert auf einem Gebäude mit einer Fläche von 1.500 m². Bei Stellwerken handelt es sich

aber meist um kleinere zweistöckige, teilweise auch turmartige Gebäude. Aus diesem Grund wird in dieser Studie auf den ecoinvent-Datensatz „Gebäude, mehrstöckig“ zurückgegriffen, welcher auf mehrstöckigen Mehrfamilienhäusern basiert [Kellenberger et al. 2007].

Um den Errichtungsaufwand zu bestimmen, wird angenommen, dass es sich bei den Stellwerken um Gebäude mit einem Volumen von 250 m³ handelt, was bei einem zweistöckigen Gebäude eine Grundfläche von etwa 40 m² bedeutet. Die daraus resultierende Materialmenge an Beton/Ziegelsteinen liegt mit 102 t etwas über der von Köser et al. [2002]. Zusätzlich zu den Materialmengen für die Gebäudehülle werden die von Köser et al. ermittelten Materialmengen für die technischen Komponenten verwendet (Stahl, Kupfer etc.). Die Lebensdauer der technischen Komponenten wird dabei mit 15 Jahren angesetzt und in dieser Studie übernommen. Die Lebensdauer des mehrstöckigen Gebäudes des ecoinvent-Datensatzes beträgt nach Kellenberger et al. [2007] 80 Jahre. Köser et al. [2002] hingegen gehen von einer Standzeit der Gebäude von 25 Jahren aus. In der vorliegenden Studie wird jedoch nach den PCR for Railways [2009a] mit einer Lebensdauer von 60 Jahren gerechnet. Auf eine Sensitivitätsbetrachtung mit einer Lebensdauer von 100 Jahren wird aufgrund der geringen Bedeutung der Stellwerke für die gesamten THG-Emissionen der Schieneninfrastruktur verzichtet. Der jährliche Wartungs- und Instandhaltungsaufwand der Stellwerke wird nach Köser et al. [2002] mit rund 0,5 % des Errichtungsaufwandes abgeschätzt.

Vereinfachend wird in der vorliegenden Studie davon ausgegangen, dass sich die verschiedenen Bauformen der Stellwerke hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung nicht unterscheiden. Weiterhin ist eine Zuordnung der Stellwerke zu den Streckenabschnitten des Datensatz der DB AG nicht möglich [DB 2009a]. Aus diesem Grund werden die Materialmengen aller Stellwerke auf einen Gleiskilometer bezogen (DB AG: rund 63.800 Gleiskilometer ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg). Die in dieser Studie verwendeten Materialmengen für Stellwerke sind in Tabelle 37 aufgeführt.

Tabelle 37: 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]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

CO₂- und THG-Emissionen

Das Berechnungsergebnis für die spezifischen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch den Bau der Signal- und Kommunikationstechnik zeigt Tabelle 38. Insgesamt entfallen somit bei Ausbau- und Neubaustrecken (ABS und NBS) auf zweigleisige Strecken 2,9 Tonnen CO₂ bzw. 3,1 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Streckenkilometer und Jahr auf die Signal und Kommunikationstechnik. Den größten Anteil haben dabei die Kabelkanäle mit rund 40 % und die Kabel mit 30 %. Die Signale, aber auch die Stellwerke sind von nach geordneter Bedeutung. Bei den übrigen zweigleisigen Strecken reduzieren sich die CO₂-Emissionen auf 2,5 t und die CO₂-Äquivalent-Emissionen auf 2,6 t pro Kilometer und Jahr. Damit liegen diese Strecken rund 15 % unter den Werten von ABS und NBS. Wie oben aufgeführt, ist hierbei aber nicht berücksichtigt, dass sich ggf. auch die Anzahl der Kabel und Signale zwischen ABS und NBS auf der einen Seite und übrigen Strecken auf der anderen Seite unterscheiden.

Bei eingleisigen Strecken von ABS und NBS liegen die Emissionen in der Höhe von 1,8 Tonnen CO₂ bzw. 1,9 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Streckenkilometer und Jahr. Bei den übrigen Strecken reduzieren sich die entsprechenden Werte auf 1,6 t CO₂ und 1,7 t CO₂-Äquivalente. Für die Berechnung der Emissionen von Kabeln, Signalen und Kabelkanälen für eingleisige Strecken wurde wie bei den anderen Infrastrukturen (z. B. Brücken, Tunnel) die vereinfachte Annahme getroffen, dass für deren Bau und Instandhaltung 60 % der Materialmengen und damit 60 % der Emissionen von zweigleisigen Strecken anfallen. Lediglich bei der Linienzugbeeinflussung wurden der Materialverbrauch und die Emissionen halbiert.

Tabelle 38: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Streckenkilometer durch die Errichtung von Kabeln, Kabelkanälen und Signalen

	Eingleisig		Zweigleisig	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/km/a	t/km/a	t/km/a	t/km/a
Ausbau-/Neubaustrecke	1,8	1,9	2,9	3,1
Signale	0,1	0,1	0,1	0,1
Kabel	0,5	0,6	0,9	1,0
Kabelkanäle	0,7	0,8	1,2	1,3
Linienzugbeeinflussung	0,2	0,2	0,4	0,5
Stellwerke	0,2	0,3	0,2	0,3
Übrige Strecken	1,6	1,7	2,5	2,6
Signale	0,1	0,1	0,1	0,1
Kabel	0,5	0,6	0,9	1,0
Kabelkanäle	0,7	0,8	1,2	1,3
Linienzugbeeinflussung	0,2	0,2	0,4	0,5
Stellwerke	0,2	0,3	0,2	0,3
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.				

Bild 18 zeigt die CO₂-Äquivalent-Emissionen der Signal- und Kommunikationstechnik pro zweigleisigen Streckenkilometer für ABS/NBS sowie übrige Strecken. In dieser Abbildung sind zusätzlich die Verursacher der Emissionen aufgeführt (eingesetzte Materialien bzw. Transporte). Die Emissionen des Herstellungsaufwandes des Betons dominieren in beiden Fällen die THG-Emissionen (39 % bei ABS/NBS sowie 47 % bei übrigen Strecken). Im Wesentlichen ist der Betonverbrauch auf die Kabelkanäle zurückzuführen. Mit einem Anteil von 33 % bei ABS/NBS und 26 % bei den übrigen Strecken spielt der Kupferverbrauch ebenfalls eine sehr bedeutende Rolle. Der Einfluss der Stellwerksgebäude (Außenhülle) auf die Emissionen hingegen ist mit 6 % bzw. 8 % bei den verschiedenen Streckentypen gering. Auch die Transporte verursachen nur geringe Emissionen.

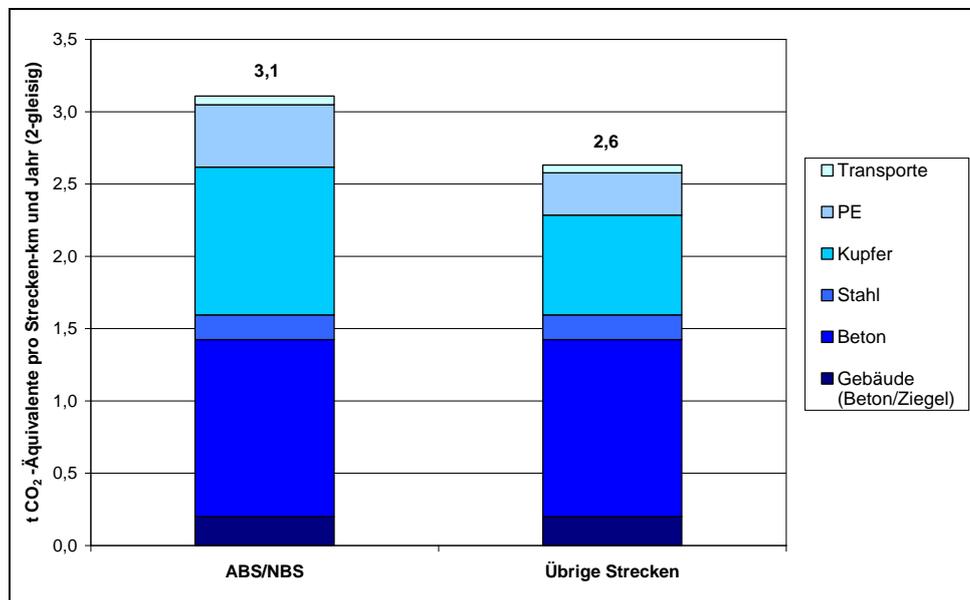


Bild 18: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro zweigleisigen Streckenkilometer durch Herstellung und Wartung der Signal- und Kommunikationstechnik, differenziert nach Art der Strecke und Verursacherguppen [Berechnungen des Öko-Instituts]

3.7 Gebäude (Bahnhöfe, Werke und Güterbahnhöfe)

Nachfolgend werden die CO₂-Emissionen und die CO₂-Äquivalent-Emissionen bestimmt, die durch die Errichtung der Gebäude der Personenbahnhöfe, der Wartungs- und Instandhaltungswerke und der Güterbahnhöfe, die am Streckennetz der DB AG liegen, verursacht werden. Dabei werden die für die Errichtung notwendigen Materialmengen mit den in Kapitel 2.4 beschriebenen THG-Emissionsfaktoren verknüpft (siehe Tabelle 3).

Personenbahnhöfe

Im Netz der DB AG werden aktuell 5395 Personenbahnhöfe betrieben [DB 2009c]. In dieser Zahl sind jedoch auch die reinen S-Bahnhöfe der Gleichstrom-S-Bahnen Berlin und Hamburg enthalten, die in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden. Im Berliner S-Bahn-Netz werden 166 Bahnhöfe betrieben [DB 2010b], von denen 14 auch den regionalen und Fernverkehr bedienen [DB 2009c] und die dementsprechend Berücksichtigung finden. Im Netz der Hamburger S-Bahn werden 68 Haltestellen betrieben [DB 2010c], wobei jedoch sieben Bahnhöfe in Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen für den Fern- und Nahverkehr bedeutend sind [DB 2009c] und daher berücksichtigt wurden. Insgesamt finden in der vorliegenden Studie somit 5.182 Bahnhöfe Berücksichtigung.

Tabelle 39: Übersicht über die Kategorien der Personenbahnhöfe der Deutschen Bahn AG und deren Anzahl im Jahr 2009

Ka- tegorie	Bahnhofsart	Anzahl der Bahnhöfe	Anteil an der Anzahl
		Anzahl	In %
1	Fernverkehrsknoten	20	0,4%
2	Fernverkehrssystemhalt	63	1,2%
3	Regionalknoten mit möglichem Fernverkehrshalt	216	4,2%
4	Nahverkehrssystemhalt/Nahverkehrsknoten	561	10,8%
5	Nahverkehrssystemhalt	1376	26,6%
6	Nahverkehrshalt	2.946	56,9%
	Insgesamt	5.182	100,0%
<i>Quelle:</i> [DB 2009c].			

Die Bahnhöfe werden von der DB AG nach der verkehrlichen Bedeutung in sechs verschiedene Kategorien eingestuft (siehe Tabelle 39). Dabei werden unter anderem die Anzahl der Reisenden und die Anzahl der Zughalte sowie die Verknüpfung zwischen Nah- und Fernverkehr berücksichtigt [DB 2010d]. Auf die für den Personenfernverkehr wichtigen Bahnhöfe der Kategorie 1, 2 und 3 entfallen gerade mal 5,8 % aller Bahnhöfe. Jedoch werden auch diese Bahnhöfe für den Personennahverkehr genutzt. Auf Basis von Zugzählungen wurden die in Tabelle 40 aufgeführten Anteile des Personennahverkehrs für die Bahnhofskategorien 1-3 ermittelt. Die Bahnhofskategorien 5-6 werden vollständig dem Personennahverkehr zugeschlagen. Damit entfallen faktisch lediglich rund 1 % aller Bahnhöfe auf den Personenfernverkehr. Die Bahnhofsgebäude des Fernverkehrs sind aber in der Regel größer als die des Regional- und Nahverkehrs und haben deshalb einen überproportional höheren Anteil an den THG-Emissionen im Verhältnis zu ihrer Anzahl (siehe unten).

Tabelle 40: Anteil des Personennahverkehrs an den Zughalten in Bahnhöfen der Kategorie 1 bis 3

Ka- te- gorie	Bahnhofsart	Anteil Nahverkehr	Anzahl Stich- proben
		In %	Anzahl
1	Fernverkehrsknoten	70 %	4
2	Fernverkehrssystemhalt	70 %	6
3	Regionalknoten mit möglichem Fernverkehrshalt	90 %	15

Quelle: [DB 2009f].

Die für die Errichtung der Bahnhöfe verwendeten Materialien sind mit wenigen Ausnahmen (z. B. Hauptbahnhof in Berlin) nicht bekannt. Um dennoch eine Aussage über die Umweltauswirkung der Errichtungsaufwände der Bahnhöfe treffen zu können, wurden in der vorliegenden Studie vereinfachend die Materialien Beton und Bewehrungsstahl betrachtet, die sich durch einen hohen Materialanteil und eine hohe Relevanz bezüglich der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen auszeichnen. Die hierfür benötigten Mengen wurde dabei mit Hilfe der Gebäudeflächen und der Geschossflächen ermittelt. Zusätzlich wurden bei der Analyse die Bahnsteigflächen berücksichtigt. Köser et al. [2002] bestimmen den Errichtungsaufwand von drei Personenbahnhöfen, verknüpfen dafür Gebäudevolumina mit Stoffdaten der sog. BUWAL-Liste.

Als Datensatz zur Ermittlung der Gebäudeflächen standen ergänzende Daten der DB AG zur Verfügung, mit deren Hilfe für rund die Hälfte der Bahnhöfe Auswertungen zu den Bahnsteig- und Gebäudeinnenflächen nach Bahnhofskategorie durchgeführt werden konnten. Die Grunddaten decken Bahnhöfe der Kategorien 1 bis 3 mit jeweils über 90 % ab. Auf Basis dieser detaillierten Daten wurden die in Tabelle 41 dargestellten mittleren Gebäudeinnenflächen (ohne Zugänge) und Bahnsteigflächen, differenziert nach Bahnhofskategorie, vom Öko-Institut berechnet. Für diese Analyse wurden die Bahnhofskategorien 4 bis 6 zusammengefasst.

Tabelle 41: 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]; Berechnungen des Öko-Instituts.

Tabelle 42: 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					
Bahnhofskategorie 1					
- Beton	m ³	25.075	417,9	x	417,9
- Bewehrungsstahl	t	1.177	19,6	x	19,6
Bahnhofskategorie 2					
- Beton	m ³	10.423	173,7	x	173,7
- Bewehrungsstahl	t	477	7,9	x	7,9
Bahnhofskategorie 3					
- Beton	m ³	5.358	89,3	x	89,3
- Bewehrungsstahl	t	238	4,0	x	4,0
Bahnhofskategorie 4-6					
- Beton	m ³	1.606	26,8	x	26,8
- Bewehrungsstahl	t	70	1,2	x	1,2
Lebensdauer 100 Jahre					
Bahnhofskategorie 1					
- Beton	m ³	25.075	250,8	x	250,8
- Bewehrungsstahl	t	1.177	11,8	x	11,8
Bahnhofskategorie 2					
- Beton	m ³	10.423	104,2	x	104,2
- Bewehrungsstahl	t	477	4,8	x	4,8
Bahnhofskategorie 3					
- Beton	m ³	5.358	53,6	x	53,6
- Bewehrungsstahl	t	238	2,4	x	2,4
Bahnhofskategorie 4-6					
- Beton	m ³	1.606	16,1	x	16,1
- Bewehrungsstahl	t	70	0,7	x	0,7
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.					

Zu Ermittlung der benötigten Mengen an Beton und Stahl wurde 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. 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 Bahnsteigen wurde hingegen von einem geringeren Stahlanteil ausgegangen (1,6 %) [Buchert et al. 2004]. Anhand von Luftbildern¹⁷ wurde die Anzahl der Stockwerke mehrerer Bahnhöfe jeder

¹⁷ Siehe www.bing.com/maps.

Kategorie bestimmt und in Kombination mit den Gebäudeinnenflächen die zur Errichtung benötigte Menge an Beton und Stahl errechnet. Die sich daraus ergebenden Beton- und Stahlmengen sind für jede Bahnhofskategorie ebenfalls in Tabelle 41 dargestellt. Die für die Bahnhofskategorie 1 verbauten Beton- und Stahlmengen liegen somit um den Faktor 16 bzw. 17 über denen der Bahnhofskategorien 4-6. Systra Conseil [UIC 2010] bilanzieren als Beispiel für einen großen Personenfernbahnhof den Berliner Hauptbahnhof, für dessen Errichtung 0,5 Mill. m³ Beton und 85.000 t Stahl benötigt wurden. Damit liegt dieser Bahnhof deutlich über den in dieser Studie getroffenen Annahmen zu Bahnhöfen der Kategorie 1. Zu diesen hohen Werten für den Berliner Hauptbahnhof kommt es wohl auch deshalb, weil es sich einerseits um einen besonders großen Bahnhof, andererseits um eine aufwändige Konstruktion mit Tiefbahnhof und Brücke über den Humboldthafen handelt.

Zur Berechnung der jährlichen Herstellungsaufwände wurde die Lebensdauer nach den PCR for Railways [2009a] mit 60 Jahren veranschlagt. Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsberechnung mit einer Lebensdauer von 100 Jahren durchgeführt (siehe Tabelle 42). Da keine Angaben zu den jährlichen Materialaufwänden von Instandhaltungsmaßnahmen an Bahnhöfen 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 der Errichtung von Brücken und Tunnels 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.

Werke

In den Werken 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].

Tabelle 43: Anzahl und prozentuale Verteilung der Werke auf die Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr im Jahr 2009

	<i>Anzahl</i>	<i>Anteil</i>
Personennahverkehr	53	50%
Personenfernverkehr	20	19%
Güterverkehr	34	32%
Insgesamt	107	100%
Quellen: [DB 2010e]; Berechnungen des Öko-Instituts.		

Die für die Errichtung benötigten Materialmengen an Beton und Stahl wurden für die Werke nach dem gleichen Ansatz wie bei den Personenbahnhöfen errechnet. Es wurde

von einer 1 m starken Betonschicht der Gebäudegrundflächen und von einer 0,2 m starken Betonschicht der Decken- und Geschossflächen ausgegangen. Da auch für die Werke keine Daten zu den Gebäudeflächen vorlagen, wurden diese anhand von Satellitenfotos mit der Software „Google Earth“¹⁸ abgeschätzt. Ähnlich wurde bei der Bestimmung der Anzahl der Stockwerke vorgegangen; dabei wurde auf Luftbilder des Internet-Tools „Bing Maps“¹⁹ zurückgegriffen.

