

**ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH**



UmweltMobilCheck

Wissenschaftlicher Grundlagenbericht

Stand: März 2011

Im Auftrag der Deutschen Bahn AG

Heidelberg, 31. März 2011

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	3
2 Vergleich von Umweltwirkungen der Verkehrsmittel	4
2.1 Verursacher und Art der Umweltbelastungen	4
2.2 Bezugsgrößen für den Vergleich	4
2.3 Welche Aussagen lässt ein Vergleich zu?	5
2.4 Welche Umweltwirkungen werden verglichen?	6
3 Daten und Annahmen zur Energie- und Emissionsberechnung	10
3.1 Pkw	10
3.2 Bahn und Öffentlicher Personenverkehr	12
3.2.1 ÖPNV und Zubringer	12
3.2.2 Bahn	13
3.3 Flugverkehr	17
3.3.1 Flugzyklen.....	18
3.3.2 Flugentfernungen	18
3.3.3 Flugzeugtypen	19
3.3.4 Auslastung.....	20
3.3.5 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren.....	20
3.4 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung	23
4 Literaturverzeichnis	26
5 Anhang: Internationale Ländercodes	28

Kontakt:

Wolfram Knörr

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Wilckensstr. 3, D-69120 Heidelberg, Germany

Tel. +49-6221-4767-0

e-mail: wolfram.knoerr@ifeu.de - homepage: <http://www.ifeu.org>

1 Einführung

Der Vergleich der Umweltwirkungen, die bei Fahrten mit verschiedenen Verkehrsmitteln entstehen, hat in der öffentlichen und politischen Diskussion einen hohen Stellenwert. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt und publiziert, die sich mit dem Thema beschäftigen.

Im Jahr 1992 wurde von IFEU und der Firma Network eine solche Arbeit im Auftrag der Deutschen Bundesbahn und des WWF durchgeführt und in Form einer Broschüre mit dem Titel „Kilometer-Bilanz“ und einer „Drehscheibe“, auf der die Ergebnisse optisch attraktiv dargestellt waren, weit gestreut [IFEU 1992].

Eine Neuauflage des Umweltvergleichs wurde 1999 im Auftrag der DB AG und des WWF erstellt [DB AG 1999]. Dabei wurde eine Broschüre mit dem Titel „Mobilitäts-Bilanz für Personen und Güter“ herausgegeben und ein Softwaretool mit dem Titel „Reisen und Umwelt in Deutschland“ erstellt, das zunächst auf einer CD verteilt wurde und auf der Fahrplan-CD „Elektronischer Fahrplan Deutschland und Europa“ der DB enthalten war. Mit dem Tool konnten Energieverbrauch und Emissionen, die bei Reisen zwischen 58 Städten in Deutschland mit der Bahn im Vergleich zum Pkw und z.T. zum Flugzeug entstehen, berechnet werden.

Im Jahr 2002 wurde das Tool „Reisen und Umwelt in Deutschland“ aktualisiert [DB AG 2002]. Gleichzeitig erfolgte die Erweiterung der Online-Reiseauskunft der DB AG um den UmweltMobilCheck (UMC). Mit dem UmweltMobilCheck können die Umweltwirkungen beliebiger **Bahnreisen** innerhalb Deutschland mit öffentlichen Verkehrsmitteln, die in der Fahrplanauskunft ausgewählt werden, ermittelt und mit einer **Pkw-Reise** verglichen werden. Die Softwaretechnische Umsetzung des UmweltMobilCheck erfolgt durch die Hacon Ingenieurgesellschaft mbH Hannover.

Ende 2006 erfolgte eine Erweiterung des UmweltMobilChecks um **Flugreisen**. Anfang 2009 wurden schließlich die europäischen Kennzahlen aus dem Tool **EcoPassenger** (www.ecopassenger.org) in den UMC integriert. Der vorliegende Grundlagenbericht beschreibt die im März 2011 aktualisierte Datenbasis.

Weitere Informationen zum UmweltMobilCheck und den Umweltseiten der Bahn befinden sich im Internet: <http://www.umweltmobilcheck.de>.

2 Vergleich von Umweltwirkungen der Verkehrsmittel

2.1 Verursacher und Art der Umweltbelastungen

Personen- und Güterverkehr mit motorisierten Verkehrsmitteln ist mit zahlreichen Umweltbelastungen verbunden. Folgende Aktivitäten stehen dabei im Vordergrund:

- Bau, Betrieb, Unterhalt und Entsorgung der Fahrzeuge,
- Bau, Unterhalt und Entsorgung der Verkehrsinfrastruktur (Verkehrswege, Tunnel, Brücken) und anderer zum Betrieb notwendiger Anlagen (Bahnhöfe, Flugplätze, Verwaltungsgebäude, Tankstellen, Umspannanlagen),
- Exploration, Förderung, Umwandlung und Transport von Primärenergieträgern zur Bereitstellung der Endenergie am Fahrzeug. Im weiteren Sinne gehören hierzu auch die Aufwendungen zur Erstellung, zum Unterhalt und zur Entsorgung der dazu benötigten Anlagen.