Tabelle 44: Rechercheergebnisse zu Gebäudeflächen und Anzahl Stockwerke für ausgewählte Werke der Deutschen Bahn AG

Betreiber und Standort	Gebäude 1		Gebäude 2		Gebäude 3	
	Gebäudefläche	Anzahl Stockwerke	Gebäudefläche	Anzahl Stockwerke	Gebäudefläche	Anzahl Stockwerke
	<i>m²</i>	<i>Anzahl</i>	<i>M²</i>	<i>Anzahl</i>	<i>m²</i>	<i>Anzahl</i>
DB Fahrzeuginstandhaltung						
Nürnberg	32.600	1	17.600	2		
Neumünster	13.200	2	14.300	2	3.000	2
Fulda	9.500	2	3.200	1		
DB Fernverkehr AG						
Werk Berlin Rummelsburg	14.100	1	4.800	3		
Werk Dortmund/Spähenfelde	11.600	1	7.600	1	1.500	3
Werk Hannover	5.100	1	800	5		
DB Regio AG						
Werkstatt Cottbus	4.400	2	2.400	1		
Werkstatt Erfurt	15.600	2	3.900	2		
Werkstatt Freiburg	600	2	3.700	2	2.000	1
DB Schenker Rail						
Mannheim	13.600	2	500	5		
Hagen	3.600	1	8.000	1		
Quelle: Recherchen des Öko-Instituts.						

Tabelle 44 zeigt das Rechercheergebnis zu den Grundflächen und zur Anzahl der Stockwerke verschiedener Werke der Deutschen Bahn AG. Darauf aufbauend wurde ein durchschnittliches Werk mit einer Gebäudegrundfläche von 17.500 m² und einer Decken und Geschossfläche von 28.600 m² modelliert. Der Massenanteil des Bewehrungsstahles wird analog zu den Personenbahnhöfen mit 1,6 % bei der Bodenplatte und 3,2 % bei Decken- und Geschossflächen angenommen. Die sich aus dieser Modellierung ergebenden Materialmengen für Beton und Stahl sind in der Tabelle 45 darge-

¹⁸ Siehe <http://earth.google.de/download-earth.html>.

¹⁹ Siehe www.bing.com/maps.

stellt. Für die Berechnung der jährlichen Errichtungsaufwände wurde nach den PCR for Railways [2009b] eine Lebensdauer von 60 Jahren unterstellt. Zusätzlich wurde eine Sensitivität mit einer Lebensdauer von 100 Jahren berechnet. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 45 dargestellt. Für die jährliche Instandhaltung der Werke liegen keine verlässlichen Zahlen vor, weshalb sie in diesen Berechnungen unberücksichtigt blieb. Für die Transporte der Materialien zu den Baustellen wurde wie bei den Personenbahnhöfen von einer Distanz von 20 km für Beton und 300 km für Stahl ausgegangen.

Tabelle 45: 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: Berechnungen des Öko-Instituts.					

Güterbahnhöfe

In der vorliegenden Studie werden die Gebäude der Güterbahnhöfe berücksichtigt. Der einheitliche Entfernungszeiger für den internationalen Güterverkehr [DIUM 2009] listet für Deutschland 44 so genannte UTI-Terminals²⁰, 278 Ladestellen bei Bestimmungsbahnhöfen und 445 Bahnhöfe, die nicht zur Infrastruktur der Deutschen Bahn AG gehören, auf. Aufgrund von Überschneidungen der aufgeführten Statistikdaten sind 296 Terminals und Abladestellen der DB AG und 445 Unternehmen oder anderen Bahnunternehmen zuzuordnen [DIUM 2009].

Die Berücksichtigung der Gebäude der Güterbahnhöfe stellt sich als ungleich schwerer als bei den Personenbahnhöfen dar. Im Gegensatz zu den Personenbahnhöfen liegen keinerlei Daten zu Gebäudeflächen vor. Auch liegen keine Daten zu den verwendeten Materialien vor. Um den Einfluss der Güterbahnhöfe dennoch berücksichtigen zu können, wurden anhand von Luftbildern die Flächen der Gebäude einiger Bahnhöfe abgeschätzt.²¹ Dabei zeigte sich, dass einige Bahnhöfe, insbesondere die UTI-Terminals,

²⁰ UTI-Terminals sind zur Verladung von Großcontainern, Sattelaufliegern, Wechselbehältern und Transportmitteln, die hinsichtlich der ladedienstlichen Behandlung einem Container gleichgestellt werden können, geeignet [DIUM 2009].

²¹ Siehe <http://earth.google.de/download-earth.html>.

über große Gebäude mit Grundflächen von mehreren tausend Quadratmetern verfügen, andere Umschlagplätze hingegen mit kleinen Gebäuden mit einer Gebäudegrundfläche von nur ca. 100 m² ausgestattet sind. Im Rahmen der Recherchen wurden Gebäudeflächen von 36 Güterbahnhöfen per Luftbild ausgewertet und der Median als Rechengröße für die Bestimmung der Umweltauswirkung der Errichtung der Güterbahnhöfe herangezogen. Der modellierte mittlere Güterbahnhof besitzt demnach eine Fläche von 2.050 m². Diese Vorgehensweise ist nur sehr grob, ist aber aufgrund der Gesamtbedeutung für die THG-Emissionen gerechtfertigt.

In einem zweiten Schritt wurde anhand dieser Gebäudefläche wiederum die verbaute Menge an Beton und Stahl errechnet. Die Rechnung wurde analog zu den Personenbahnhöfen durchgeführt (Bodenplatte: 1 m, Decken und Geschossflächen: 0,2 m). Bei einer zugrunde gelegten Lebensdauer von 60 Jahren und der Annahme, dass es sich um zweistöckige Gebäude handelt, ergeben sich die in der Tabelle 46 dargestellten Materialmengen. Angaben zur Instandhaltung der Güterbahnhöfe lagen nicht vor, weshalb hierfür keine THG-Emissionen berechnet werden konnten. Neben den Materialien mit den entsprechenden Vorleistungen wurden die Transporte der Materialien zu den Baustellen berücksichtigt. Dabei wurde wie bei den Personenbahnhöfen von einer Distanz von 20 km für Beton und 300 km für Stahl ausgegangen.

Tabelle 46: 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					
- Beton	m ³	2.851	47,5	x	47,5
- Bewehrungsstahl	t	150	2,5	x	2,5
Lebensdauer 100 Jahre					
- Beton	m ³	2.851	28,5	x	28,5
- Bewehrungsstahl	t	150	1,5	x	1,5
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.					

CO₂- und THG-Emissionen

Basierend auf den Materialmengen und den durchgeführten Transporten konnten die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Bahnhof bzw. Werk berechnet werden. Demnach liegen bei einer unterstellten Lebensdauer von 60 Jahren die CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Personenbahnhöfe – abhängig von der Bahnhofskategorie – zwischen 10 und 166 Tonnen pro Jahr (siehe Tabelle 47). Der Bau der Instandhaltungswerke verursacht mit rund 150 Tonnen ähnlich hohe Werte wie Bahnhöfe der Kategorie 1. Der durchschnittliche Güterbahnhof, wie er in dieser Studie berücksichtigt wird, weist hingegen CO₂-Äquivalent-Emissionen von lediglich 19 Tonnen pro Jahr auf und liegt damit in der Größenordnung von Personenbahnhöfen der Größenklasse 4. Im

Falle einer Lebensdauer von 100 Jahren würden sich die entsprechenden CO₂-Äquivalent-Emissionen auf 60 % des Wertes reduzieren, der mit 60 Jahren Standzeit gerechnet wurde.

Bild 19 zeigt die CO₂-Äquivalent-Emissionen, die bei der Errichtung der Gebäude von Güter- und Personenbahnhöfen sowie der Werke verursacht werden, differenziert nach Verursachergruppen. Den Großteil der Emissionen zieht der Betoneinsatz nach sich; der Anteil des Betons an den gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen liegt bei über 80 %. Wie das Bild ebenfalls zeigt, verursacht die verwendete Menge an Bewehrungsstahl den zweitgrößten Anteil an den jeweiligen Gesamtemissionen. Er beträgt bei den verschiedenen Gebäuden 16 % bis 17 % der Gesamtemissionen. Die Transporte tragen hingegen nur mit 1 % zu den Gesamtemissionen an CO₂-Äquivalenten bei.

Tabelle 47: Jährliche CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau von Bahnhofs- und Werksgebäuden pro Gebäude für eine Lebensdauer von 60 und 100 Jahren

	Lebensdauer 60 Jahre		Lebensdauer 100 Jahre	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/Bahnhof/a bzw. t/Werk/a	t/Bahnhof/a bzw. t/Werk/a	t/Bahnhof/a bzw. t/Werk/a	t/Bahnhof/a bzw. t/Werk/a
Personenbahnhöfe				
Kategorie 1	160,3	165,5	96,2	99,3
Kategorie 2	66,4	68,5	39,8	41,1
Kategorie 3	34,0	35,0	20,4	21,0
Kategorie 4-6	10,1	10,5	6,1	6,3
Instandhaltungswerk	149,5	154,4	89,7	92,7
Güterbahnhof	18,6	19,2	11,2	11,5
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.				

Die Zurechnung der THG-Emissionen zu den einzelnen Streckenabschnitten ist zwar prinzipiell möglich, aber wenig sinnvoll. Weit aus sinnvoller ist es – auch wenn es von der empfohlenen Vorgehensweise der PCR für Railways [PCR 2009] abweicht –, die jährlichen Gesamtemissionen aller Bahnhöfe und Werke auf die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr direkt aufzuteilen und dann durch die Verkehrsleistung der Verkehrsarten zu teilen. Während die Werke und Güterbahnhöfe weitestgehend direkt den Verkehrsarten zuordenbar sind (siehe oben), ist dies bei den Personenbahnhöfen nicht möglich. Die Zuordnung der Emissionen der Bahnhöfe der Kategorie 1 bis 3 zwischen Personennahverkehr und Personenfernverkehr wird – wie bereits erwähnt – anhand der mit Hilfe von Zugzählungen ermittelten Nahverkehrsanteile durchgeführt (vgl. Tabelle 40). Alle anderen Bahnhöfe und die damit verbundenen baubedingten Emissionen entfallen vollständig auf den Personennahverkehr.

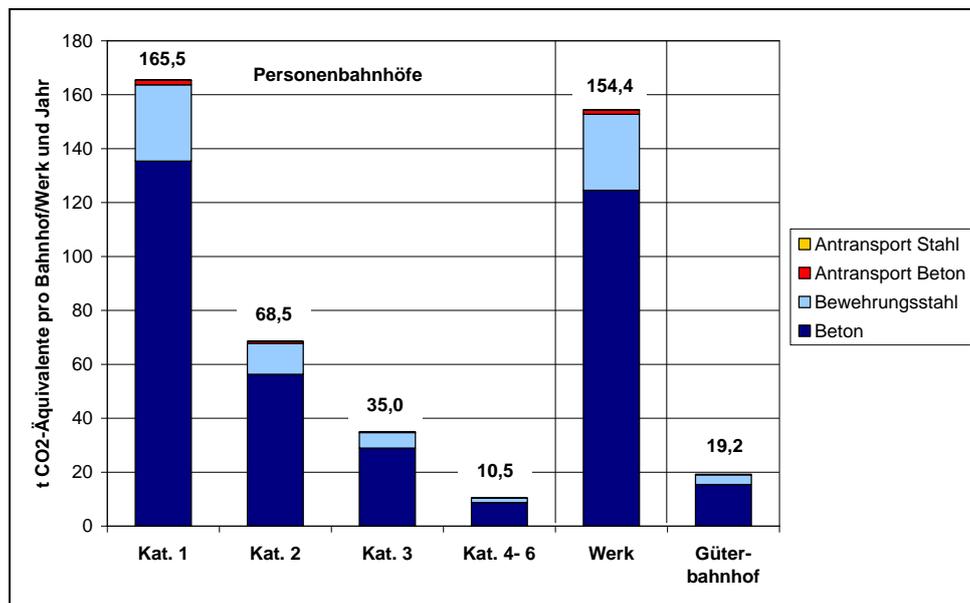


Bild 19: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gebäude durch den Bau von Personen- und Güterbahnhöfen sowie Werken differenziert nach Verursachergруппen (Lebensdauer: 60 Jahre) [Berechnungen des Öko-Instituts]

Tabelle 48 zeigt die pro Jahr anfallenden CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau aller Personen- und Güterbahnhöfe sowie Instandhaltungswerke der Deutschen Bahn AG. Unterstellt man eine Lebensdauer der Gebäude von 60 Jahren, entfallen auf den Bau aller Gebäude CO₂-Äquivalent-Emissionen von rund 88.500 t pro Jahr. Davon entfallen auf die Personenbahnhöfe mit rund 66.300 t/a rund 75 % der THG-Emissionen. Berücksichtigt man alle Gebäude (Bahnhöfe und Werke), ist der Personennahverkehr mit rund 71.400 t CO₂-Äquivalente für rund 80 % der Emissionen verantwortlich. Auf den Personenfernverkehr entfallen hingegen nur 7 %, auf den Güterverkehr nur ein Achtel der CO₂-Äquivalent-Emissionen.

Tabelle 49 zeigt die spezifischen THG-Emissionen pro Pkm und tkm durch den Bau der Gebäude (Bahnhöfe und Werke) differenziert nach Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr. Unterstellt man wiederum eine Lebensdauer von 60 Jahren für die Gebäude, ergeben sich für den Personennahverkehr CO₂-Emissionen von 1,73 g/Pkm bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen von 1,78 g/Pkm. Diese durch den Bau der Gebäude verursachten Emissionen liegen damit um mehr als den Faktor zehn höher als beim Schienenpersonenfernverkehr. Wird statt einer Lebensdauer von 60 Jahren eine Standzeit von 100 Jahren unterstellt, sinken beim Personennahverkehr die Gebäudebedingten Emissionen um 40 % auf rund 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm. Die zusätzlichen THG-Emissionen des Güterverkehrs fallen durch die Berücksichtigung der Gebäude eher gering aus. Es sind hierfür rund 0,1 g CO₂ bzw. CO₂-Äquivalente pro tkm zu berücksichtigen. Als Verkehrsleistung wurde für diese Berechnungen von 40,0 Mrd. Pkm im Nahverkehr (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg), 35,6 Mrd. Pkm im Fernverkehr und 114,6 Mrd. tkm im Güterverkehr ausgegangen (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 48: Jährliche CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau der Bahnhöfe und Werke differenziert nach den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr für eine Lebensdauer der Gebäude von 60 und 100 Jahren

	Lebensdauer 60 Jahre		Lebensdauer 100 Jahre	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/a	t/a	t/a	t/a
Personenbahnhöfe	64.273	66.308	38.564	39.785
Personennahverkehr	61.323	63.264	36.794	37.958
Personenfernverkehr	2.950	3.044	1.770	1.827
Güterverkehr	0	0	0	0
Instandhaltungswerke	15.998	16.524	9.599	9.914
Personennahverkehr	7.924	8.185	4.754	4.911
Personenfernverkehr	2.990	3.089	1.794	1.853
Güterverkehr	5.083	5.251	3.050	3.150
Güterbahnhöfe	5.501	5.684	3.301	3.410
Personennahverkehr	0	0	0	0
Personenfernverkehr	0	0	0	0
Güterverkehr	5.501	5.684	3.301	3.410
Insgesamt	85.772	88.516	51.463	53.109
Personennahverkehr	69.247	71.448	41.548	42.869
Personenfernverkehr	5.940	6.133	3.564	3.680
Güterverkehr	10.585	10.935	6.351	6.561

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.

Tabelle 49: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau der Bahnhöfe und Werke differenziert nach den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr für eine Lebensdauer der Gebäude von 60 und 100 Jahren

	Lebensdauer 60 Jahre		Lebensdauer 100 Jahre	
	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	g/Pkm bzw. g/tkm	g/Pkm bzw. g/tkm	g/Pkm bzw. g/tkm	g/Pkm bzw. g/tkm
Personennahverkehr	1,73	1,78	1,04	1,07
Personenfernverkehr	0,17	0,17	0,10	0,10
Güterverkehr	0,09	0,10	0,06	0,06

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.

Bild 20 zeigt nochmals graphisch die zusätzlich zu berücksichtigenden CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm, die bei einer Lebensdauer von 60 Jahren auf den Bau der Bahnhöfe und Werke zurückzuführen sind. In dieser Darstellung wird nochmals die

hohe Bedeutung der Personenbahnhöfe für die zusätzlich zu berücksichtigenden THG-Emissionen des Personennahverkehrs deutlich.

Bei ähnlicher Verkehrsleistung ist der Einfluss der Bahnhöfe auf die CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen im Personennahverkehr im Vergleich zum Personenfernverkehr aufgrund der großen Anzahl an kleineren Bahnhöfen und dem hohen Anteil an der Nutzung der Fernverkehrsbahnhöfe deutlich größer.

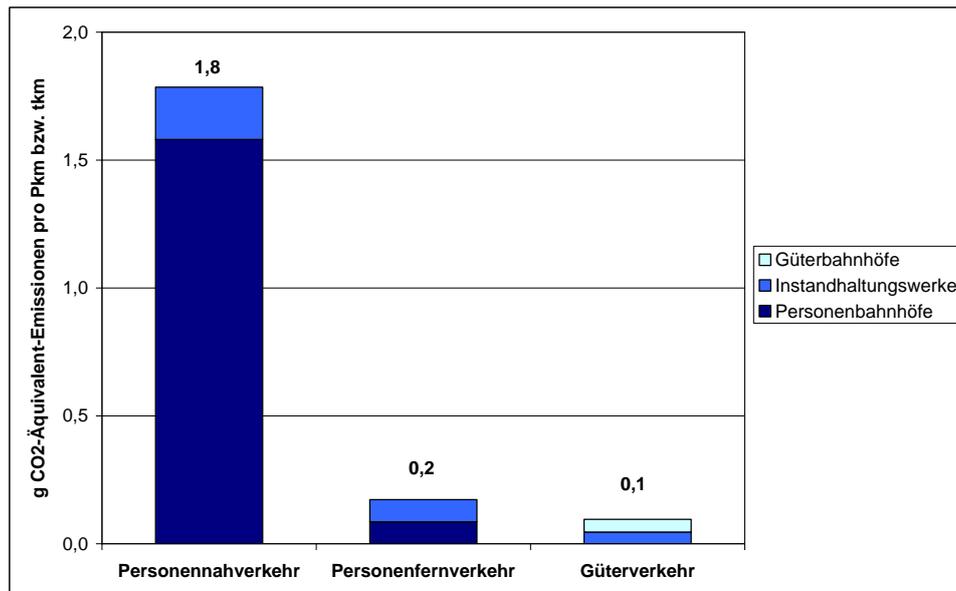


Bild 20: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau der Bahnhöfe und Werke differenziert nach den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr sowie Gebäudeart für eine Lebensdauer von 60 Jahren [Berechnungen des Öko-Instituts]

3.8 Ergebnisse für das Netz der DB AG

Mit Hilfe des in Kapitel 2.4 vorgestellten Datensatzes des DB Umweltzentrums war es möglich [DB 2009a], detailliert für das Netz der Deutschen Bahn AG die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau- und die Instandhaltung der Schieneninfrastruktur zu berechnen. Hierzu wurden für jeden der rund 7.500 Streckenabschnitte die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Emissionswerte pro ein- oder zweigleisigen Streckenkilometer mit den Werten des Datensatzes verbunden. Der Datensatz enthielt für das Jahr 2008 – wie in Kapitel 2.4 vorgestellt – unter anderem Angaben zu folgenden Kenngrößen [DB 2009a]:

- Streckenlängen jedes einzelnen Streckenabschnitts,
- Anzahl der Gleise,
- Elektrifizierung der Strecke,
- Schwellenart,
- Schienenart,
- Tunnellänge,
- Brückenlänge sowie Brückenart.

Ein Teil der Emissionsfaktoren, die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelt wurden (z. B. für die Energieversorgung, Bahnhöfe), liegt in Abhängigkeit von der Verkehrsleistung vor (also g CO₂ pro Pkm bzw. tkm bzw. g CO₂-Äquivalente pro Pkm bzw. tkm). Der Datensatz des DB enthält für die Züge der DB AG Angaben zu den auf den Streckenabschnitten zurückgelegten Zugkilometern, differenziert nach Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr. Mit Hilfe dieser Daten konnten dann für Züge der DB AG unter Berücksichtigung der Zuglängen die durchschnittlichen Verkehrsleistungen (Pkm bzw. tkm) auf den einzelnen Streckenabschnitten berechnet werden. Für nichtbundeseigene Eisenbahnen (NE-Bahnen) lagen im Datensatz ausschließlich Informationen zur Streckenbelegung nach Zuggattungen vor. Mit Hilfe von Daten des Statistischen Bundesamtes wurden für öffentliche NE-Bahnen durchschnittliche Auslastungen pro Zug-km berechnet (Personennahverkehr: 35 Pkm/Zug-km, Personenfernverkehr: 65 Pkm/Zug-km) und zur Berechnung der Verkehrsleistungen auf dem DB-Netz herangezogen [Sta-Bu 2009c]. Die Verkehrsleistung der NE-Bahnen betragen somit auf dem Netz der DB AG im Personennahverkehr rund 3,9 Mrd. Pkm, im Personenfernverkehr rund 0,1 Mrd. Pkm. Aufgrund der geringen Bedeutung von NE-Bahnen im Fernverkehr wurden diese im Rahmen des Gutachtens bei den weiteren Analysen gemeinsam mit der DB AG betrachtet. Im Güterverkehr lag bei der DB AG die durchschnittliche Auslastung bei rund 440 t pro Zug-km. Da keine spezifischen Daten des Statistischen Bundesamtes bzw. der Bundesnetzagentur für die NE-Bahnen vorlagen, wurden die für die DB AG ermittelten Daten auch für diese herangezogen. Somit beträgt die berechnete Verkehrsleistung von NE-Bahnen auf dem DB-Netz rund 23,4 Mrd. tkm.

Tabelle 50 fasst die Ergebnisse dieser Abschätzung nochmals zusammen und stellt diese Ergebnisse den Verkehrsleistungen der NE- und Werkbahnen auf Netzen anderer Infrastrukturunternehmen gegenüber. Die Werte zeigen, dass ein Großteil der Verkehrsleistungen der NE-Bahnen im Personennah- wie auch im Güterverkehr auf dem Netz der DB AG erbracht wird. Bei der Zuordnung der Verkehrsleistungen auf die einzelnen Streckenabschnitte des Datensatzes des DB Umweltzentrums wurde die prozentuale Abweichung vom Mittelwert, wie er für die Züge der DB AG ermittelt wurde, auch auf die NE-Bahnen übertragen.

Der vom DB Umweltzentrum zur Verfügung gestellte Datensatz [DB 2009a] enthält ausschließlich Informationen zu den Streckengleisen. Damit werden rund 51.500 Gleis-km erfasst. Keine Informationen sind im Datensatz für Servicegleise, wie zum Beispiel Gleise zur Zugbildung, Bahnhofsgleise und Überholgleise enthalten. Insgesamt entfallen auf Servicegleise rund 11.700 Gleis-km, wovon etwa 70 % dem Güterverkehr, 20 % dem Personennahverkehr und 10 % dem Personenfernverkehr zuzurechnen sind. Für diese zusätzlichen Gleise wurden mittlere CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km für den Unterbau, den Oberbau (inkl. Gleise) sowie die Signal- und Kommunikationstechnik der Streckengleise übernommen. Da es sich bei diesen Gleisen i. d. R. um nichtelektrifizierte Abschnitte handelt, blieben die Infrastrukturen für die Stromversorgungen unberücksichtigt. Ebenso wurden hierfür keine Brücken und Tunnel bei der Berechnung der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen berücksichtigt. Die Umlegung der Emissionen auf die einzelnen Streckenabschnitte erfolgte dabei über die auf den Abschnitten erbrachten Verkehrsleistungen.

Tabelle 50: Verkehrsleistungen der DB AG sowie der NE- und Werkbahnen im Jahr 2008, differenziert nach DB-Netz und Netz anderer Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU)

	Personen-nahverkehr	Personen-fernverkehr	Personen-verkehr insg.	Güter-verkehr
	Mrd. Pkm	Mrd. Pkm	Mrd. Pkm	Mrd. tkm
Verkehrsleistung insgesamt	40,7	35,6	81,8	118,8
<i>DB-Netz</i>	40,0	35,6	75,6	114,6
DB AG (ohne S-Bahnen Berlin/Hamburg)	36,1	35,5	71,6	91,2
NE-Bahnen	3,9	0,1	4,0	23,4
<i>Netz anderer EIUs¹⁾</i>	0,7	0,0	0,7	4,2
Öffentliche NE-Bahnen	0,7	0,0	0,7	1,1
Nicht-öffentliche NE-Bahnen/Werkbahnen	0,0	0,0	0,0	3,1

¹⁾ Eisenbahninfrastrukturunternehmen.
Quellen: [StaBu 2009a]; [DB AG 2009a]; [DB 2009d]; [VDV 2009]; Berechnungen des Öko-Instituts.

Somit lagen zur Ermittlung der CO₂-Emissionen und der CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Bau und Unterhalt des DB-Netzes alle notwendigen Informationen vor. Insgesamt entstehen durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur (Strecken- und Servicegleise) jährlich CO₂-Emissionen in Höhe von 1,47 Mill. t CO₂ bzw. 1,57 Mill. t CO₂-Äquivalente. Pro Gleiskilometer entstehen dabei 23,3 t CO₂/a bzw. 24,8 t CO₂-Äquivalente/a (siehe Tabelle 51). Den größten Anteil an den Gesamtemissionen hat mit rund 60 % der Oberbau einschließlich der dazugehörigen Gleise. Tunnel und Brücken tragen trotz der sehr hohen Treibhausgasemissionen pro Tunnel- bzw. Brücken-km (siehe Kapitel 3.3 und 3.4) im Durchschnitt des DB-Netzes nur zu 9 bzw. 6 % der Treibhausgasemissionen pro Gleis-km bei.

Tabelle 51: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km für das Netz der Deutschen Bahn AG im Jahr 2008

	CO ₂ -Emissionen		CO ₂ -Äquivalent-Emissionen	
	t/km/a	Anteil in %	t/km/a	Anteil in %
Unterbau	1,7	7 %	1,7	7 %
Gleise	7,1	30 %	7,7	31 %
Oberbau o. Gleise	6,6	28 %	7,0	28 %
Tunnel	2,1	9 %	2,2	9 %
Brücken	1,4	6 %	1,4	6 %
Signale / TK	1,4	6 %	1,5	6 %
Oberleitung / Unterwerke	0,8	3 %	0,8	3 %
Energieverteilung	1,0	4 %	1,1	4 %
Bahnhöfe/Werke	1,4	6 %	1,4	6 %
Insgesamt	23,3	100 %	24,8	100 %

Quellen: [DB 2009a]; Berechnungen des Öko-Instituts.

Der Datensatz zum DB-Netz ermöglicht es aber auch, nicht nur Durchschnittswerte für das Gesamtnetz zu ermitteln, sondern auch für spezifische Strecken oder Streckentypen. Bild 21 zeigt dies exemplarisch für Hochgeschwindigkeitsstrecken (HGS), Ausbaustrecken (ABS) sowie übrige Strecken sowie für die HGS Hannover – Würzburg bzw. HGS Köln – Frankfurt/M. Die Einteilung in die Streckenkategorie erfolgt dabei in Abhängigkeit von der maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Hochgeschwindigkeitsstrecken sind Strecken mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von mehr als 250 h/km, Ausbaustrecken mit Geschwindigkeiten über 160 km/h. Alle anderen Strecken wurden der Kategorie „Übrige Strecken“ zugeordnet.

Bild 21 zeigt, dass insbesondere für Hochgeschwindigkeitsstrecken die Infrastrukturkomponente Tunnel an den Gesamtemissionen stark an Bedeutung gewinnt. Dies hat zur Folge, dass im Durchschnitt aller Hochgeschwindigkeitsstrecken die CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur auf rund 35,9 t pro Gleis-km und Jahr ansteigen. Für die beiden Hochgeschwindigkeitsstrecken steigen die CO₂-Äquivalent-Werte auf der Relation Hannover - Würzburg sogar auf 73,9 t/Gleis-km/a an und auf der Relation Köln - Frankfurt/M auf 63,9 t/Gleis-km/a.

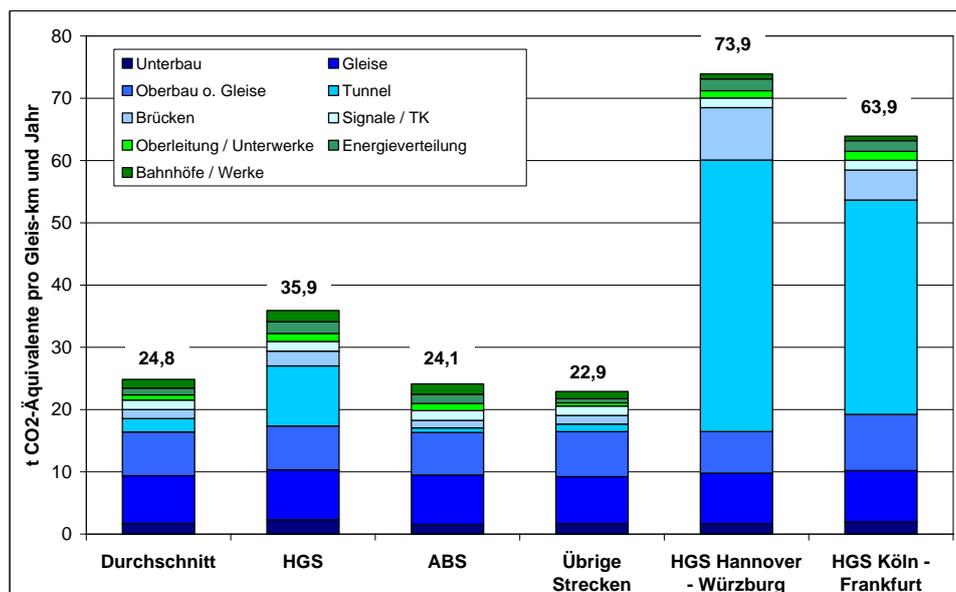


Bild 21: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km für verschiedene Streckentypen für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008 [DB 2009a; Berechnungen des Öko-Instituts]

Bild 22 zeigt für Gesamtdeutschland die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km für Bau und Unterhalt für jeden einzelnen Streckenabschnitt des Netzes der DB AG im Jahr 2008. Das Bild verdeutlicht, dass insbesondere die Strecken mit hohen Tunnelanteilen hohe CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km besitzen. Dies sind neben den bereits erwähnten NBS Hannover - Würzburg und Köln - Frankfurt/M. die ABS bzw. NBS Mannheim – Stuttgart sowie Ingolstadt – Nürnberg sowie Strecken in Mittelgebirgen und im Schwarzwald. Die NBS Berlin – Hannover weist hingegen aufgrund

des geringen Tunnel- und Brückenanteils nur durchschnittliche CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km auf.

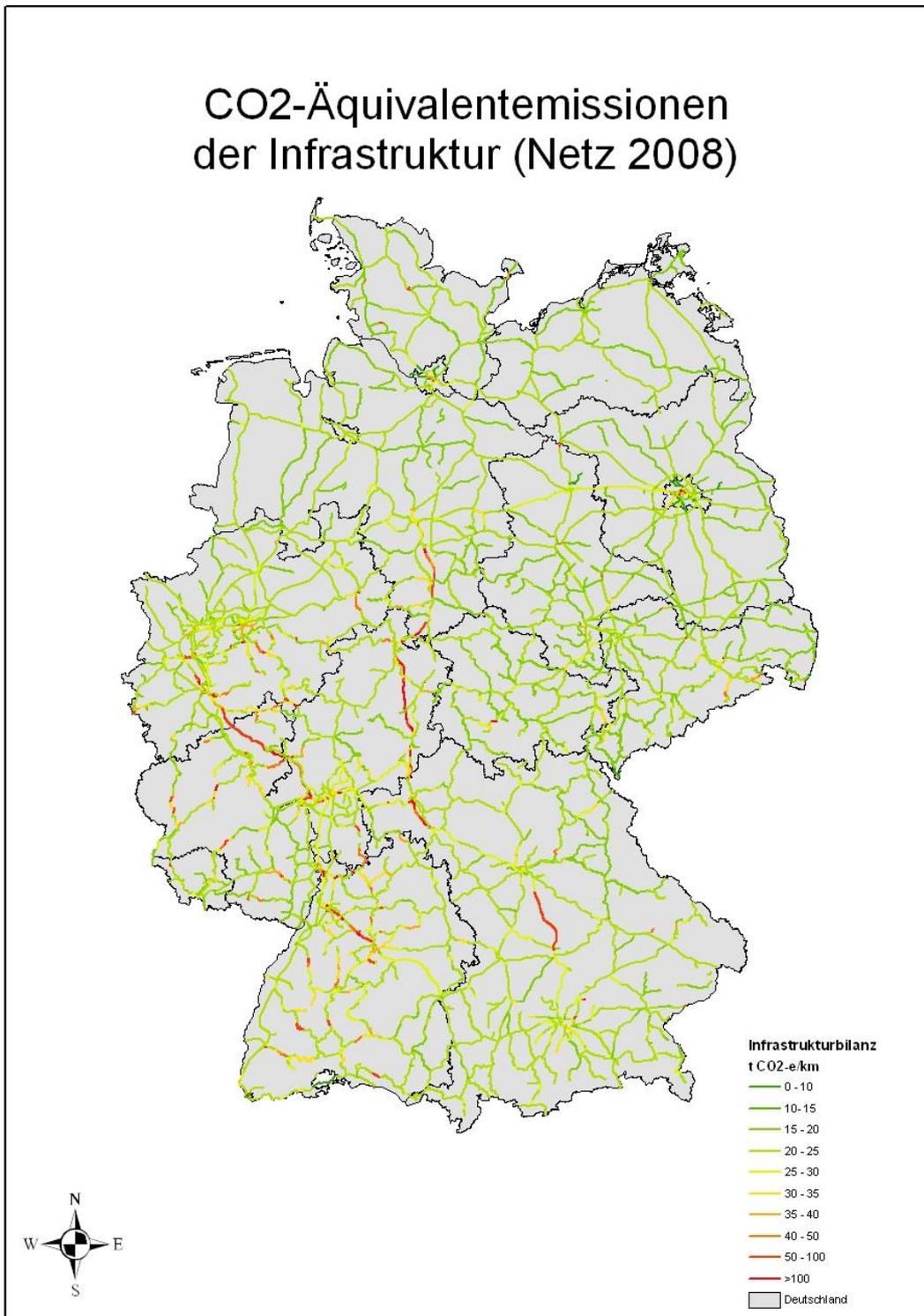


Bild 22: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km und Strecken-Abschnitt für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008 [Darstellung des DB Umweltzentrums]

Nachdem die Treibhausgasemissionen pro Streckenabschnitt ermittelt waren, erfolgte im nächsten Schritt die Aufteilung der Emissionen auf die drei Verkehrsarten Schienenpersonennah-, Schienenpersonenfern- und Schienengüterverkehr. Hierzu wurden die ermittelten Treibhausgasemissionen pro Streckenabschnitt über die Anteile der drei Verkehrsarten an den Bruttotonnenkilometern aufgeteilt. Für die NE-Bahnen lagen keine Angaben zu den Bruttotonnenkilometern vor. Durch den Vergleich mit den Zügen der DB AG und der Verkehrsleistung auf den Streckenabschnitten wurde ein durchschnittliches Bruttogewicht für Nahverkehrszüge von NE-Bahnen von rund 100 t und für Güterzüge von 1.000 t abgeleitet. Durch Verknüpfung dieser Angaben mit den Zug-km konnten für die NE-Bahnen ebenfalls Bruttotonnenkilometer pro Streckenabschnitt ermittelt werden. Somit war eine Allokation der Treibhausgasemissionen zwischen den drei Verkehrsarten, differenziert nach DB- und NE-Zügen, möglich. Weiterhin musste berücksichtigt werden, dass das Streckennetz der DB AG auch von S-Bahnen befahren wird, die in dieser Studie nicht explizit untersucht werden. Für die S-Bahnen lagen ebenfalls Angaben zu den Bruttotonnenkilometern vor, so dass auch Emissionen auf für die S-Bahn relevanten Strecken den S-Bahnen zugeordnet werden konnten. Grundsätzlich unberücksichtigt bleiben die S-Bahnen Berlin und Hamburg, da diese eigene Netze betreiben.