Vielfältig sind die Wirkungen, die von diesen Aktivitäten ausgehen. Zu nennen sind insbesondere

- der Verbrauch erschöpflicher und erneuerbarer Energieträger,
- die Entwertung der Landschaft durch Zerschneidung und Umwandlung natürlicher oder naturnaher Flächen in ökologisch weniger wertvolle Flächen (Böschungen, Grünstreifen) sowie pflanzenfreie (z.B. das Schotterbett herkömmlicher Bahnstrecken) oder versiegelte Flächen (Straßen, Bahnstrecken mit fester Fahrbahn),
- die Belastung der Luft mit Emissionen, die Gesundheit, Pflanzen, Gebäude, Gewässer und Klima beeinflussen,
- der Eintrag von flüssigen und festen Stoffen in Boden und Gewässer sowie
- Lärmbelastung.

Im UmweltMobilCheck werden wichtige Umweltkennzahlen wie der Primärenergieverbrauch der Fahrzeuge und ausgewählte Luftschadstoffemissionen betrachtet und quantifiziert (siehe Kapitel 2.3).

2.2 Bezugsgrößen für den Vergleich

Zweck einer jeden Fahrt mit motorisierten Verkehrsmitteln ist die Bewegung von Personen oder Gütern von einem Ort zu einem anderen mit einem akzeptablen Zeit-, Kraft- und Kostenaufwand. Ein Umweltvergleich muss daher primär an der Erfüllung der Transportaufgabe „Bewegung einer Person von A nach B“ gemessen werden. Üblicherweise wird daher die Umweltwirkung betrachtet, die je Person für die zurückgelegte Strecke entsteht. Bei Schadstoffemissionen ist das etwa die Einheit

„Gramm Schadstoff je Person und Reise“

Diese Bezugsgrößen eignen sich für den Vergleich konkreter Reisen auf bestimmten Relationen. Sollen Vor- oder Nachteile von bestimmten Verkehrsmitteln unabhängig

von konkreten Relationen bestimmt werden, wird üblicherweise der Bezug auf die Kapazität des Verkehrsmittels und einen zurückgelegten Kilometer gewählt. Beim Personenverkehr ist dies beispielsweise für Luftschadstoffe die Einheit

„Gramm je Platz und Kilometer (g/Platz-km)“.

Der Bezug von Umweltwirkungen auf die Kapazität und den zurückgelegten Kilometer eignet sich vor allem für Potenzialbetrachtungen, jedoch nicht zur Bewertung bestimmter Transportaufgaben. Denn neben dem technischen Potenzial eines Verkehrsmittels haben vor allem folgende Parameter einen entscheidenden Einfluss auf den Umfang von Umweltwirkungen einer Reise oder eines Transportvorgangs:

- der konkrete Streckenverlauf (Streckenlänge) und die dabei benutzten Verkehrsmittel (einschließlich Zubringer),
- die Auslastung der benutzten Fahrzeuge.

2.3 Welche Aussagen lässt ein Vergleich zu?

Der wichtigste Aspekt, der bei einem Verkehrsmittelvergleich beachtet werden muss, ist der Unterschied zwischen Individualverkehr und öffentlichem Verkehr: Öffentliche Verkehrsmittel fahren innerhalb einer Fahrplanperiode im Gegensatz zum eigenen Pkw regelmäßig und unabhängig davon, ob sie benutzt werden oder nicht. Daher gilt:

Jede individuelle Entscheidung, statt mit dem eigenen Pkw mit einem Öffentlichen Verkehrsmittel zu fahren, vermeidet die gesamten direkten Umweltbelastungen, die durch die Fahrt mit dem Pkw entstehen würden.

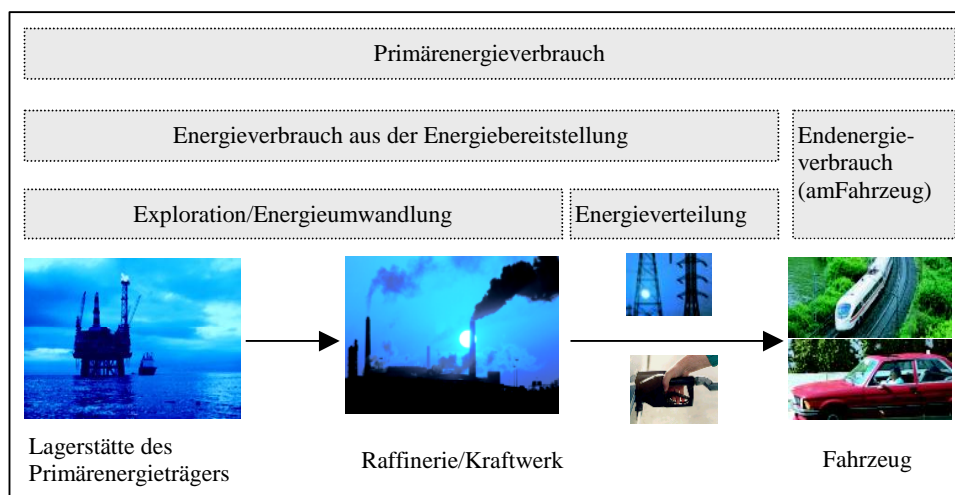
Wenn jedoch das durchschnittliche Emissionsverhalten bei Reisen mit verschiedenen Verkehrsmitteln interessiert oder der Vergleich der individuellen Reise im Pkw gegenüber einer Bahnreise oder die Umweltbilanz für eine typische Reisesituation wie z. B. Montagmorgens im Berufsverkehr, dann ist ein differenzierter Vergleich der Verkehrsmittel sinnvoll. Mit dem **UmweltMobilCheck** lassen sich u.a. folgende Fragen beantworten:

- Wie hoch ist die durchschnittliche Umweltbelastung durch eine Reise mit dem Pkw gegenüber einer Bahnreise bei durchschnittlichen Besetzungsgraden in Deutschland?
- Wie verschiebt sich die Umweltbelastung der Pkw-Reise durch
 - individuell geänderte Besetzungsgrade,
 - die Wahl eines anderen Fahrzeugtyps und einer anderen Größenklasse?
- Wie viel Energie bzw. Emissionen kann man einsparen, wenn man statt mit dem Pkw mit der sowieso verkehrenden Bahn fährt?
- Welchen Einfluss haben die jeweiligen Verkehrsmittel bei einer zusammengesetzten Reisekette im Öffentlichen Verkehr (z.B. Bus, Bahn, Taxi)?

2.4 Welche Umweltwirkungen werden verglichen?

Einen hohen Stellenwert in der Umweltdiskussion haben der **Primärenergieverbrauch** (im UmweltMobilCheck bezeichnet als Energieressourcenverbrauch) und die **Emissionen** zahlreicher **luftgetragener Komponenten**. Da in diesem Bereich in der Vergangenheit zahlreiche Daten gesammelt und Methoden zur Beurteilung der Emissionen entwickelt wurden, können viele relevante Luftschadstoffemissionen der Verkehrsmittel miteinander verglichen werden. Dies gilt insbesondere für die **direkten Emissionen und den Energieverbrauch beim Betrieb der Fahrzeuge** sowie für die bei der Bereitstellung von Kraftstoffen und Strom entstehenden Aufwendungen (**Energiebereitstellung**).

Abb. 1 Aufteilung von Primärenergieverbrauch und Emissionen nach „Fahrzeug“ und „Energiebereitstellung“



Energieverbrauch am Fahrzeug: Der Energieverbrauch bzw. die Emissionen am Fahrzeug entstehen beim Betrieb der Fahrzeuge während der Reise und beziehen sich somit auf die Endenergie Benzin, Dieselkraftstoff oder Strom, die von den Fahrzeugen direkt verbraucht wird. Bildlich ausgedrückt ist das der Kraftstoff im Tank, bzw. der Strom ab dem Stromabnehmer der Lokomotive. Enthalten sind somit auch Nebenverbräuche für Heizung, Klimaanlage, Beleuchtung, Bordrestaurant etc.

Energieverbrauch aus der Exploration/Energieumwandlung: Der Energieverbrauch bzw. die Emissionen aus der Exploration/Energieumwandlung sind die anteiligen Emissionen bzw. energetischen Aufwendungen für die Förderung, den Transport und die Umwandlung der Primärenergieträger (z.B. Rohöl, Steinkohle, Uran) in die Endenergieträger Benzin, Diesel und Strom. Basis der Zuordnung ist die von den Fahrzeugen verbrauchte Endenergie am Fahrzeug.

Energieverbrauch aus der Energieverteilung: Hierunter fallen die Verluste bzw. der Energieaufwand für den Transport der Energie zum Fahrzeug.

Nicht quantifiziert werden im UmweltMobilCheck die Emissionen und energetischen Aufwendungen für die **Herstellung, den Unterhalt und die Entsorgung von Fahrzeugen und Infrastruktur**. Abschätzungen zeigen jedoch, dass deren Beitrag in der

Lebenswegbilanz bei Eisenbahnfahrzeugen deutlich geringer ist als etwa bei Pkws, da sie während der Nutzung deutlich höhere Laufleistungen erreichen. Nicht ganz so günstig ist die Bilanz bei Gegenüberstellung der Aufwendungen für die Infrastruktur.

Beim quantitativen Vergleich von Energieverbrauch und Emissionen der Verkehrsmittel muss insbesondere beachtet werden, dass Relevanz und Wirkung vieler Komponenten von ihrem **Emissionsort** abhängig sind. So sind die direkten Emissionen der Pkw im Innerortsbereich je nach Komponente anders zu bewerten als die außerhalb von Ballungsgebieten über hohe Schornsteine ausgestoßenen Emissionen der Kraftwerke, die zur Bahnstromversorgung eingesetzt werden.

Zu den lokal wirksamen und die Gesundheit der Menschen beeinträchtigenden Komponenten zählen z.B. die Dieselpartikel (als Teil des Feinstaubes), Benzol und - ab bestimmten Konzentrationen - Stickstoffoxide, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid. Bei letzteren treten heutzutage kritische Konzentrationen so gut wie nicht mehr auf.

Stickstoffoxide, Schwefeldioxid und Kohlenwasserstoffe wirken auch in weiteren Entfernungen von ihrem Emissionsort. Stickstoffoxide und Schwefeldioxid tragen überregional zum sauren Regen bei. An der Bildung des Sommersmogs, der wiederum die menschliche Gesundheit und das Pflanzenwachstum schädigen kann, sind die in größeren Regionen emittierten Stickstoffoxide und Kohlenwasserstoffe beteiligt.