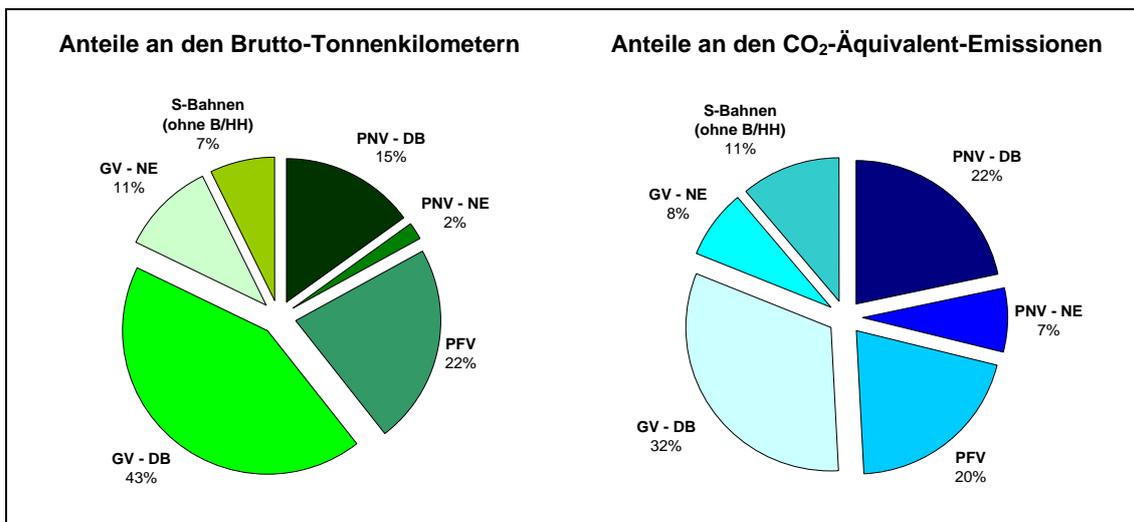


Bild 23: Anteile der Verkehrsarten und Schienennutzer (DB AG bzw. NE-Bahnen) an den Bruttotonnenkilometern bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen für Bau und Unterhalt des DB-Netzes im Jahr 2008 [DB 2009a; Berechnungen des Öko-Instituts]

Bild 23 zeigt einerseits im linken Teil die Anteile des Personennahverkehrs (PNV), des Personenfernverkehrs (PFV), des Güterverkehrs (GV) sowie der S-Bahnen (ohne S-Bahnen Berlin und Hamburg) an den Bruttotonnenkilometern im Netz der DB AG. Andererseits zeigt das Bild im rechten Teil die Anteile der Verkehrsarten an den CO₂-Äquivalent-Emissionen des DB Schienennetzes. Diese Gegenüberstellung zeigt, dass bei den CO₂-Äquivalent-Emissionen der Personennahverkehr sowie die S-Bahnen stark an Bedeutung gewinnen, während insbesondere der Güterverkehr an Bedeutung ver-

liert. Dies reflektiert die Tatsache, dass gerade viele Nebenstrecken fast ausschließlich von Nahverkehrszügen befahren werden. Damit werden diese Emissionen vollständig dem Nahverkehr zugeordnet. Die Allokation der Treibhausgasemissionen pro Streckenabschnitt führt also im Vergleich zu einer Durchschnittsbetrachtung zu höheren Emissionen im Personennahverkehr. Diese Tatsache ist gerade beim Vergleich der Ergebnisse dieser Studie mit Ergebnissen anderer Studien zu beachten. Weiterhin zeigt Bild 23, das vor allem die NE-Bahnen bei den Emissionen stark an Bedeutung gewinnen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Strecken ausschließlich von den NE-Bahnen befahren werden. Auch hier werden die Treibhausgasemissionen vollständig den NE-Bahnen zugeordnet.

Tabelle 52: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für verschiedene Verkehrsarten und Nutzer (DB AG und NE-Bahnen) für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008

	PNV - DB AG	PNV - NE-Bahnen	PFV	GV – DB AG	GV - NE-Bahnen
	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>g/tkm</i>	<i>g/tkm</i>
CO₂-Emissionen insges.	12,1	26,5	8,1	5,1	4,9
Unterbau	0,8	2,1	0,5	0,4	0,4
Gleise	3,5	8,5	2,1	1,7	1,7
Oberbau o. Gleise	3,3	8,7	1,9	1,6	1,6
Tunnel	0,5	1,0	1,7	0,3	0,2
Brücken	0,7	1,4	0,6	0,3	0,3
Signale / TK	0,7	1,9	0,4	0,3	0,3
Oberleitung / Unterwerke	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1
Energieverteilung	0,5	0,7	0,4	0,2	0,2
Bahnhöfe/Werke	1,7	1,7	0,2	0,1	0,1
CO₂-Äquivalente insges.	12,9	28,3	8,7	5,5	5,3
Unterbau	0,8	2,2	0,5	0,4	0,4
Gleise	3,7	9,3	2,3	1,9	1,9
Oberbau o. Gleise	3,5	9,3	2,1	1,6	1,7
Tunnel	0,5	1,1	1,8	0,3	0,2
Brücken	0,7	1,5	0,6	0,3	0,3
Signale / TK	0,8	2,0	0,5	0,4	0,4
Oberleitung / Unterwerke	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2
Energieverteilung	0,6	0,8	0,4	0,3	0,3
Bahnhöfe/Werke	1,8	1,8	0,2	0,1	0,1
Quellen: [DB 2009a]; Berechnungen des Öko-Instituts.					

Durch die Verknüpfung der für die Verkehrsarten ermittelten CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen mit den dazugehörigen Verkehrsleistungen können spezifische Treibhausgasemissionen pro Pkm bzw. tkm für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur ermittelt werden. Das Ergebnis dieses Schrittes zeigt Tabelle 52. Die höchsten CO₂-

und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm haben mit 26,5 g/Pkm bzw. 28,3 g/Pkm die NE-Bahnen. Hier wirkt sich – wie bereits erwähnt – aus, dass einerseits die benutzten Schienenstrecken ausschließlich von NE-Bahnen genutzt werden. Zum anderen kommt zum Tragen, dass die Verkehrsleistung auf diesen Strecken im Vergleich zu den Nahverkehrsstrecken der DB AG unterdurchschnittlich ist [StBu 2009a und 2009b]. Beim Güterverkehr sind die Unterschiede zwischen DB AG und NE-Bahnen marginal und fallen sogar leicht zu Gunsten der NE-Bahnen aus. Im Gegensatz zum Personennahverkehr nutzt der Güterverkehr der NE-Bahnen die gleichen Strecken wie die DB AG.

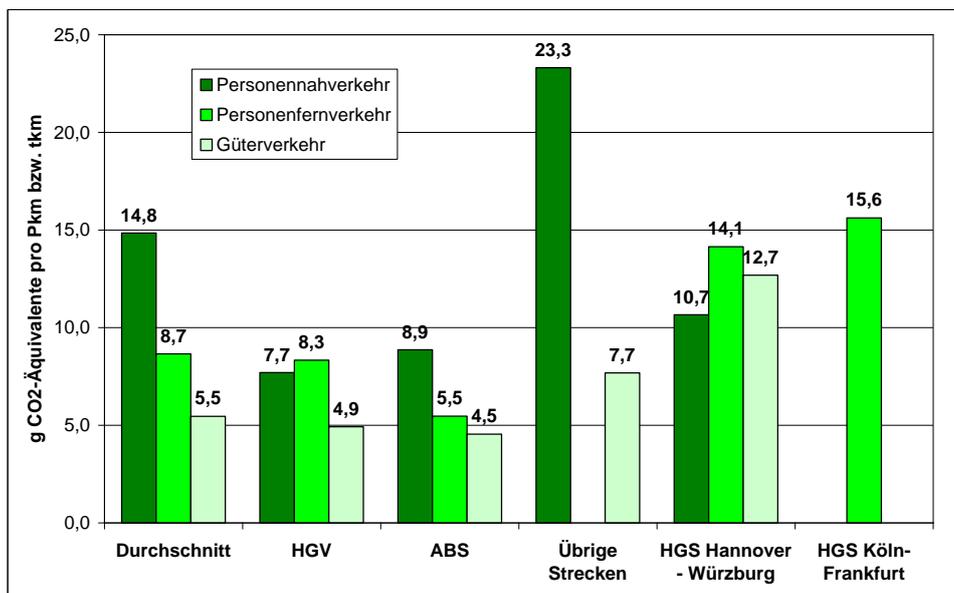


Bild 24: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für verschiedene Streckentypen differenziert nach Verkehrsart (Mittelwerte für DB AG und NE-Bahnen) für Bau und Unterhalt des Netzes der DB AG im Jahr 2008 [DB 2009a; Berechnungen des Öko-Instituts]

Wie bereits bei den streckenbezogenen Treibhausgasemissionen können auch die verkehrsleistungsbezogenen Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur für Teilnetze oder Einzelstrecken ausgewertet werden. Bild 24 zeigt dies für die schon in Bild 21 dargestellten Strecken, wobei für den Personennah- und Güterverkehr bereits über die Verkehrsleistung gemittelte Werte für die DB AG und NE-Bahnen dargestellt sind. Diese Auswertung zeigt zweierlei: Zum einen liegen gerade auf dem Nebennetz die Emissionen deutlich höher als auf den HGS und ABS. Mit 23,3 g CO₂-Äquivalenten pro Pkm liegen beim Personennahverkehr die Werte auf den übrigen Strecken fast 60 % höher als im Netzdurchschnitt. Hier kommen die geringeren Verkehrsleistungen pro Gleis-km zum Tragen. Zum anderen zeigt Bild 24 aber auch, dass sich hohe streckenbezogene Treibhausgasemissionen nicht in gleichem Maße bei den verkehrsleistungsbezogenen Werten widerspiegeln. So lagen für die beiden betrachteten Hochgeschwindigkeitsstrecken die CO₂-Äquivalent-Emissionen per Gleis-km um den Faktor 2,5 bis 3,0 höher als der Netzdurchschnitt. Bei den verkehrsleistungsbezo-

genen CO₂-Äquivalent-Emissionen im Fernverkehr liegen mit 14,1 bzw. 15,6 g/Pkm die Emissionen aber nur noch 63 bzw. 80 % über dem Netzdurchschnitt (8,7 g/Pkm). Hier wirkt sich die hohe Verkehrsleistung auf den Hochgeschwindigkeitsstrecken positiv auf die spezifischen Emissionen pro Pkm aus.

3.9 Ergebnis für das Gesamtschienennetz in Deutschland

Die auf Basis des Datensatzes des DB Umweltzentrums durchgeführte Detailanalyse umfasst rund 87 % des deutschen Gleisnetzes. Wie Tabelle 50 zudem zeigt, werden auf dem Netz der DB AG 98 % der Verkehrsleistung des Personennahverkehrs, 100 % der Verkehrsleistung des Personenfernverkehrs und 96 % des Güterverkehrs durchgeführt. In diesem Kapitel sollen nun für die fehlenden 9.800 km Gleise die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur berechnet werden.

Hierzu wurde folgende Annahmen getroffen: Der Unterbau des übrigen Netzes entspricht dem der Nebenstrecken des DB Netzes. Für den Oberbau wurde eine Schotterbauweise mit Holzschwellen unterstellt. Als Gleise wurden S-54-Schienen angenommen. Weiterhin wurde die für Nebenstrecken typische Signal- und Kommunikationstechnik unterstellt. Tunnel und Brücken wurden hingegen nicht berücksichtigt. Weiterhin wurde eine elektrifizierte Strecke von 400 km eingerechnet [VDV 2009]. Basierend auf diesen Annahmen konnten mit Hilfe der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Emissionsfaktoren die Treibhausgasemissionen durch den Bau und Unterhalt der fehlenden Eisenbahngleise berechnet werden. Insgesamt ergaben sich somit für den Bau und Unterhalt der zusätzlichen Schieneninfrastruktur jährliche Emissionen von 180.000 t CO₂ bzw. 194.000 t CO₂-Äquivalenten.

Tabelle 53: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleis-km und Jahr für den Bau und Unterhalt des öffentlichen Netzes von Nicht-DB-Infrastrukturunternehmen sowie des nichtöffentlichen Netzes im Jahr 2008, differenziert nach Verkehrsarten

	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
	t/Gleis-km/a	t/Gleis-km/a
PNV - NE-Bahnen: Netz anderer EIU	17,8	19,2
GV - NE-Bahnen: Netz anderer EIU	17,8	19,2
GV – Werkbahnen: nichtöffentliches Netz	21,1	22,7
Quellen: [Bundesnetzagentur 2010]; [VDV 2009]; Berechnungen des Öko-Instituts.		

Bezogen auf Gleis-km ergeben sich die in Tabelle 53 dargestellten spezifischen CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Emissionen. Sie liegen niedriger als der Durchschnitt des DB-Netzes (25 t/Gleis-km/a). Die Aufteilung auf den Personennah- und Güterverkehr erfolgte dabei folgendermaßen: Nach Angaben der Bundesnetzagentur war das öffentliche Netz anderer Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) im Jahr 2007 rund 7.800 Gleis-km

lang, wobei rund 3.100 km auf Serviceeinrichtungen entfallen (z. B. Gleisbildungsanlagen, Gleise in Häfen) [Bundesnetzagentur 2010]. Die Gleislänge für Serviceeinrichtungen wurde zu 100 % dem Güterverkehr zugeschlagen. Die Streckengleise mit einer Länge von 4.700 km wurden zu rund 70 % dem Personennahverkehr und zu rund 30 % dem Güterverkehr zugeordnet. Diese Aufteilung erfolgte auf Basis von Bruttotonnenkilometern, die grob auf Basis von Zug-km abgeleitet wurden [Bundesnetzagentur 2010]. Das nichtöffentliche Netz (überwiegend Werkbahnen) mit einer Gleislänge von 3.100 km im Jahr 2008 wurde vollständig dem Güterverkehr zugeordnet [VDV 2009].

Werden die für das Netz der Nicht-DB-Eisenbahninfrastrukturunternehmen ermittelten Treibhausgasemissionen für den Bau und Unterhalt des Netzes auf die Verkehrsleistung bezogen, ergeben sich die in Tabelle 54 dargestellten Werte. Mit rund 88 g CO₂-Äquivalenten pro Pkm liegen die Werte für den Personennahverkehr auf dem Netz der anderen Eisenbahninfrastrukturunternehmen für NE-Bahnen rund dreimal höher als auf dem DB-Netz. Gemittelt über die gesamte Verkehrsleistung der NE-Bahnen ergibt sich dann ein durchschnittlicher CO₂-Äquivalent-Wert von 37 g/Pkm. Beim Güterverkehr der NE-Bahnen erreichen die CO₂-Äquivalent-Emissionen auf dem Netz der übrigen EIU gar Werte, die diejenigen des DB-Netzes um nahezu den Faktor 16 übersteigen (82 g/tkm im Vergleich zu 5 g/Pkm). Die CO₂-Äquivalent-Emissionen auf dem nicht-öffentlichen Schienennetz liegen mit rund 14 g/tkm lediglich um den Faktor 3 höher als die des DB-Netzes. Über die Verkehrsleistungen in den jeweiligen Teilnetzen gemittelt ergeben sich somit für den Güterverkehr der NE-Bahnen und Werkbahnen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur Werte in Höhe von rund 9 g CO₂-Äquivalenten pro tkm.

Tabelle 54: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur für NE- und Werkbahnen in Deutschland im Jahr 2008

	Einheit	CO ₂	CO ₂ -Äquivalente
PNV - NE-Bahnen: insgesamt	g/Pkm	34,9	37,4
PNV - NE-Bahnen: DB-Netz	g/Pkm	26,5	28,3
PNV - NE-Bahnen: Netz anderer EIU	g/Pkm	81,7	88,2
GV - NE/Werkbahnen insgesamt	g/tkm	8,6	9,3
GV - NE-Bahnen: DB-Netz	g/tkm	4,9	5,3
GV - NE-Bahnen: Netz anderer EIU	g/tkm	76,0	82,0
GV - Werkbahnen: nichtöffentliches Netz	g/tkm	13,0	14,0
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.			

Bild 25 zeigt schließlich die für den Bau und Unterhalt des gesamten deutschen Schienennetzes anfallenden CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr. Die spezifischen CO₂-Emissionswerte für die NE-Bahnen sind insbesondere beim Schienenpersonennahverkehr deutlich schlechter als bei der DB AG. Dies gilt auch für den Güterverkehr, wenn

auch nicht ganz so ausgeprägt. Im Durchschnitt entstehen durch den Bau und Unterhalt des deutschen Schienennetzes, bezogen auf das Jahr 2008,

- 15 g CO₂-Äquivalente pro Pkm beim Schienenpersonennahverkehr,
- 9 g CO₂-Äquivalente pro Pkm beim Schienenpersonenfernverkehr und
- 6 g CO₂-Äquivalente pro tkm beim Schienengüterverkehr.

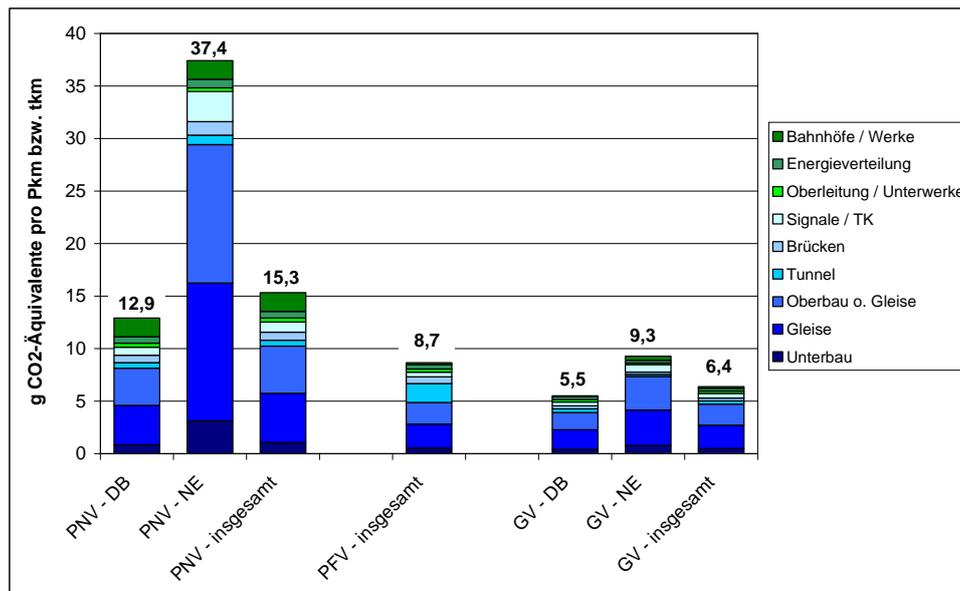


Bild 25: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur in Deutschland im Jahr 2008 [Berechnungen des Öko-Instituts].

4 Daten und Ergebnisse für den Betrieb der Schieneninfrastruktur

4.1 Daten zum stationären Bereich

Die CO₂- und THG-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur werden in dieser Studie aus dem Energieverbrauch, der von der DB AG nicht für den Fahrbetrieb benötigt wird, 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 wird. Für das Netz der anderen Eisenbahninfrastrukturunternehmen sowie das Netz der Werkbahnen lagen hingegen keine Energieverbrauchsdaten für den Betrieb des Netzes vor. Es wird in dieser Studie vereinfachend die für das DB-Netz ermittelten Werte 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.

In dieser Studie wird der Energieverbrauch der Instandhaltungswerke dem Betrieb der Schieneninfrastruktur zugeordnet, obwohl er – streng genommen – auch bei der Wartung der Schienenfahrzeuge verbucht werden könnte (siehe Kapitel 5).

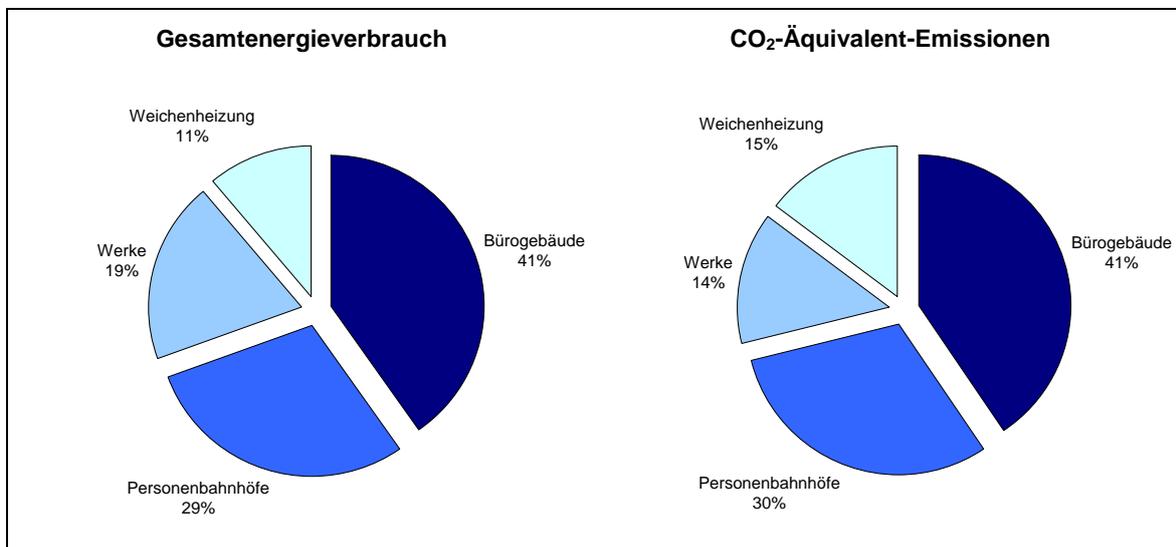


Bild 26: Gesamtenergieverbrauch und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den stationären Bereich der DB AG im Jahr 2008 nach Verursachergruppen [DB 2009b; Berechnungen des Öko-Instituts]

Insgesamt benötigt 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 rund 60 % (1.500 GWh) auf den Stromverbrauch und 40 % auf den Wärmebe-

darf. Rund 37 % des Wärmebedarfs wird über Erdgas, 34 % mit Fernwärme, 28 % mit Heizöl und 1 % mit Hilfe sonstiger Energieträgern gedeckt [DB 2009b].

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 26).

Mit Hilfe dieser Daten und der in Kapitel 2.4 aufgeführten Emissionsfaktoren können somit die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der DB-Schiene-Infrastruktur, differenziert nach Verursachergruppen, berechnet werden. Danach führt der stationäre Bereich der DB AG im Jahr 2008 zu CO₂-Emissionen in Höhe von 1,14 Mill. Tonnen und zu CO₂-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 1,20 Mill. Tonnen. Bild 26 zeigt am Beispiel der CO₂-Äquivalent-Emissionen, dass sich die Aufteilung auf die Verursachergruppen mehr oder weniger mit der zum Gesamtenergieverbrauch deckt. Lediglich die strombeheizten Weichen tragen etwas stärker zu den Gesamtemissionen bei, die Werke etwas weniger.

Eine Aufteilung des Energieverbrauchs und der Emissionen des stationären Bereichs auf Verkehrsarten liegt nicht vor. Aus diesem Grund hat das DB Umweltzentrum für jede Verursachergruppe die Anteile des Nah-, Fern- und Güterverkehrs an den CO₂- und CO₂-Äquivalenten-Emissionen geschätzt. Im Nahverkehr sind die Energieverbräuche der S-Bahnen (einschließlich Hamburg und Berlin) enthalten. Basis für die Aufteilung der Emissionen war zum einen die Bedeutung der Verursachergruppe für die Verkehrsart (z. B. spielen Personenbahnhöfe für den Güterverkehr keine Rolle). Zum anderen erfolgt die Allokation über die Brutto-Tonnenkilometer. Die für die einzelnen Verursachergruppen verwendeten prozentualen Anteile sind Tabelle 55 zu entnehmen [DB 2009b].

Tabelle 55: 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	Güter-verkehr	Insgesamt
	<i>In %</i>	<i>in %</i>	<i>in %</i>	<i>in %</i>
Bürogebäude	35 %	35 %	30 %	100 %
Personenbahnhöfe	60 %	40 %	0 %	100 %
Werke	40 %	30 %	30 %	100 %
Weichenheizung	40 %	20 %	40 %	100 %
Quelle: [DB 2009b].				

Die THG-Emissionen der Personenbahnhöfe werden in dieser Studie vollständig der Schiene zugerechnet, obwohl sich heute insbesondere die großen Bahnhöfe in Deutschland immer stärker zu Einkaufszentren verwandeln, bei denen auch Nicht-Bahnreisende einkaufen gehen. Köser et al. [2002] schätzen für die an der Hochgeschwindigkeitsstrecke Hannover-Würzburg gelegenen Bahnhöfe ein Anteil von Nicht-

Reisenden von 20 %. Da es keine belastbaren Daten für ganz Deutschland gibt, werden in dieser Studie die THG-Emissionen der Bahnhöfe vollständig den Bahnreisenden zugeschlagen. Damit werden die Emissionen aus diesem Bereich voraussichtlich überschätzt.

4.2 Ergebnisse

Für den Betrieb der Schieneninfrastruktur der DB AG im Jahr 2008 ergeben 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, was darauf zurückzuführen ist, dass kein Energieverbrauch für Bahnhöfe anfällt. Die entsprechenden CO₂-Äquivalent-Emissionen liegen für den Personennahverkehr bei 0,53 Mill. Tonnen, beim Personenfernverkehr bei 0,40 Mill. Tonnen und beim Güterverkehr bei 0,27 Mill. Tonnen.

Werden die Emissionen auf die Verkehrsleistung in den einzelnen Verkehrsarten bezogen, ergeben sich die in Tabelle 56 aufgeführten Werte. 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. Die Verkehrsleistungen enthalten die Fahrten der DB AG ebenso die Fahrten von NE-Bahnen auf dem Netz der DB AG im Jahr 2008.

Tabelle 56: CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur der DB- Netz 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
Quellen: [DB 2009b]; Berechnungen des Öko-Instituts.			

Die höchsten spezifischen Emissionen weist der Personennahverkehr mit 12,9 g CO₂ bzw. 13,5 g CO₂-Äquivalenten pro Personenkilometer auf. Der Fernverkehr hat mit 11,1 g CO₂ und 11,7 g CO₂-Äquivalenten pro Personenkilometer leicht bessere Werte. Die spezifischen CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen des Güterverkehrs sind mit 2,4 und 2,5 g/tkm verhältnismäßig gering. Wie in der Einleitung bereits ausgeführt, liegen für die Netze der übrigen Eisenbahninfrastrukturunternehmen sowie die Netze der Werkbahnen keine Detaildaten zum Energieverbrauch vor, weshalb vereinfacht die für das DB-Netz ermittelten THG-Emissionen pro Pkm bzw. tkm auch für die übrigen Netze übernommen wurden. Da die Verkehrsleistungen auf diesen Netzen geringer sind als beim DB-Netz, dürften dies zu höheren THG-Emissionen pro Pkm bzw. tkm führen. Gleichzeitig dürften auch für diese Netze die Energieverbräuche pro Gleis-km und da-

mit die THG-Emissionen pro Gleis-km durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur geringer ausfallen. Beide Effekte verrechnet werden die Betriebs-bedingten Emissionen der übrigen Netze durch diese Vorgehensweise voraussichtlich leicht unterschätzt.

Bild 27 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 als die 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.

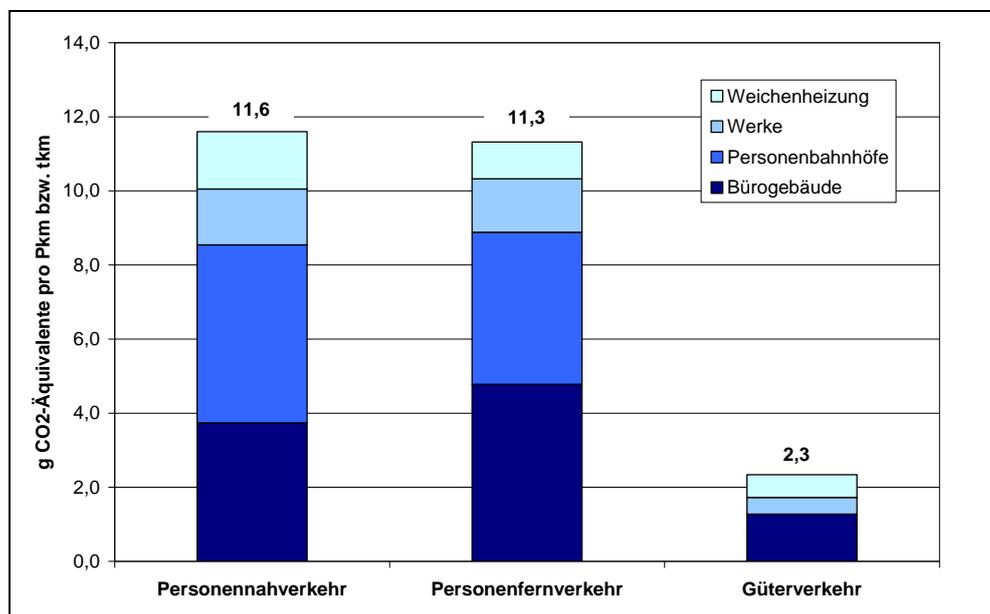


Bild 27: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur, differenziert nach Verkehrsart und Verursachergruppen für die DB-Netz im Jahr 2008 [DB 2009b; Berechnungen des Öko-Instituts]

5 Daten und Ergebnisse für die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge und Waggons

5.1 Überblick

Im folgenden Kapitel werden die CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen ermittelt, die bei der Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge und Waggons entstehen. Dabei werden gesamte Züge bilanziert, d. h. Loks einschließlich der Waggons. Konkret werden 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 57 aufgeführt. Die Daten – insbesondere die Angaben zu Kapazität und Auslastung der Züge – sind identisch mit denen, die in TREMOD hinterlegt sind. 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]. Die Ökobilanzdatenbank ecoinvent geht beim Güterverkehr lediglich von einer Jahresfahrleistung von 25.000 km pro Jahr aus [ecoinvent 2009]. In dieser Studie wird eine mittlere Jahresfahrleistung der Güterwaggons von 26.000 km/a zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der Jahresfahrleistung der Lok von rund 200.000 km/a ergibt sich ein mittlerer Wert für den gesamten Güterzug von rund 40.000 km/a. Dieser Wert ist damit höher als der der Ökobilanzdatenbank, was im Vergleich zu ecoinvent zu deutlich geringeren spezifischen THG-Emissionen pro Tonnenkilometer führt.

Tabelle 57: Leistungsmerkmale verschiedener Zugkonfigurationen

Fahrzeug-kategorie	Leergewicht	Kapazität	Auslastungs-grad	Jahres-fahr-leistung	Lebensdauer
	<i>t</i>	<i>Plätze bzw. t</i>	<i>In %</i>	<i>km/a</i>	<i>a</i>
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

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

Berechnet werden 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 Waggonen entstehen, sind ebenso wie beim Bereich Schieneninfrastruktur (z. B. Bau der Signale) in dieser orientierenden Stoffstrombilanz nicht berücksichtigt. Weiterhin nicht betrachtet werden Transporte von den Produktionsstätten der Materialien bis zu den Schienenherstellern. Die Emissionen und Energieverbräuche der Werke, in denen die Wartungen der Schienenfahrzeuge durchgeführt werden, sind bereits beim Betrieb der Infrastruktur (siehe Kapitel 4) erfasst.

In den folgenden Unterkapiteln werden daher die für die Bilanz unterstellten jährlichen Materialmengen für Errichtungsaufwand und Wartung von Triebfahrzeugen sowie lokbespannten Nahverkehrs-, Fernverkehrs- und Güterzügen aufgeführt. Die durch die Herstellung und Wartung über die gesamte Einsatzdauer der Schienenfahrzeuge aufsummierten Materialmengen werden dabei mit Hilfe der Lebensdauer auf die jährlichen Mengen umgerechnet. Als Lebensdauer wird für alle Zugkonfigurationen 40 Jahre angesetzt (siehe Tabelle 57).

5.2 Triebfahrzeuge

Als Triebfahrzeuge werden zwei Typen des Intercity-Expresses (ICE 1 und ICE 2) untersucht. Triebfahrzeuge, die im Nahverkehr eingesetzt werden, konnten aufgrund der fehlenden Daten nicht bilanziert werden.

Konkret wurde ein ICE 1 mit zwei Triebköpfen und 12 Mittelwagen und einem Gesamtgewicht von 782 Tonnen analysiert. Mit 321 Tonnen entfällt der größte Teil der Gesamtmasse des Zuges auf das Material Stahl. An zweiter Stelle liegen mit 168 Tonnen die Kunststoffe. Mit 132 und 86 Tonnen werden auch erheblich Mengen an Aluminium und Kupfer verbaut [Köser et al. 2002]. Der sich aus diesen Mengen ergebende jährliche Errichtungsaufwand pro Zugkilometer ist in Tabelle 58 wiedergegeben (Jahresfahrleistung des ICE: 500.000 km/a). Dort sind auch die übrigen eingesetzten Materialien aufgeführt.

Der untersuchte ICE 2 besteht aus zwei Steuerköpfen und ebenfalls aus 12 Mittelwagen (zwei Halbzüge). Den höchsten Anteil am Gesamtgewicht von 744 Tonnen hat Stahl mit 323 Tonnen. Die Kunststoffmenge (einschließlich Gummi) beläuft sich auf 162 Tonnen. Auch Aluminium und Kupfer werden wiederum in starkem Maße verbaut (90 und 34 Tonnen) [Köser et al. 2002]. Der jährliche Errichtungsaufwand pro Zugkilometer ist ebenfalls wieder in Tabelle 58 aufgeführt.

Für die Wartung eines ICE – unabhängig vom Typ – wurde unterstellt, dass pro Revision bzw. Instandhaltung 45 Tonnen Stahl, 5 Tonnen Farben und 250 kg Nichteisenmetalle eingesetzt werden. Eine umfassende Revision der ICE-Züge ist alle vier Jahre vorgesehen [Köser et al. 2002]. Die über die Lebensdauer und Wartungsintervalle ermittelten jährlichen Materialmengen pro Zugkilometer für die Instandhaltung der ICE-Züge finden sich ebenfalls in Tabelle 58.

Tabelle 58: Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von Triebfahrzeugen der Typen ICE 1 und ICE 2 (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 500.000 km/a)

Bereich	Errichtungs- aufwand	Instand- haltung	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]; Berechnungen des Öko-Instituts.			

5.3 Lokbespannte Personenzüge

Die Materialmengen für lokbespannte Nah- und Fernverkehrszügen wurden einer Studie des IFEU-Institutes entnommen [Knörr/Kutzner 2009]. Bei den Nahverkehrszügen handelt es sich um eine Zugkonfiguration mit einem Gesamtgewicht von 200 Tonnen. Dies entspricht einem Zug mit einer Lokomotive mit rund 80 Tonnen und 4 Nahverkehrswaggons mit je 30 Tonnen. Beim Nahverkehrszug entfallen mit rund 147 Tonnen fast drei Viertel der Gesamtmasse des Zuges auf das Material Stahl. Mit 18 bzw. 13 Tonnen folgen an Stelle zwei und drei die Kunststoffe und das Aluminium. Die sich daraus ergebenden jährlichen Errichtungsaufwände pro Zugkilometer, ergänzt um weitere eingesetzte Materialien, finden sich in Tabelle 59. Als Jahresfahrleistung eines Nahverkehrszuges wurden 170.000 km zugrunde gelegt.

Beim Fernverkehrszug wurde von einer Lok mit rund 85 Tonnen und 12 Waggon mit einem Gewicht von je 43 Tonnen ausgegangen. Mit 291 Tonnen entfällt hier nur etwa die Hälfte auf das Material Stahl. Mit 151 Tonnen entfällt rund ein Viertel der Masse eines Fernverkehrszuges auf Kunststoffe. Die jährlichen Errichtungsaufwände pro Zugkilometer für alle eingesetzten Materialien finden sich wiederum in Tabelle 59. Für Fernverkehrszüge wurde von einer Jahresfahrleistung von 250.000 km ausgegangen.

Tabelle 59: Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Nah- und Fernverkehrszügen (Lebensdauer: 40 Jahre)

Bereich	Errichtungs- aufwand	Instand- haltung	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]; Berechnungen des Öko-Instituts.			

Materialaufwände für die Wartung der lokbespannten Personenzüge liegen aus der IFEU-Studie nicht vor. Über eine Umwelterklärung von Bombardier für eine Lok der BR 185 liegen aber Angaben zu den Instandhaltungsaufwänden über einen Zeitraum von 30 Jahren bei einer jährlichen Fahrleistung von 400.000 km vor. Danach werden in diesem Zeitraum 52,3 Tonnen Stahl, 1,3 Tonnen Blei, 1,0 Tonnen Kupfer, 0,6 Tonnen Aluminium, 1,1 Tonnen Kunststoffe, 0,2 Tonnen Glas und 0,2 Tonnen Farben benötigt [Bombardier 2003]. Die Daten wurden auf jährliche Materialmengen pro Zugkilometer umgerechnet und sowohl für Nah- als auch für Fernverkehrszüge unterstellt (siehe Tabelle 59). Wartungsaufwände für die Waggons konnten aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden.

5.4 Lokbespannte Güterzüge

Die Angaben für die Herstellung eines lokbespannten Güterzuges wurden wiederum der IFEU-Studie entnommen. Der 524 Tonnen schwere Zug besteht aus einer Lokomotive mit 85 Tonnen und 20 Waggons mit einem durchschnittlichen Gewicht von 22 Tonnen (Mix aus 2- und 4-achsigen Waggons). Mit 456 Tonnen entfallen rund 87 % des Gesamtgewichtes eines entsprechenden Güterzuges auf das Material Stahl. Die

jährlichen durchschnittlichen Errichtungsaufwände pro Zugkilometer für alle eingesetzten Materialien für einen lokbespannten Güterzug finden sich in Tabelle 60.