Unabhängig vom Emissionsort wirken die klimarelevanten Stoffe, vor allem Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid. Hierbei leisten die Kohlendioxidemissionen mit Abstand den größten Beitrag zum Treibhauseffekt.

Bei den meisten Bahnreisen entstehen die Emissionen überwiegend außerhalb von Ortschaften. Es sind somit vor allem die Stoffe mit überregionaler Wirksamkeit zu berücksichtigen. Bei den Feinstaubemissionen ist hingegen vor allem der Teil der Emissionen wirkungsrelevant, der in bewohnten Gebieten emittiert wird. Da im Rahmen des Umweltvergleichs keine Unterscheidung nach mehr oder weniger dicht besiedelten Gebieten durchgeführt wird, werden im UmweltMobilCheck die gesamten Feinstaubemissionen einer Fahrt ausgegeben.

Eine besondere Klimawirksamkeit geht nach Erkenntnissen des Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC 1999] von den Emissionen des Flugverkehrs oberhalb der Tropopause aus. Die Tropopause befindet sich je nach Jahreszeit und Region in unterschiedlichen Höhen, in der Regel jedoch oberhalb von neun Kilometern. Im UmweltMobilCheck wird diese zusätzliche Klimawirksamkeit bisher nicht berücksichtigt.

Elektrischer Strom für die Bahn wird zum Teil aus Kernenergie gewonnen (siehe Kapitel 4). Damit sind Risiken für Mensch und Umwelt verbunden, die im UmweltMobilCheck nicht berücksichtigt werden.

Weitere Umweltwirkungen wie Lärm, Flächenverbrauch oder Wasserbelastung können aufgrund unzureichender methodischer Ansätze oder der zu unterschiedlichen Wirkungen hier nicht quantitativ verglichen werden.

Im UmweltMobilCheck werden somit folgende Komponenten quantifiziert:

Energieverbrauch (Energieressourcenverbrauch)

Der Energieverbrauch wird als sehr wichtige Vergleichsgröße angesehen, zumal die im Verkehr verbrauchte Energie überwiegend nicht aus regenerativen Energieträgern gewonnen wird.

Der Energieverbrauch wird in der Einheit „Liter Benzinäquivalent je Person und Reise“ angegeben. Hierbei wird die berechnete Primärenergie in MJ (= 1 Million Joule) auf den Energiegehalt von Otto-Kraftstoff umgerechnet:

Energieinhalt von Otto-Kraftstoff:	43,5 MJ/kg
Dichte von Otto-Kraftstoff:	0,74 kg/l

Damit entspricht 1 Liter Benzinäquivalent etwa 32 MJ Energie.

Kohlendioxid und Klimawirksamkeit

Der von Menschen verursachte Treibhauseffekt wird überwiegend durch die Emission von Kohlendioxid (CO₂) verursacht, das bei der Verbrennung organischer Energieträger entsteht. Er gilt in Hinblick auf die Risiken im Zusammenhang mit der Erwärmung der Atmosphäre als sehr problematisch.

Neben Kohlendioxid tragen auch andere Komponenten, vor allem Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O) zum Treibhauseffekt wesentlich bei. Diese werden unter dem Sammelbegriff „Klimawirksamkeit“ entsprechend der Empfehlung von [IPCC 2001] zusammengefasst. Beim Flugverkehr sind auch der Ausstoß von Wasserdampf, der Ozon- und Methanabbau durch Stickstoffoxide sowie der Einfluss von Russpartikeln und von Sulfaten in der oberen Troposphäre klimawirksam.

Schwefeldioxid

Schwefeldioxid verursacht unterschiedliche Schäden bei Mensch und Tier (Atemwegserkrankungen), der Vegetation („Waldsterben“), Boden und Gewässern (Versauerung) und Gebäuden (Säurefraß). In der oberen Troposphäre vermindern Sulfate die Erderwärmung. Die Schwefeldioxidemissionen wurden in Deutschland in der Vergangenheit bei allen Verursachern stark reduziert, so dass die Mengen, die die Verkehrsmittel bzw. die Kraftwerke und Raffinerien in Deutschland emittieren entsprechend gesunken sind. Allerdings entstehen größere Mengen noch beim Seetransport der Primärenergieträger. Dies führt in dem Verkehrsmittelvergleich zu hohen Anteilen der indirekten Emissionen bei allen Verkehrsmitteln.

Abhängig vom Entstehungsort sind die Wirkungen von Schwefeldioxid unterschiedlich zu bewerten. Für die Wirkung auf den Menschen sind vor allem die innerörtlichen Emissionen bedeutsam, für die anderen Wirkungen die überregionalen Emissionen.

Stickstoffoxid

Wie Schwefeldioxid sind Stickstoffoxide für zahlreiche Schädwirkungen bei Mensch und Tier (Atemwegserkrankungen), Boden und Gewässer (Versauerung, Überdüngung) verantwortlich. Neben den Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen gelten Stickstoffoxide als wichtige Vorläufersubstanz des Sommersmogs (bodennahes Ozon).

Abhängig vom Entstehungsort sind die Wirkungen von NO_x unterschiedlich zu bewerten. Für die Wirkung auf den Menschen sind vor allem die innerorts entstehenden

Emissionen bedeutsam, für die anderen Wirkungen wie z.B. die Überdüngung und den Sommersmog auch die überregional verursachten Emissionen. Beim Flugverkehr sind Stickstoffoxide in der oberen Troposphäre am Ozon- und Methanabbau beteiligt.

Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe

Bei den Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMHC) handelt es sich um eine Vielzahl von Komponenten unterschiedlicher Wirksamkeit und Menge. Sie gelten neben den Stickstoffoxiden als Vorläufersubstanz des Sommersmogs (bodennahes Ozon) und sind damit auch relevant, wenn ihr Entstehungsort überwiegend außerhalb von Ballungsräumen bzw. geschlossenen Ortschaften ist.

Andere Substanzen (z.B. Benzol) wirken krebserregend. Da ihre Wirkung vor allem im innerstädtischen Bereich relevant ist, wird sie hier nicht ausgewiesen.

Feinstaub (PM₁₀)

Feinstaub (PM₁₀) ist ein Bestandteil des Schwebstaubs. Als Schwebstaub gelten alle festen und flüssigen Teilchen in der Außenluft, die nicht sofort zu Boden sinken sondern eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verweilen. Schwebstaub oder das atmosphärische Aerosol bezeichnet man in der Wissenschaft international als Particulate Matter (PM). Die Größe der Staubteilchen – der sogenannten Partikel – und ihre chemische Zusammensetzung bestimmen die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Schwebstaubes. Der Durchmesser der Partikel reicht von einigen Nanometern (nm oder Milliardstel Meter) bis zu 100 Mikrometern (µm oder Millionstel Meter).

PM₁₀-Teilchen haben einen Durchmesser von bis zu 10 Mikrometern. Für sie hat die EU in der Richtlinie 1999/30/EG strenge Grenzwerte für die Luftqualität festgelegt.

Problematisch ist Feinstaub vor allem wegen der möglichen gesundheitlichen Schäden. Die Wirkungen reichen von vorübergehenden Beeinträchtigungen der Atemwege (was sich in der Zunahme von Atemwegssymptomen, wie zum Beispiel Husten, und verschlechterten Lungenfunktionsmesswerten zeigt) über einen erhöhten Medikamentenbedarf bei Asthmatikern bis zu vermehrten Krankenhausaufnahmen sowie einer Zunahme der Sterblichkeit wegen Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf-Problemen (Beschreibung Schwebstaub nach [UBA 2005]).

Im UmweltMobilCheck werden die verbrennungsbedingten Feinstaubemissionen der Fahrzeuge (Dieselpartikel) und zusätzlich die Feinstaubemissionen aus der Energiebereitstellung angegeben. Nicht enthalten sind etwa die Emissionen durch Brems-, Reifen-, Schienen- und Oberleitungsabrieb sowie durch Aufwirbelung.

3 Daten und Annahmen zur Energie- und Emissionsberechnung

3.1 Pkw

Für die Fahrt mit dem **Pkw** werden verschiedene Antriebsarten (Otto, Diesel), Größenklassen (Kleinwagen, Untere Mittelklasse, Mittelklasse, Obere Mittelklasse, Oberklasse) und Emissionsstandards (konventionell, Euro 1 bis Euro 5) zur Auswahl angeboten.¹

Energieverbrauch und Emissionen der Pkw sind auf verschiedenen Straßenkategorien unterschiedlich. Daher wird bei der Berechnung in die Straßenkategorien „Innerorts“, „Außerorts“ (ohne Autobahnen) und „Autobahnen“ differenziert.

Die Werte für den Innerortsverkehr enthalten anteilig die Verdunstungsemissionen durch die Tankatmung und das Warm- und Heißabstellen der Fahrzeuge - das sind Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffemissionen bei Otto-Pkw - sowie die zusätzlichen Emissionen im Fahrbetrieb, die durch den Start und die Fahrt mit nicht warmen Motoren entstehen. Fahrten auf Außerortsstraßen und Autobahnen finden fast ausschließlich mit betriebswarmen Motoren statt.

Die hier verwendeten Werte wurden aus dem europäischen Emissionsmodell Copert 4 [LAT 2009] abgeleitet und mit Werten aus TREMOD [IFEU 2010] abgeglichen und ergänzt. Alle Werte für den spezifischen Energieverbrauch und die Emissionsfaktoren werden angegeben in Gramm je Fahrzeugkilometer (g/km). Die Datenbasis ist damit identisch mit dem europäischen Tool Ecopassenger [UIC 2010].

Mit der Unterscheidung nach Fahrzeugtypen und Straßenkategorien wird sowohl das aufgrund der technischen Konzepte als auch das aufgrund des Fahrverhaltens (Fahr-dynamik, gefahrene Höchstgeschwindigkeiten) unterschiedliche Energieverbrauchs- und Emissionsverhalten hinreichend genau abgebildet.

Zu diesen Werten des Endenergieverbrauchs kommt noch der Verbrauch für die Energiebereitstellung (siehe Kapitel 4).