Für die Wartung wurden für die Lokomotive wiederum die Werte der Bombardier-Umwelterklärung zugrunde gelegt [Bombardier 2003]. Spielmann et al. [2007] führen aber zusätzlich pro Waggon über eine Lebensdauer von 40 Jahren einen Bedarf an eisenhaltigen Bremsklötzen von 3,5 Tonnen auf. Dieser zusätzliche Eisenbedarf für die Wartung der Güterwaggons wurde daher ergänzend berücksichtigt. Es wurde dabei von 20 Waggons mit einer Lebensdauer von 40 Jahren ausgegangen. Die Werte von Spielmann et al. [2007] wurden entsprechend in die Berechnung eingesetzt. Tabelle 60 enthält den gesamten Materialbedarf pro Zugkilometer für die Wartung von lokbespannten Güterzügen einschließlich der Waggons.

Tabelle 60: Jährlicher Materialeinsatz für Herstellung und Instandhaltung von lokbespannten Güterzügen (Lebensdauer: 40 Jahre; Jahresfahrleistung: 40.000 km/a)

Bereich	Errichtungsaufwand	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]; Berechnungen des Öko-Instituts.

5.5 Ergebnisse

Tabelle 61 fasst die Ergebnisse der CO₂- und CO₂-Äquivalent-Berechnungen für den Bereich Herstellung und Wartung der Schienenfahrzeuge einschließlich Waggons zusammen. 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.

Werden die Ergebnisse auf die Verkehrsleistung bezogen, ergibt sich ein anderes Bild. Aufgrund der geringeren Jahresfahrleistung und Auslastung sind die auf die Verkehrs-

leistung 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 61).

Tabelle 61: 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/a	g/Zug-km/a	g/Pkm/a bzw. g/tkm/a	g/Pkm/a bzw. g/tkm/a
ICE 1 (Triebfahrzeug)	150	163	0,51	0,55
ICE 2 (Triebfahrzeug)	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: Berechnungen des Öko-Instituts.

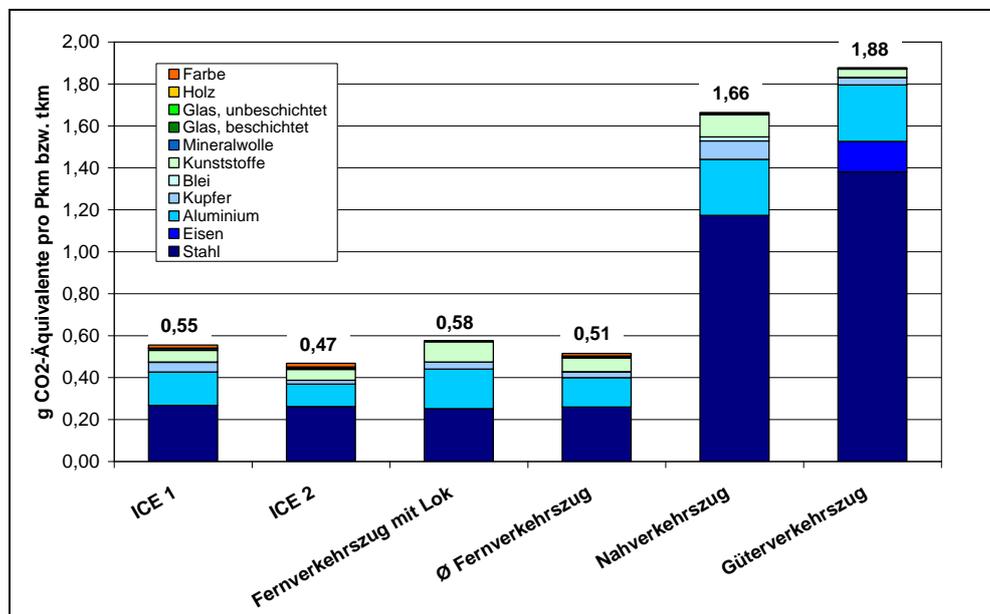


Bild 28: CO₂-Äquivalent-Emissionen durch die Herstellung und Wartung von Triebfahrzeugen und lokbespannten Zügen [Berechnungen des Öko-Instituts]

Den Einfluss der verschiedenen Materialien, die zur Herstellung und zur Wertung der Schienenfahrzeuge und der Waggons eingesetzt werden, auf die jährlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer zeigt Bild 28. Bei den Fernverkehrszügen entfallen mehr als drei Viertel der Emissionen auf die Baustoffe Stahl und Aluminium. Beim Nahverkehrs- und Güterzug liegen die Anteile mit 87 bzw. 88 % sogar noch höher. Drittwichtigster emissionsrelevanter Baustoff sind die Kunststoffe. Lediglich beim Güterverkehr rangieren die Emissionen der Kunststoffe hinter den Emissionen des eingesetzten Eisens, das bei der Nachrüstung der Bremsklötze der Waggons benötigt wird.

6 Darstellung der Gesamtergebnisse und Vergleich mit anderen Studien

6.1 Gesamtergebnis

In den vorangegangenen Kapiteln wurden für das deutsche Schienennetz die Treibhausgasemissionen für folgende Bereiche ermittelt:

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

Für den Bereich Bau und Unterhalt der Infrastruktur konnten ausgehend von Detaildaten für das DB-Netz die Treibhausgasemissionen des gesamten deutschen Schienennetzes ermittelt werden. Für den Betrieb der Schieneninfrastruktur wurden ebenfalls detailliert für das DB-Netz die Treibhausgasemissionen ermittelt. Angaben zum Netz anderer Infrastrukturbetreiber lagen nicht vor, weshalb in dieser Studie die Angaben zum DB-Netz für das Gesamtnetz übernommen werden. 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.

Tabelle 62: 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	
	<i>g/Pkm</i>	<i>Anteil in %</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>Anteil in %</i>	<i>g/tkm</i>	<i>Anteil in %</i>
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%

Quellen: [Richter 2010]; Berechnungen des Öko-Instituts.

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 über-

durchschnittlich Triebfahrzeuge einsetzen, kann durch die in dieser Studie für lokbespannte Nahverkehrszüge ermittelten Treibhausgasemissionen die Situation bei NE-Bahnen leicht überschätzt werden. Aufgrund der geringen Bedeutung der fahrzeugbedingten Emissionen wurde aber auf eine weitergehende Differenzierung in dieser Studie verzichtet und für alle Bahnen die Werte eines lokbespannten Nahverkehrszug zugrunde gelegt.

Tabelle 62 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. 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 62 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 (Version 5.01) entnommen [Richter 2010].

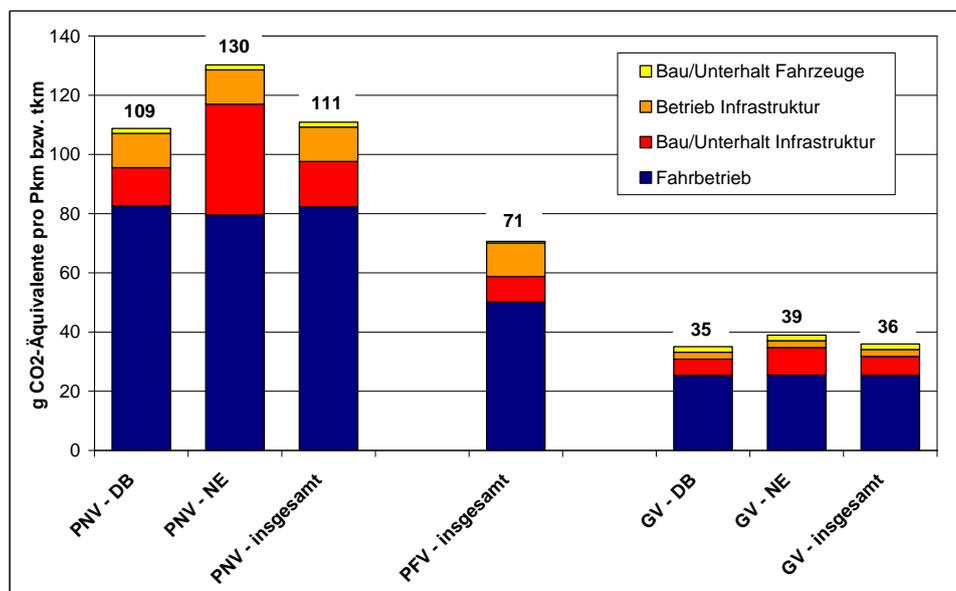


Bild 29: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm für den Fahrbetrieb, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge in Deutschland 2008 [Richter 2010; Berechnungen des Öko-Instituts]

Für den Personennahverkehr ergeben sich 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 62). Bei allen Verkehrsarten entfällt damit mehr als ein Viertel der Gesamtemissionen auf die Schienen- und Fahrzeuginfrastruktur.

Bild 29 zeigt für den Personennah- und Güterverkehr die Gesamtemissionenwerte, differenziert nach DB AG sowie NE- bzw. Werkbahnen. Während sich die Emissionen des Fahrbetriebs zwischen beiden Gruppen kaum unterscheiden, liegen die Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur sowohl beim Personennah- als auch beim Güterverkehr bei NE-Bahnen höher als bei der DB AG. Für den Fahrbetrieb und den Bau/Unterhalt der Fahrzeuge wurden in dieser Studie keine separaten Werte für die DB AG und NE-Bahnen ermittelt (siehe oben). Aus diesem Grund unterscheiden sich DB und NE-Bahnen in diesen Bereichen nicht (siehe Bild 29).

6.2 Ergebnisse der Sensitivitätsberechnungen

Entsprechend den Vorgaben der PCR for Railways [PCR 2009a] wurde für langlebige Infrastrukturbestandteile (z. B. Brücken, Tunnel, Bahnhöfe) eine Lebensdauer von 60 Jahren angesetzt. In bisherigen Studien wurden hierfür 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 im Rahmen dieser Studie eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, bei der für alle langlebigen Infrastrukturbestandteile eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen wurde (siehe Tabelle 2). Für kurzlebigere Bestandteile der Infrastruktur (z. B. Fahrdrähte) wurden weiterhin die entsprechend kürzeren Lebensdauern angenommen.

Bild 30 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 1,7 g/Pkm und die CO₂-Äquivalent-Emissionen um 1,8 g/Pkm. Beim Personenfernverkehr beträgt die Reduktion sowohl der CO₂- als auch der CO₂-Äquivalent-Emissionen rund 1,3 g/Pkm. Die stärkere Reduktion der Treibhausgasemissionen beim Nah gegenüber dem Fernverkehr ist auf den größeren Einfluss der Bahnhöfe und Werke zurückzuführen (siehe Bild 30), 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 0,5 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 29). Daher ist eine verbindliche Regelung zu den anzuwendenden Lebensdauern für entsprechende Bilanzen anzustreben.

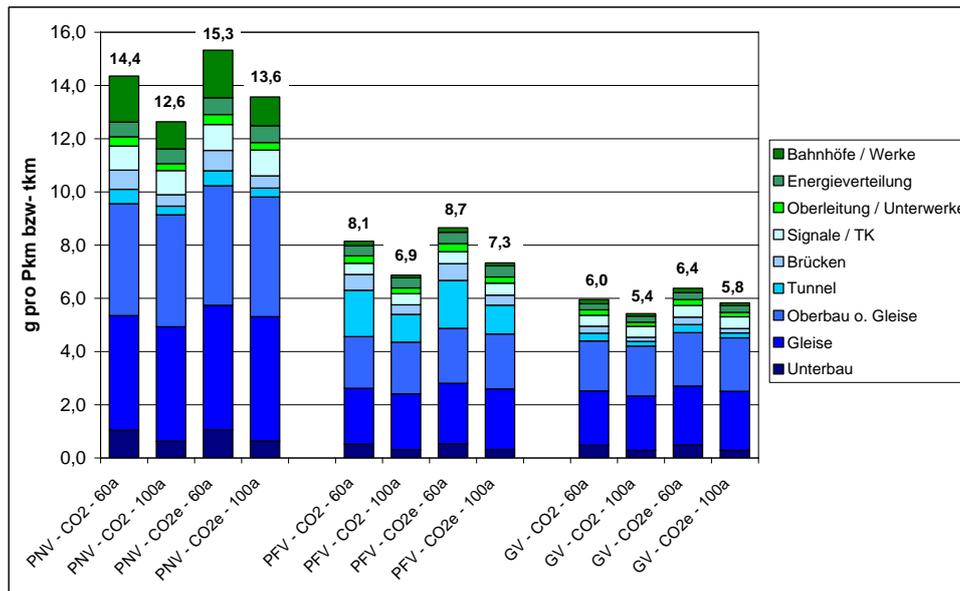


Bild 30: Spezifische CO₂- und CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur in Deutschland im Jahr 2008 unter Berücksichtigung einer Lebensdauer für langlebige Infrastrukturen von 60 bzw. 100 Jahren [Berechnungen des Öko-Instituts]

6.3 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 Schieneninfrastruktur sowie durch den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge 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]²²
- 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.
- Untersuchung aus dem Jahr 2009 zu den Treibhausgasemissionen durch die Infrastruktur des Hochgeschwindigkeitsverkehrs in Europa („Carbon Footprint of High-Speed railway infrastructure (Pre-Study)“) im Auftrag des Internationalen Eisenbahnverbandes UIC [UIC 2009];

Chester [2008] ermittelte die Treibhausgasemissionen durch den Bau, die Wartung und den Betrieb von Verkehrsinfrastrukturen und Fahrzeugen für verschiedene Personen-

²² 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].

verkehrsmittel in den USA. Unter anderem 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. Beim 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 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]. 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 miterhoben wurden.

Frischknecht/Stucki [2009] berücksichtigen in ihrer Modellierung der Treibhausgasemissionen von Transportleistungen den Bau, den Unterhalt, den Betrieb und den Rückbau der Verkehrsinfrastruktur. Die Treibhausgasemissionen werden für Regional-, Fernverkehrs- und Güterzüge basierend auf Schweizer Verhältnissen sowie für den deutschen ICE ausgewiesen. Dabei werden die Treibhausgasemissionen über den Material- und Energieverbrauch beim Bau, Unterhalt und Rückbau der Gleise, Tunneln und Brücken ermittelt. Als Datengrundlage dient überwiegend die Ökobilanzdatenbank ecoinvent (Version 2.01) [ecoinvent 2009]. Bezüglich der Infrastruktur stellt ecoinvent die Datensätze „Trassenbau, Bahn“, „Unterhalt, Trasse, Bahn“ und „Entsorgung Trasse Bahn“ bereit. Konkret umfasst das Inventar den Bau der Eisenbahntrasse (Schienenbettung, Unterbau und Oberleitung) sowie den Bau von Tunneln und Brücken. Weiterhin wird die Entsorgung des Schotters und der Schwellen berücksichtigt. Weitere Bestandteile der Gleis-Infrastruktur, wie Signal- und Kommunikationsinfrastruktur sowie Gebäude (Bahnhöfe, Werkstätten) werden im Gegensatz zur vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Neben der Errichtung, Wartung und Entsorgung der Infrastruktur werden der Energieverbrauch des Betriebes der Trasse und der Tunneln 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 [Frischknecht/Stucki 2009].

In der Studie des *Internationalen Eisenbahnverbandes UIC [UIC 2009]*, die von Matthias Tuchschnid erstellt wurde, werden die Treibhausgasemissionen für den Hochgeschwindigkeitsverkehr in Europa ermittelt. Berücksichtigt werden dabei die Er-

richtung der Trasse (u. a. Erdarbeiten für Trasse, Ober- und Unterbau, Signal- und Kommunikationstechnik, Oberleitungen, Unterwerke, Tunnel, Brücken, Transporte der Materialien, Baustellenenergien), der Gebäude wie Bahnhöfe und Werke sowie die Fahrzeugproduktion. Die Treibhausgas-Emissionsfaktoren für die verbauten Materialien wurden wie bei Frischknecht/Stucki [2009] der Ökobilanzdatenbank ecoinvent entnommen. Instandhaltung und Betrieb der Infrastruktur werden hingegen nicht berücksichtigt. In der UIC-Studie werden die Ergebnisse verschiedener Szenarien vorgestellt, die sich hinsichtlich des eingesetzten Elektrizitätsmixes, der Topografie und der Anzahl der Zugfahrten und Auslastungen der Züge unterscheiden. Das UIC-Szenario 2 repräsentiert beispielsweise den Betrieb zwischen großen Städten mit durchschnittlicher europäischer Topografie (5,1 % Brücken, 17,7 % Tunnel), mit hoher Zuganzahl und hoher Auslastung. Das Szenario 2 ist beispielsweise repräsentativ für Deutschland. Das Szenario 3 der UIC-Studie repräsentiert den Betrieb in dünn besiedelten gebieten mit einem hohen Tunnel- und Brückenanteil (55 % Brücken, 40 % Tunnel) sowie niedriger Auslastung (25 Züge/Tag mit 180 Passagieren statt 90 Züge/Tag mit 535 Passagieren). Beide Szenarien werden zum Vergleich mit den Ergebnissen dieser Studie herangezogen [UIC 2009].

Als Ergänzung zum UIC-Bericht wird ein Online-Tool zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen durch Fahrbetrieb, Infrastruktur und Fahrzeuge im Internet angeboten²³, bei dem die Eingangsparameter wie Tunnel- und Brückenanteile sowie Auslastung der Strecke und Züge modifiziert werden können. Mit Hilfe dieses Online-Tools wurde ein weiteres Szenario erstellt, das im Folgenden als Szenario Öko-Institut (ÖI) bezeichnet wird. Dabei wurden ein Anteil von 31 % Tunnel und 7 % Brücken als Topografiedaten verwendet (Mittelwert dreier deutscher Hochgeschwindigkeitsstrecken [UIC 2009]). Zusätzlich wurde von einer Auslastung der Hochgeschwindigkeitszüge von 45,7 % bei 684 Sitzplätzen ausgegangen.

Bild 31 vergleicht die in dieser Studie ermittelten Treibhausgasemissionen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur, für den Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie für den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge einschließlich Waggons mit den Ergebnisse der drei oben vorgestellten Studien. Dabei sind die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung und Wartung gelb, die durch den Bau und Unterhalt der Infrastruktur bedingten Emissionen rot und die durch den Betrieb der Infrastruktur resultierenden Emissionen orange dargestellt. Für die Studie von Frischknecht/Stucki [2009], in der keine Unterscheidung zwischen Bau/Wartung und Betrieb der Infrastruktur erfolgt, wurden die Infrastruktur-bedingten Emissionen braun dargestellt. Bei Chester [2008] wurden zusätzlich die Emissionen durch Versicherungen von Gebäuden, Fahrzeugen und Personal ermittelt; diese sind in Bild 31 grün dargestellt.

²³ Siehe www.mtuchschmid.ch/uic-infrastructure/.

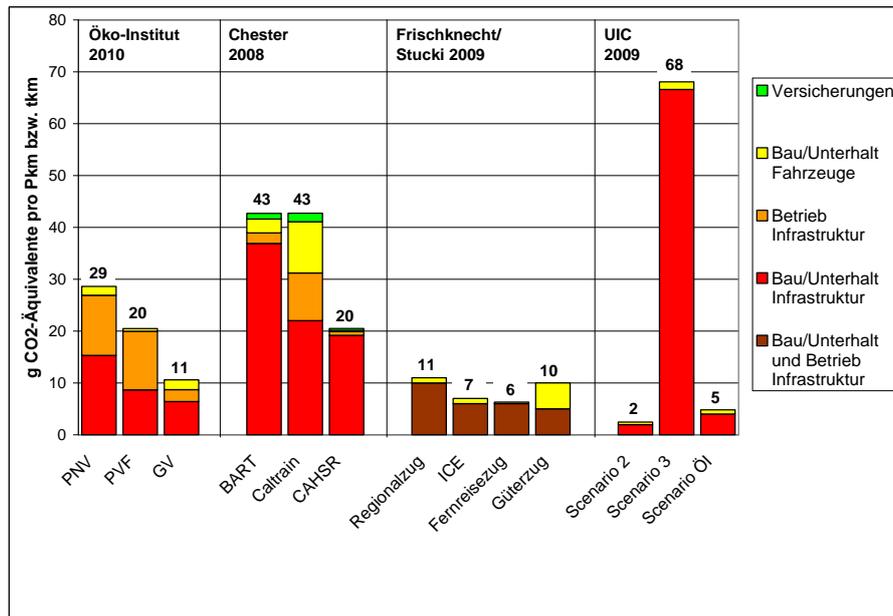


Bild 31: Ergebnisse verschiedener Studien zu den spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Pkm bzw. tkm durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge differenziert nach Verursacherguppen [Berechnungen des Öko-Instituts, Chester 2008, Frischknecht/Stucki 2009, UIC 2009]

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der verschiedenen Studien ergibt Folgendes (siehe Bild 31):

- Die Treibhausgasemissionen für Infrastruktur und Fahrzeuge, wie sie in 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 63). 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 Bahnhofsba 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 Hochge-

schwindigkeitsstrecke 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 63: 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
	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>
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]; Berechnungen des Öko-Instituts.			

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 Zug-

vorheizungen 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 63).

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 63). 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 3 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.

- Vergleicht man die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit denen von Frischknecht/Stucki [2009], 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; siehe Bild 31).

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 verwendet (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 wurde (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 geht 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 (siehe Bild 26). 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 ist die in dieser Studie unterstellte höhere Jahresfahrleistung von Waggons (26.000 km/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 Personenah- 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.

- In der Studie von Tuchschnid für die UIC [UIC 2009] werden für den Bau der HGS-Schieneninfrastruktur durchschnittliche CO₂-Äquivalente-Emissionen in Höhe von 34 t pro Gleis-km zugrunde gelegt. Damit liegen die Werte ähnlich hoch, wie sie für Hochgeschwindigkeitsstrecken in dieser Studie ermittelt wurden (36 t CO₂-Äquivalente pro Gleis-km). Wie Bild 31 zeigt, liegen die Treibhausgasemissionen pro Pkm durch den Bau der Schieneninfrastruktur bei den Szenarien 2 und Öl deutlich unter denen dieser Studie. Ursache ist hierbei wiederum die zugrunde gelegte

Verkehrsleistung. Die Verkehrsleistung pro Jahr liegt im Szenario 2 bei rund 17,6 Mill. Pkm pro Gleis-km und Jahr, im Szenario ÖI bei rund 9,7 Mill. Pkm pro Gleis-km und Jahr. Wie bereits ausgeführt werden in Deutschland selbst auf hoch ausgelasteten Strecken wie die HGS Hannover – Würzburg lediglich Werte in Höhe von rund 5 Mill. Pkm pro Gleis-km und Jahr erreicht. Im Durchschnitt liegen die Werte deutlich darunter (siehe oben). Welchen Einfluss eine geringere Verkehrsleistung auf das Rechenergebnis hat, zeigt das Szenario 3 der UIC-Studie [UIC 2009]. Die Emissionen pro Pkm belaufen sich dann auf 68 g/Pkm, wobei dieser Berechnung eine streckenabhängige Verkehrsleistung von rund 1,6 Mill. Pkm/Gleis-km/Jahr zugrunde liegt. Gleichzeitig wird für dieses Szenario auch ein extrem hoher Tunnel- (40 % der Strecke) und Brückenanteil (55 %) angenommen, der sich ebenfalls in dem hohen CO₂-Äquivalent-Wert pro Pkm bemerkbar macht.

Die in der UIC-Studie ermittelten Treibhausgasemissionen für die Herstellung und den Unterhalt der Hochgeschwindigkeitszüge deckt sich ebenfalls mit den Ergebnissen dieser Studie [UIC 2009]. Grundsätzlich stimmen damit die Ergebnisse der UIC-Studie mit den Ergebnissen dieser Studie überein. Die Unterschiede sind lediglich, dass zum einen in der vorliegenden Studie der Unterhalt und der Betrieb der Schieneninfrastruktur berücksichtigt wurden. Zum anderen, dass in die Berechnungen die realen Verkehrsleistungen des deutschen Schienennetzes einfließen und diese Werte unter den Modelannahmen der UIC-Studie liegen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass grundsätzlich die Ergebnisse der vorliegenden Studie den Ergebnissen früherer Studien entspricht. Unterschiede, die sich im Bild 31 zeigen, beruhen zum einen auf anderen Abgrenzungen. Insbesondere beim Einbezug der Treibhausgasemissionen durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur unterscheidet sich diese Studie von den Ergebnissen vergleichbarer Studien. Zum anderen ergeben sich insbesondere Unterschiede durch die Verwendung realer Verkehrsleistungsdaten des deutschen Schienennetzes, die in der Regel unter denen der Vergleichsstudien lagen. Dies führt zwangsläufig zu höheren 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 Schienenverkehrs ab.

Ein weiterer Unterschied zu den Vergleichsstudien ist, dass die Allokation der Umweltauswirkungen für einzelne Streckenabschnitte auf Basis der Brutto-Tonnenkilometer erfolgte. Dies führt zusätzlich dazu, dass die Umweltauswirkungen des Nebennetzes in starkem Maße dem Schienenpersonennahverkehr zugerechnet werden, was sich ebenfalls in höheren spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen im Vergleich zu den anderen Studien niederschlägt. Keine der bisherigen Studien hat eine derartig detaillierte Allokation der Umweltauswirkungen auf die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr durchgeführt. Zu guter Letzt sei darauf hingewiesen, dass bei den Berechnungen der Treibhausgasemissionen des Baus und des Unterhalts der Schieneninfrastruktur neben den reinen Streckengleisen auch Gleise für die Zugbildung, Bahnhofsgleise und Überholgleise berücksichtigt wurden. Im DB-Netz entfallen auf diese Nicht-Streckengleise rund ein Fünftel der gesamten Gleiskilometer.

7 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, gezielt für Schienenverkehr den Beitrag der Verkehrsinfrastruktur sowie der Fahrzeuge bzw. Waggons zur Treibhausgasbilanz des Personennah-, Personenfern- 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 Schienenwege* benötigt werden, wurden die bei der Herstellung der Materialien entstehenden CO₂-Emissionen sowie Treibhausgasemissionen (gemessen als CO₂-Äquivalente) ermittelt. Für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur wurden folgende Bereiche berücksichtigt:

- 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 Schienenfahrzeuge und Waggons* verbunden sind, wurden analog zur Schieneninfrastruktur ermittelt. Es wurden ebenfalls die benötigten Materialmengen und daraus die mit deren Herstellung verbundenen Emissionen ermittelt. Die Materialverbräuche für die Herstellung und für den Unterhalt wurden dabei für folgende typische Zugkonfigurationen ermittelt:

- Triebfahrzeuge (ICE) für den Personenfernverkehr,
- lokbespannte Fernverkehrszüge,
- lokbespannte Nahverkehrszüge sowie
- lokbespannte Güterverkehrszüge

Aufgrund der geringen Bedeutung wurden Energieverbräuche der Werke zur Herstellung der Schienenfahrzeuge sowie Transporte der Baumaterialien in dieser Studie nicht berücksichtigt. Für den Bereich *Betrieb der Infrastruktur* wurden die Energieverbräuche

der Bürogebäude, Personenbahnhöfe, Instandhaltungswerke sowie sonstiger Verbraucher (z. B. Weichenheizungen, Zugvorheizungen) ermittelt. Auf Basis der jährlichen Energieverbräuche wurden dann die Treibhausgasemissionen berechnet.

Während die Energieverbrauchswerte für den Betrieb der Infrastruktur sowie Materialmengen und damit die mit deren Herstellung einhergehenden Emissionen für die Instandhaltung i. d. R. pro Jahr vorlagen, mussten die ermittelten Treibhausgasemissionen für den Bau der Schienenwege und Züge mit Hilfe der Lebensdauer auf jährliche Werte umgerechnet werden. Bei langlebigen Bauwerken der Schieneninfrastruktur (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 (z. B. für Schienen 30 Jahre oder für das Schotterbett 15 Jahre). 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 2009a]. Zusätzlich wurde in einer Sensitivitätsberechnung analysiert, wie sich eine Lebensdauer von 100 Jahren bei langlebigen Bauwerken auf das Gesamtergebnis auswirkt.

Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur

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

Für die Ermittlung der Umweltauswirkungen der Schieneninfrastruktur sind allerdings außer den Daten zu den pro Bauwerk eingesetzten Materialmengen auch detaillierte Angaben zu den Schienenwegen selbst notwendig. Neben Angaben zu den Gleislängen werden Angaben zu dem Anteil der elektrifizierten Strecken, zur Art der Schienen- und Schwellentypen (z. B. Beton- oder Holzschwelle), Arten und Längen der Tunnel- und Brücken etc. benötigt. Da diese Detaildaten öffentlich nicht zur Verfügung stehen, hat das Öko-Institut für diese Fragen mit dem DB Umweltzentrum zusammengearbeitet. Das DB Umweltzentrum stellte für diese Studie einen Datensatz zur Verfügung, der für das Netz der Deutschen Bahn AG detailliert alle für die Berechnung notwendigen Daten zur Schieneninfrastruktur für das Jahr 2008 enthielt. Damit lagen für 87 % der rund 73.000 Gleiskilometer in Deutschland (ohne S-Bahnen in Berlin und Hamburg) umfangreiche Einzeldaten vor. Für die fehlenden 13 %, die von Nichtbundeseigenen Eisenbahngesellschaften (NE-Bahnen) und Werkbahnen genutzt werden, wurden die Ergebnisse des DB-Netzes übertragen.

Der Datensatz für das DB-Netz enthielt nicht nur Durchschnittswerte für das Gesamtnetz, sondern Angaben für insgesamt 7.500 einzelne Streckenabschnitte. Die Streckenabschnitte sind dabei so gewählt, dass sich innerhalb eines Abschnittes die Zug-

zahlen nicht verändern. Durch die Differenzierung einzelner Streckenabschnitte sind Auswertungen der Umweltauswirkungen für einzelne Teilstrecken möglich (z. B. Hochgeschwindigkeitsnetz oder einzelne Strecken wie die der Hochgeschwindigkeitsstrecke Köln - Frankfurt). Für alle Einzelstreckenabschnitte lagen Angaben zur Zugbelegung differenziert nach Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr vor (einschließlich Verkehre von NE-Bahnen auf dem DB-Netz). Mit diesen Daten konnten für jeden Streckenabschnitt die Zug-Kilometer sowie die Brutto-Tonnenkilometer berechnet werden. Damit war es möglich, nicht nur die Treibhausgasemissionen pro Gleiskilometer detailliert zu ermitteln, sondern gleichzeitig die Treibhausgasemissionen auf die drei Verkehrsarten Schienenpersonennah-, Schienenpersonenfern- sowie Schienengüterverkehr aufzuteilen. Die Aufteilung erfolgte dabei auf Basis der auf dem Streckenabschnitt erbrachten Brutto-Tonnenkilometer. Entfielen auf einem Streckenabschnitt beispielsweise 60 % der Brutto-Tonnenkilometer auf den Güterverkehr, wurden auch für diese Strecke 60 % der Treibhausgasemissionen dem Güterverkehr zugeordnet. Die vorliegende Studie beschränkt sich ausschließlich auf den Eisenbahnverkehr; unberücksichtigt bleiben damit auf Schienen stattfindende städtische öffentliche Personennahverkehre (S-, U- und Straßenbahnen). Da S-Bahnverkehre zum Teil auch auf dem Netz der DB AG abgewickelt werden, wurde auf diesen Strecken ein Teil der ermittelten Treibhausgasemissionen dem S-Bahn-Verkehr zugeordnet.

Bild 32 zeigt die jährlichen Treibhausgasemissionen pro Gleiskilometer für verschiedene Streckentypen des DB-Netzes (blaue Balken, linke Achsenbeschriftung). Im Durchschnitt entstehen durch den Bau und Unterhalt des DB-Netzes rund 25 t CO₂-Äquivalente pro Gleiskilometer. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken (HGS) steigen die Werte im Durchschnitt auf 36 t an. Aufgrund eines hohen Anteils von Ingenieurbauten (z. B. Tunnel, Brücken, Feste Fahrbahnen) können auf einzelne Hochgeschwindigkeitsstrecken – wie Bild 32 zeigt – Werte von 65 bzw. 75 t CO₂-Äquivalente pro Gleiskilometer erreicht werden (Faktor 2,5 bis 3 höher als der Netzdurchschnitt).

Werden die Umweltauswirkungen auf die einzelnen Verkehrsarten aufgeteilt und auf die Verkehrsleistungen bezogen, ergibt sich aber – wie Bild 32 zeigt – eine veränderte Situation: Trotz der hohen Treibhausgasemissionen pro Streckenkilometer auf den beiden Hochgeschwindigkeitstrassen Hannover – Würzburg und Köln – Frankfurt/M. fallen die Emissionen der Schieneninfrastruktur für den Personenfernverkehr (PFV) mit 14 bzw. 16 g CO₂-Äquivalente pro Personenkilometer (Pkm) im Vergleich zum Netzdurchschnitt moderat aus (+60 % bzw. +77 % gegenüber dem Durchschnitt von 9 g CO₂-Äquivalente pro Pkm) (dunkelgrüner Balken, rechte Achsenbeschriftung)]. Hier wirken sich die hohen Verkehrsleistungen, die auf diesen Strecken erbracht werden, positiv auf die Treibhausgasbilanz aus.

Beim Personennahverkehr (PNV) liegen die durchschnittlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen im DB-Netz bei 15 g pro Pkm (Durchschnitt DB AG und NE-Bahnen). Auf Hochgeschwindigkeitsstrecken und Ausbaustrecken (ABS) liegen die entsprechenden Werte mit 7 bzw. 9 g CO₂-Äquivalente pro Pkm geringer (siehe Bild 32: grüne Balken, rechte Achsenbeschriftung). Hier kommt zum Tragen, dass auf diesen Strecken überwiegend Fernverkehr stattfindet, dem folglich auch der größte Anteil der Treibhausgasemissionen zugeschrieben wird. Anders sieht es auf den übrigen Strecken des DB-

Netzes aus. Hier findet kaum Personenfernverkehr statt. Dies hat zur Folge, dass ein Großteil der durch den Bau und Unterhalt bedingten Treibhausgasemissionen dem Personennahverkehr, teilweise auch dem Güterverkehr zugeordnet wird. Da gleichzeitig die Personenkilometer auf diesen Nebenstrecken eher unterdurchschnittlich sind, ergibt sich für den Personennahverkehr auf dem übrigen Netz mit 23 g CO₂-Äquivalente pro Pkm ein hoher Wert, der sich auch im Gesamtdurchschnitt des Personennahverkehrs nennenswert niederschlägt. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für den Güterverkehr: auch hier liegen die Emissionen auf den übrigen Strecken mit 8 g CO₂-Äquivalente pro tkm höher als auf den Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecken (siehe Bild 32: hellgrüner Balken, rechte Achsenbeschriftung). Aufgrund der geringen Verkehrsleistung des Güterverkehrs auf den übrigen Strecken wirkt sich dies aber auf den Gesamtdurchschnitt von 5 g CO₂-Äquivalente pro tkm kaum aus (Durchschnitt DB AG und NE-Bahnen).

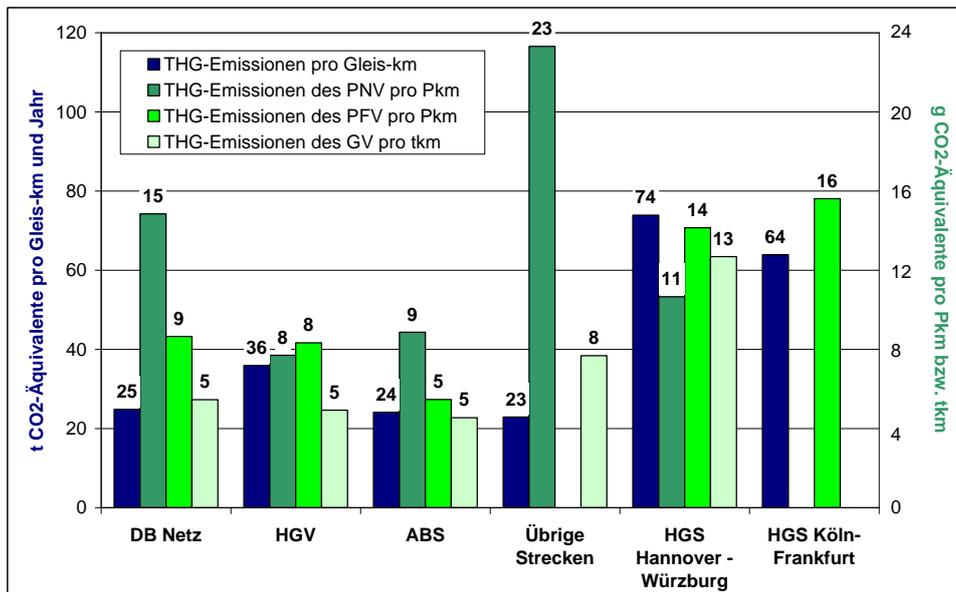


Bild 32: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Gleiskilometer und pro Verkehrsleistung für verschiedene Verkehrsarten und Streckentypen für Bau und Unterhalt des DB-Netzes im Jahr 2008 [Berechnungen des Öko-Instituts]

Diese Auswertungen zeigen, dass die auf die Personen- und Tonnenkilometer bezogenen Treibhausgasemissionen zwar einerseits direkt vom Erstellungs- und Wartungsaufwand der Strecke abhängen (damit z. B. vom Anteil der Tunnel und Brücken). Andererseits hängen die Werte aber in noch stärkerem Maße von der Nutzungsintensität der Strecken ab. Stark befahrene Strecken können damit trotz hoher bau- und wartungsbedingter Treibhausgasemissionen geringe Werte pro Personen- bzw. Tonnenkilometer aufweisen. Dies verdeutlicht, dass bei Gegenüberstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Studien immer berücksichtigt werden muss, welche Verkehrsleistungen den Berechnungen zugrunde liegen. In dieser Studie wurden keine Schätzungen zu den Streckenauslastungen sondern Daten zur Zugbelegung einzelner Streckenabschnitte diffe-

renziert nach DB AG und NE-Bahnen verwendet. Zudem basieren die Ergebnisse auf errechneten Zugkilometern und modellierten Verkehrsleistungen – unter Einbezug von Daten des Statistischen Bundesamtes [StBu 2009a und 2009b] – für die einzelnen Streckenabschnitte des DB-Netzes, so dass im Vergleich zu anderen Studien sehr realitätsnahe Berechnungen möglich waren. Die berechneten hohen Treibhausgasemissionen des Personennahverkehrs auf dem Nebennetz sind ein Resultat der gut abgebildeten niedrigen Verkehrsleistung.