¹ Die Aufnahme von Euro 5-Fahrzeugen und eine Aktualisierung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren auf den Datenstand 2010 wird in Kürze erfolgen

Tab. 1 Durchschnittliche Kraftstoffverbräuche (in Liter/100 km) für Pkw der Stufe Euro 4 nach Größenklassen und Straßenkategorien

Fahrzeugtyp	Größenklasse	Autobahn	Außerorts ohne Autobahn	Innerorts
Otto-Pkw Euro 4	Kleinwagen	6,5	6,0	9,0
	Untere Mittelklasse	7,0	6,5	9,8
	Mittelklasse	7,5	7,1	10,5
	Obere Mittelklasse	8,2	8,0	13,0
	Oberklasse	8,9	9,0	15,5
Diesel-Pkw Euro 4	Kleinwagen	3,8	3,6	5,2
	Untere Mittelklasse	4,7	4,4	6,4
	Mittelklasse	5,5	5,2	7,5
	Obere Mittelklasse	6,6	6,1	8,8
	Oberklasse	7,7	7,0	10,1
Anmerkungen: Energieverbrauch am Fahrzeug Quelle: Copert 4, TREMOD 5.1, eigene Annahmen				

Zur Berücksichtigung der **Auslastung** der Pkw wird angenommen, dass ein Fahrzeug mit maximal 5 Personen besetzt werden kann. Als mittlere Auslastung wird ein Wert von 1,5 Personen je Fahrzeug angenommen. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert, der sich aufgrund der Statistik für den Pkw-Verkehr in Deutschland ergibt [ViZ].

Im UmweltMobilCheck wird für die Auslastung des Pkws die unter den Angaben zur Preisberechnung der Bahntickets ursprünglich eingestellte Reisendenanzahl übernommen. Die Personenzahl ergibt sich aus der Summe der angegebenen Anzahl Erwachsener und Kinder. Alternativ kann unter „Ändern“ der Berechnungsannahmen (Link unterhalb der aufgelisteten Reisemöglichkeiten) die mittlere Auslastung von 1,5 Personen gewählt werden. Im selben Fenster ist auch eine individuelle Einstellung der Fahrzeugklasse und der Motorart möglich. Voreingestellt ist ein Pkw Mittelklasse, Diesel Euro 4.

Die entsprechenden Verbrauchs- und Emissionsfaktoren werden mit den Kilometern (differenziert nach innerorts, außerorts und Autobahn) vom Start- zum Zielort multipliziert. Die Pkw-Entfernung wird durch einen Routenplaner im MobilCheck, der in der Online-Reiseauskunft der Bahn parallel zum UmweltMobilCheck angeboten wird, ermittelt. Der MobilCheck ermöglicht zudem eine Kartendarstellung und eine tabellarische Beschreibung der Pkw-Route. Die angegebene Reisezeit und Kosten für die Pkw-Fahrt werden zum Vergleich mit der Fahrt mit Öffentlichen Verkehrsmitteln dargestellt.

3.2 Bahn und Öffentlicher Personenverkehr

Der UmweltMobilCheck ermöglicht einen Vergleich einer Pkw-Fahrt zu einer Fahrt mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Dies kann auf kurzen Strecken beispielsweise eine Bus- oder U-Bahn-Fahrt, auf längeren Strecken eine Bahnfahrt oder eine aus mehreren Verkehrsmitteln zusammengesetzte Verbindung sein. Ein Beispiel dafür wäre eine Fahrt mit dem Bus als Zubringer zum Bahnhof, danach die Fahrt per Bahn und im Anschluss eine Taxifahrt am Zielort zur Zieladresse.

3.2.1 ÖPNV und Zubringer

Im UmweltMobilCheck lassen sich standardmäßig alle Haltestellen des Öffentlichen Verkehrs als Start- und Zielort auswählen. Für diese Auswahl wird automatisch eine Verbindung ermittelt. Als Verkehrsmittel werden neben der Bahn auch der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV mit Linienbus, Straßen-, Stadt- oder U-Bahn) berücksichtigt. In den erweiterten Optionen besteht zusätzlich die Möglichkeit, beliebige Adressen oder Sehenswürdigkeiten als Start- und Zielort auszuwählen. In diesen Fällen werden zusätzlich Taxi, Pkw oder ein Fuß- oder Fahrradweg zur Haltestelle oder zum Bahnhof berücksichtigt, falls das sinnvoll ist. Bevorzugt werden Fußweg und öffentliche Verkehrsmittel ausgewählt. Pkw oder Taxi wird nur verwendet, wenn die Verbindung mit öffentlichen Verkehrsmitteln sehr ungünstig ist, d.h. Pkw und Taxi deutlich schneller sind bzw. ein Fußweg zu weit ist. Am Wochenende oder in der Nacht, insbesondere in Regionen mit weniger Verkehr wird häufiger Taxi oder Pkw empfohlen. Voreingestellt ist Fußweg als Zubringer zur ersten Haltestelle oder zum Bahnhof. Wird das Taxi, der eigene Pkw oder das Fahrrad als zusätzliche Option gewünscht, muss dies **vor** der Verbindungsanfrage unter „Wegeangaben“ entsprechend eingestellt werden.

Tab. 2 Verkehrsmittel des ÖPNV und Zubringerverkehrs

Verkehrsmittel	Beschreibung
Taxi	Diesel-Pkw (Oberklasse, Euro 4)
Linienbus	mittlerer Linienbus
Straßen-/Stadtbahn	Straßen-, Stadt- oder U-Bahn
Zu Fuß/Fahrrad	nicht motorisiert
Pkw	Selbstfahrer, Typ gemäß Vorgabe

Auslastung

Der Auslastungsgrad des ÖPNV wird einheitlich mit 21% veranschlagt, bei Pkw und Taxi wird die Personenzahl entsprechend der Vorgabe für die reine Pkw-Fahrt übernommen. Beim Taxi wurde zusätzlich eine halbe Leerfahrt pro Fahrt berücksichtigt.

Die Auslastung der Verkehrsmittel wird als prozentualer Anteil der besetzten Plätze an allen Plätzen angegeben. Bei den Öffentlichen Verkehrsmitteln Straßen-, Stadt-, U-Bahn und Bus im Nahverkehr bezieht sich der Wert auf die vorhandenen Sitz- und Stehplätze.

Endenergieverbrauchs- und Emissionsfaktoren des ÖPNV und Zubringerverkehrs

Für die Berechnung des ÖPNV bzw. des Zubringerverkehrs werden Energiekennwerte und Emissionsfaktoren für die Verkehrsmittel „Linienbus“, „Taxi“, „Straßen-, Stadt- und U-Bahnen“, „Otto-Pkw“ und „Diesel-Pkw“ benötigt. Da mit diesen Verkehrsmitteln in der Regel nur ein kleiner Teil der Strecke zurückgelegt wird, werden Durchschnittswerte für die Situation in Deutschland 2010 verwendet. Folgende Werte werden abgeleitet:

Linienbus: *Spezifischer Energieverbrauch* in „Gramm Dieselkraftstoff je Platz-Kilometer (Wert für 2010: 4,7 g/Platz-km)“. Dieser wurde als Mittelwert über alle Linienbusse in Deutschland aus TREMOD abgeleitet. Ebenso wurden die *Emissionsfaktoren* in der Einheit „Gramm je kg Dieselkraftstoff (g/kg)“ bestimmt.

Taxi: *Spezifischer Energieverbrauch* in „Gramm Dieselkraftstoff je Platz-Kilometer (g/Platz-km)“ unter der Annahme, dass im Taxi 4 Plätze zur Verfügung stehen. Basis war der Energieverbrauch eines moderneren Diesel-Pkws der Mittelklasse im Innerortsverkehr. Ebenso wurden die *Emissionsfaktoren* in der Einheit „Gramm je kg Dieselkraftstoff (g/kg)“ bestimmt. Um eventuelle Leerfahrten zu berücksichtigen, wurde zusätzlich ein Aufschlag von 50% auf den Energieverbrauch (und damit auf die Emissionen) vorgenommen. Diese Annahme bedeutet, dass bei jeder zweiten Taxifahrt eine Leerfahrt gleicher Länge erforderlich ist. Insgesamt ergibt sich damit ein Wert von 23 g/Platz-km.

Straßen-, Stadt- und U-Bahnen: *Spezifischer Energieverbrauch* in „Wattstunde Strom je Platz-Kilometer (Wert für 2010: 23 Wh/Platz-km). Dieser wurde als Mittelwert über alle Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland aus TREMOD abgeleitet.

Pkw: *Spezifischer Energieverbrauch* in „Gramm Otto- oder Dieselkraftstoff je Platz-Kilometer (g/Platz-km)“ unter der Annahme, dass im Pkw 5 Plätze zur Verfügung stehen. Es werden dabei die Verbrauchswerte der Pkw (Tab. 1) zugrunde gelegt.

3.2.2 Bahn

Fahrzeuge und Fahrweg

Der Hauptlauf der Bahn kann mit verschiedenen **Zuggattungen** durchgeführt werden. Jede Zuggattung kann wiederum unterschiedlich zusammengesetzt und angetrieben sein. Die Art des Antriebs (Elektromotor oder Dieselmotor) wird als **Betriebsart** bezeichnet.

Da mit höheren Geschwindigkeiten der Energieverbrauch stark ansteigt, wird der ICE-Verkehr zusätzlich in die zwei **Geschwindigkeitsklassen** „<200 km/h“ und „>200 km/h“ unterteilt. Die Möglichkeit, über 200 km/h schnell zu fahren, hängt von der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit ab und damit vom Streckenabschnitt (Teilstrecke).

Weitere Merkmale, wie z.B. die Länge oder das Gewicht des Zuges und die Streckenführung (Kurvigkeit, Steigung/Gefälle, Haltestellenabstände) werden nicht unterschieden. Sie sind in den durchschnittlichen Energieverbräuchen berücksichtigt.

Die einzelnen Parameter werden im UmweltMobilCheck folgendermaßen ermittelt:

- Die **Reiseentfernung** wird aus der Reisedauer und der Luftlinienentfernung zwischen den Haltebahnhöfen unter Berücksichtigung geschwindigkeitsabhängiger Umwegfaktoren berechnet. Die Umwegfaktoren wurden aufgrund bekannter Entfernungen geeicht.
- Die mögliche **Höchstgeschwindigkeit** (<200 km/h, >200 km/h) zwischen zwei Halten wird aus der Reisezeit und der zuvor berechneten Reiseentfernung unter Berücksichtigung der Beschleunigungs- und Bremsphase berechnet.
- Zur Bestimmung der **Betriebsart (Elektrisch/Diesel)** wird auf Informationen über die nicht elektrifizierten Streckenabschnitte zurückgegriffen. Grundsätzlich wird elektrischer Betrieb unterstellt, Dieselbetrieb wird angenommen, wenn der Zuglauf ganz oder teilweise auf nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten stattfindet.