Im Gegensatz zum DB-Netz lagen für das Netz, das NE- und Werkbahnen nutzen, keine Detailangaben zur Art der Infrastruktur vor (Schwellentypen etc.). Über die Angaben zur Streckenlänge und Rückschlüsse vom DB-Netz konnte aber auch für die fehlenden 13 % des Schienennetzes die Treibhausgasemissionen durch den Bau und Unterhalt der Infrastruktur ermittelt werden. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen für dieses restliche Netz liegen für den Personennahverkehr bei rund 88 g/Pkm und für den Güterverkehr bei 32 g/tkm. Personenfernverkehr findet hingegen auf diesen Schienennetzen nicht statt. Die ermittelten Werte liegen somit deutlich höher als die entsprechenden Werte für das DB-Netz. Wesentlicher Grund hierfür sind die geringen Verkehrsleistungen, die auf diesen Netzen erbracht werden.

Werden die Werte des DB-Netzes und die Werte der Netze anderer Eisenbahninfrastrukturunternehmen bzw. der Werkbahnen unter Berücksichtigung der auf diesen Netzen erbrachten Verkehrsleistungen gemittelt, ergeben sich folgende CO₂-Äquivalent-Emissionen für den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur:

- 15 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Personennahverkehr,
- 9 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Personenfernverkehr und
- 6 g CO₂-Äquivalente pro tkm für den Güterverkehr.

Betrieb der Schieneninfrastruktur

Neben dem Bau und der Instandhaltung wurden auch die Treibhausgasemissionen durch den *Betrieb der Schieneninfrastruktur* ermittelt. Hierzu lagen ausschließlich Daten für das Netz der DB AG vor. Insgesamt entstanden im Jahr 2008 durch den Strom- und Wärmeverbrauch der Bürogebäude, der Personenbahnhöfe, der Instandhaltungswerke sowie sonstiger Verbraucher wie Weichenheizungen rund 1,2 Mill. t CO₂-Äquivalente. In dieser Zahl sind somit die Gesamtemissionen durch den Betrieb des DB-Netzes enthalten unabhängig davon, ob das Schienennetz von Konzerneigenen Zügen oder von Zügen von NE-Bahnen genutzt wird. Diese Gesamtemissionen wurden mittels weiter gehender Angaben des DB Umweltzentrums auf die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr heruntergebrochen. Auf die Verkehrsleistung bezogen ergeben sich folgende CO₂-Äquivalent-Emissionen:

- 12 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Personennahverkehr,
- 11 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Personenfernverkehr und
- 2 g CO₂-Äquivalente pro tkm für den Güterverkehr.

Da keine Angaben zu den Treibhausgasemissionen des Betriebs des Nicht-DB-Netzes vorlagen, wurden vereinfacht die Werte des DB-Netzes auch auf das übrige Netz übertragen. In der Realität dürften aufgrund der geringeren Verkehrsleistung die betriebsbedingten Emissionen der Schieneninfrastruktur höher liegen.

Herstellung und Wartung von Fahrzeugen

Für die *Herstellung und Wartung von Schienenfahrzeugen und Waggons* wurden die Materialmengen für den Bau und die Instandhaltung der differenziert betrachteten Zugkonfigurationen (ICE, lokbespannte Fernverkehrs-, Nahverkehrs- und Güterzüge) ermittelt. 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 *renewability* im Auftrag des Öko-Instituts erstellt wurde [Knörr/Kutzner 2009]. Im Wesentlichen decken sich die Angaben zudem mit den Werten der Ökobilanzdatenbank *ecoinvent* [ecoinvent 2009]. Die in dieser Studie zugrunde gelegten CO₂-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge und Waggons belaufen sich auf folgende Werte:

- 2 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Personennahverkehr,
- < 1 g CO₂-Äquivalente pro Pkm für den Personenfernverkehr und
- 2 g CO₂-Äquivalente pro tkm für den Güterverkehr.

Gesamtergebnisse

Bild 33 fasst die Ergebnisse dieser Studie nochmals zusammen. Die bisher bei Umweltvergleichen nicht berücksichtigten Treibhausgasemissionen durch den Bau, Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie durch den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge und Waggons führen beim Personennahverkehr zu zusätzlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen von 29 g/Pkm, beim Personenfernverkehr von 21 g/Pkm und beim Güterverkehr von 11 g/tkm. 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 34 %, beim Personenfern- und Güterverkehr in Höhe von 42 %.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, 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. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass das Gros der zusätzlichen Emissionen einerseits durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur, andererseits durch den Betrieb der Schieneninfrastruktur verursacht wird. Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge sind hingegen beim Schienenverkehr von nachgeordneter Bedeutung.

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

- In dieser Studie wurden ausschließlich die Treibhausgasemissionen der Verkehrs- und Fahrzeuginfrastruktur des Schienenverkehrs ermittelt. Für andere Verkehrsmittel (Pkw/Lkw, ÖPNV, Flugzeuge, Binnenschiffe) wurden die entsprechenden Emissionen nicht berechnet. Die große Bedeutung der zusätzlichen Treibhausgasemissionen der Infrastrukturen bei der Schiene lassen erwarten, dass diese Emissionen auch bei anderen Verkehrsträgern relevante Größenordnungen erreichen. Das Öko-Institut sieht es für eine Versachlichung der Debatte als zwingend notwendig an, dass die Treibhausgasemissionen durch die Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeuge auch für die anderen Verkehrsmittel ermittelt werden sollten, bevor die Ergebnisse dieser Studie breit kommuniziert werden. Das Öko-Institut hält es für problematisch, die Ergebnisse lediglich isoliert für einen Verkehrsträger zu veröffentlichen.

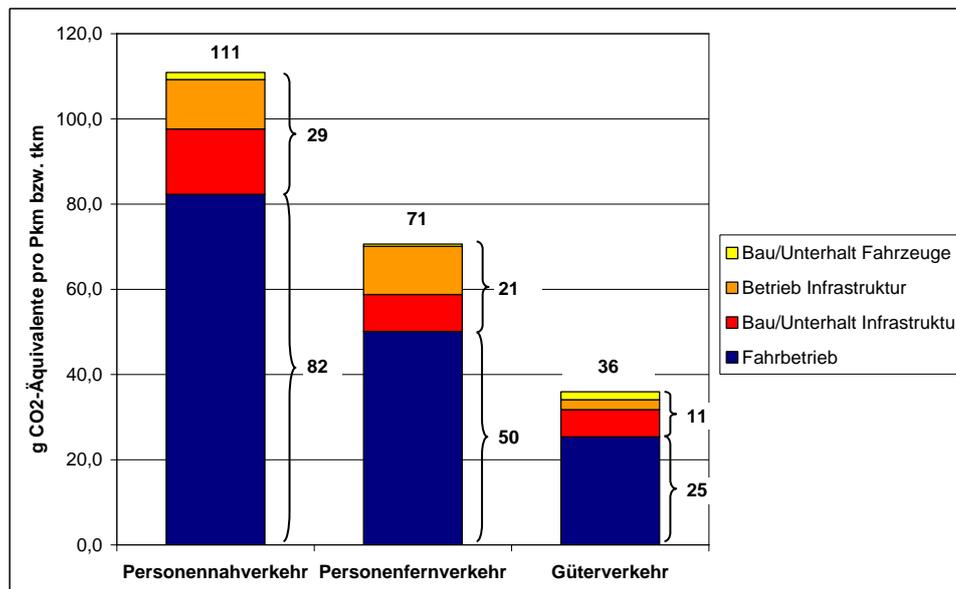


Bild 33: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer für den Fahrbetrieb, Bau/Unterhalt und Betrieb der Schieneninfrastruktur sowie den Bau/Unterhalt der Züge für das Jahr 2008

- Der Betrieb der Schieneninfrastruktur trägt sowohl beim Personennah- wie auch Personenfernverkehr nennenswert zu den zusätzlich ermittelten Treibhausgasemissionen bei (40 % beim PNV bzw. 50 % beim PFV). In dieser Studie lagen ausschließlich Daten für das DB-Netz vor; für das Netz der NE- und Werkbahnen waren keine entsprechenden Daten verfügbar. Zudem konnte aufgrund fehlender Detaildaten die Aufteilung der Treibhausgasemissionen durch den Betrieb des DB-Netzes auf die drei Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr nur grob erfolgen. Von Seiten des Öko-Instituts wird bei der Ermittlung der Treibhausgasemissionen des Betriebs der Schieneninfrastruktur Verbesserungsbedarf bei der Datenqualität gesehen. Insbesondere eine detaillierte Berücksichtigung der NE- und

Werk-Bahnen könnte sich in leicht höheren Emissionswerten beim Personennah- und Güterverkehr auswirken.

- In dieser Studie lagen umfangreiche Daten für das DB-Netz vor, so dass die Treibhausgasemissionen durch den Bau und Unterhalt der Schieneninfrastruktur sehr detailliert berechnet werden konnten. Die in dieser Studie verwendeten Materialmengen pro Gleiskilometer und Bauwerk (z. B. Oberbau, Schienen, Schwellen, Brücken) 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.
- 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 2009a]. 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, und zwar beim Personennahverkehr verringert um 1,8 g/Pkm, beim Personenfernverkehr um 1,3 g/Pkm und beim Güterverkehr um 0,5 g/tkm. Die Größenordnung dieser Werte entspricht denen der Treibhausgasemissionen durch den Bau und Unterhalt der Schienenfahrzeuge. Dies belegt die Bedeutung der zugrunde gelegten Lebensdauer für das Gesamtergebnis.

8 Literatur

- BFL 2006** B+F Beton- und Fertigteilegesellschaft 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)
- Bombardier 2003** Bombardier Transportation: Environmental Product Declaration Class 185 (according to ISO 14021). Kassel: 2003
- 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 and supply chains. In: Environmental Research Letters 4/2009
- DB 2005** Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Die Bahn auf Kurs. Berlin: 2005
- DB 2006** Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Daten & Fakten 2005. Berlin: 2006
- 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
- DB 2010a** Löchter, Andreas (Deutsche Bahn AG, Bahn-Umweltzentrum): Persönliche Mitteilung vom 19.01.2010
- DB 2010b** Deutsche Bahn AG: S Bahn Berlin - Zahlen Daten und Fakten. Siehe www.s-bahn-berlin.de/unternehmen/firmenprofil/zahlenundfakten.htm (abgerufen am 09.02.2010)
- DB 2010c** Deutsche Bahn AG: S Bahn Hamburg – Zahlen Daten, Fakten. Siehe www.s-bahn-hamburg.de/s_hamburg/view/wir/daten-zahlen-fakten.shtml (abgerufen am 09.02.2010)
- DB 2010d** Deutsche Bahn AG: Bahnhofskategorien. Siehe www.deutschebahn.com/site/bahn/de/geschaefte-/infrastruktur_schiene/personenbahnhoefe/bahnhofskategorien-/bahnhofs_kategorien.html (abgerufen am 18.01.2010)

- DB 2010e** Löchter, Andreas (Deutsche Bahn AG, Bahn-Umweltzentrum): Instandhaltungswerke und Werkstätten der DB AG. Persönliche Mitteilung vom 19.01.2010 (unveröffentlicht)
- DB 2010f** Löchter, Andreas (Deutsche Bahn AG, Bahn-Umweltzentrum): Anteile des Personennahverkehrs der Bahnhöfe. Persönliche Mitteilung vom 22.03.2010 (unveröffentlicht)
- 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
- Dube 2008** Dube, N. (Deutsche Bahn AG): Vermeidung von Dieselemission – Herausforderungen und Lösungsansätze aus Sicht des Betreibers Fahrzeugkonzepte von morgen bei steigender Energieknappheit. Vortrag vom 9.12.2008 in Aachen.
- DW 2006** DW Schwellen GmbH (Hrsg.): DW Schwellen – Kompetenz für den Schienenverkehr. Güss/Neuss/Augsburg: 2006
- ecoinvent 2009** Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.): ecoinvent. Ökobilanzdatenbank, Version 2.1. 2009
- Fendrich 2007** Fendrich, L.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- Fiedler 2005** Fiedler, J.: Bahnwesen – Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen. 5. Auflage. München: Werner Verlag, 2005
- Frischknecht/
Stucki 2009** Frischknecht, R.; Stucki, M. (ESU-services GmbH): Primärenergiefaktoren von Transportleistungen. Version 1.3, 19. März 2009. Uster: 2009
- Fritsche et al. 2008** Fritsche, U.; Hochfeld, C.; Jenseit, W.; Matthes, F. C.; Rausch, L.; Schmied, M.; Stahl, H. et al.: GEMIS 4.5 – Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme. Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen. EDV-Modell. Darmstadt/Berlin: 2008 (Modell kostenfrei abrufbar über www.oeko.de/service/gemis)
- Gohlisch 2008** Gohlisch, Gunnar (UBA): Fahr- und Verkehrsleistung sowie Emissionen des Verkehrs auf Basis der TREMOD-Version 4.17: Persönliche Mitteilungen vom 12.2.2007, 31.3.2008 und 24.4.2008
- Gohlisch 2009** Gohlisch, Gunnar (UBA): Fahr- und Verkehrsleistung sowie Emissionen des Verkehrs auf Basis der TREMOD-Version 4.17: Persönliche Mitteilungen vom 26.1.2009
- Haack 2009** Haack, A.: Tunnelbau in Deutschland: Statistik 2008/2009, Analyse und Ausblick. In: Tunnel Nr. 8/2009, S. 16-29
- 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>
- Keles 2007** Keles, R.: Signale stellen aus den Wolken. In: EI – Eisenbahningenieur (58), Nr. 7/2007, S. 25-26
- Kellenberger et al. 2007** Kellenberger, D.; Althaus, H. J.; Kühniger, T.; Lehmann, M.; Jungbluth, N.; Thalmann, P.: Life Cycle Inventories of Building Products; Ecoinvent-Data v2.0. Dübendorf: 2007
- 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
- Knörr et al. 2005** Knörr, Wolfram; Dünnebeil, Frank; Helms, Hinrich; Höpfner, Ulrich; Lambrecht, Udo; Patyk, Andreas; Reuter, Christian: Fortschreibung „Daten- und Rechenmodell“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: 2005
- Knörr et al. 2008** Knörr, W. et al. (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH): EcoTransIT: Ecological Transport Information Tool. Environmental Methodology and Data. Update 2008. Heidelberg: 2008
- 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
- Kohler 2002** Kohler, M.: Der Bettungsmodul für den Schotteroberbau von Meter-spurbahnen. Doktorarbeit an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich: 2002
- 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
- Kötting 2010** Kötting, H.: Liste deutscher Stellwerke - Statistik. Siehe www.stellwerke.de/liste/seite3_s.html (abgerufen am 18.01.2010)
- Lewark 1991** Lewark, S.: Die Holzschwelle im Wettbewerb. In: Forst und Holz, Jahrg. 46 (1991), S. 27-30
- Maibach et al. 1999** Maibach, M.; Peter, D.; Seiler, B.: Ökoinventar Transporte: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug in Ökobilanzen. 2. Auflage. Zürich: 1999
- Matthews 2007** Matthews, V.: Bahnbau. 7. Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2007

- 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
- PCR 2009a** 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)
- PCR 2009b** Product Category Rules for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for rail vehicles. Draft Version (2009-08-17)
- Phillips 2006** Phillips, R.: Air Pollution Associated with the Construction of Swedish Railways. Norrbottenbanan case Study. Luleå (Sweden): 2008
- Richter 2010** Richter, N. (Umweltbundesamt): Treibhausgasemissionen des Schienenverkehrs auf Basis von TREMOD Version 5.01. Persönliche Mitteilung vom 1.2.2010.
- 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 2009a** Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Eisenbahnverkehr 2008. Fachserie 8 Reihe 2. Wiesbaden: 2009.
- StBA 2009b** Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Eisenbahnverkehr 2008 – Betriebsdaten des Schienenverkehrs (mit Daten zur Schienenfrequentierung). Wiesbaden: 2008
- StBA 2009c** Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Eisenbahnverkehr: Personenverkehr mit Bussen und Bahnen 2008. Fachserie 8 Reihe 3.1. Wiesbaden: 2009
- Steger et al. 2010** Steger, S.; Fekkak, M.; Erren, M.; Lischka, S.; Bringezu, S.; Scharp, M.: Zwischenbericht zu Phase II „Bestimmung der aktuellen Bestandsgrößen und des Materialspeichers der Referenzsysteme“; MaRes AP 2.3. Öffentliche Infrastrukturen; Fassung 20.01.2010 (unveröffentlicht)
- ThyssenKrupp 2006** ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH: Oberbauhandbuch. Bochum: 2006 (siehe auch: www.oberbauhandbuch.de)
- 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
- Weco 2006** Weco GmbH (Hrsg.): WECO Auffangsysteme für Tankanlagen im Bereich von Schienenfahrzeugen. Konz-Köen: 2006 (siehe auch www.schubarth.ch/img/pool/WECO_Tankanlagen.pdf, abgerufen am 19.1.2010).

- Weiland/Falkenhagen 2007** Weiland, K.; Falkenhagen, T.: Die Bahnstromversorgung der Deutschen Bahn – aktuelle Entwicklungen. In: Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 10/2007, S. 590-595
- Weiß 2000** Weiß, A.: Bauverfahrenstechnischer Vergleich der Instandhaltung von Schienenwegen. Vertiefearbeit am Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe. Karlsruhe: 2000
- 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