Auslastung

Die **Auslastung** der Züge wird als prozentualer Anteil der besetzten Plätze an allen Plätzen im Zug angegeben (rechnerisch: Personenkilometer pro Platzkilometer). Dabei werden durchschnittliche Auslastungen je Zuggattungen verwendet.

Die Auslastungswerte wurden je Zuggattungen für das Jahr 2009 auf Grundlage des Reisenden-Erfassungs-Systems von der DB AG folgendermaßen angegeben [DB AG 2010]:

ICE	48,6 %
IC/EC	42,1 %
RE/RB/IRE	23,1 %
S-Bahn	29,8 %

Diese Durchschnittswerte wurden für alle Relationen verwendet. Die reale Auslastung einer Zugfahrt kann je nach Tages-/Jahreszeit oder Streckenabschnitt davon abweichen und kann deshalb methodisch nicht abgebildet werden. Neben der durchschnittlichen Auslastung kann auch die maximale Auslastung als Vorgabe für die Berechnung ausgewählt werden.

Endenergieverbrauchs- und Emissionsfaktoren

Die Energie- und Emissionskennzahlen für den Betrieb der Züge werden in der gleichen Systematik wie beim Zubringerverkehr angegeben:

- *Spezifischer Energieverbrauch* in „Gramm Dieselkraftstoff je Platz-km (g/Platz-km)“ bzw. in „Wattstunde Strom je Platz-km (Wh/Platz-km)“. Der zugrundeliegende Strom ist der Bahn-Strom-Mix der DB AG 2010 (siehe Kapitel 3.4).
- *Emissionsfaktoren* für den dieselbetriebenen Schienenverkehr in „Gramm je kg Dieselkraftstoff (g/kg)“. Die zugrunde liegenden Basisdaten stammen aus den DB-Betriebsdaten 2009.

Spezifischer Energieverbrauch

Basis für den spezifischen Energieverbrauch verschiedener Zuggattungen der DB AG sind Messwerte. Ermöglicht wird dies, weil alle elektrischen Triebfahrzeuge mit Strommessgeräten ausgerüstet sind und Dieselverbräuche durch Erfassung der Tankdaten erhoben werden. Neben den Verbräuchen werden gleichzeitig Streckenlänge und Platzangebot erfasst. Der spezifische Energieverbrauch des ICE wurde nach den Geschwindigkeitsklassen „<200 km/h“ und „>200 km/h“ differenziert.

Tab. 3 Spezifische Energieverbräuche nach Betriebsarten, Zuggattungen und Streckenhöchstgeschwindigkeiten der DB

Betriebsart	Zuggattung	Vmax	Wert	Einheit	Quelle
Elektro	ICE	<200 km/h	29	Wh/Platz-km	DB AG 2010
		>200 km/h	34		
	EC/IC	33			
	RE/RB/IRE	31			
	S-Bahn	26			
Diesel	ICE	<200 km/h	7,5	g/Platz-km	
		>200 km/h	8,0		
	EC/IC	7,5			
	RE/RB/IRE	6,5			
	S-Bahn	6,0			

Die spezifischen Verbrauchswerte der übrigen europäischen Länder basieren auf einer Auswertung der UIC-Statistik 2009 [UIC 2009].für Ecopassenger. Für Belgien, Schweiz, Spanien, Finnland, Frankreich, Großbritannien und Schweden konnten die Werte in der gleichen Differenzierung wie für Deutschland abgeleitet werden. Für die übrigen Länder wurden europäische Durchschnittswerte abgeleitet auf Basis der UIC-Statistik. Die folgende Tabelle fasst die verwendeten Durchschnittswerte zusammen.

Tab. 4 Durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch für Personenzüge in Europa

	Elektrisch (Wh/Pkm)			Diesel (g/Pkm)	
	Hochgeschwindigkeit	Intercity	Regional/S-Bahn	Intercity	Regional/S-Bahn
Verkehrsleistung	70	77	110	17	25
	Elektrisch (Wh/Platz-km)			Diesel (g/Platz-km)	
	Highspeed	Intercity	Regional/S-Bahn	Intercity	Regional/S-Bahn
Betriebsleistung	32	30	35	7.3	8.3
Quelle: Auswertung der UIC Länderstatistik 2009					

Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für den dieselbetriebenen Schienenverkehr wurden von der DB AG im Rahmen der Abstimmungen für das TREMOD-Modell für das Jahr 2009 ermittelt. Sie sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tab. 5 Emissionsfaktoren für die Dieseltraktion der DB 2009 (in g/kg)

Zuggattung	CO ₂	NO _x	SO ₂	NMHC	Partikel*
ICE	3.012	30,7	0,02	1,0	0,6
EC/IC	3.012	55,4	0,02	2,2	0,5
RE/RB/IRE	3.012	41,8	0,02	1,3	0,6
S-Bahn	3.012	46,7	0,02	2,4	0,9
Anmerkungen: Partikel im UMC bezeichnet als Feinstaub Fahrzeug (=direkte verbrennungsbedingte Fahrzeugemissionen) Quelle: DB AG 2010 (NO _x , SO ₂ , NMHC, Partikel)					

Die europäischen Emissionsfaktoren wurden direkt aus Ecopassenger übernommen. Sie basieren auf einem europäischen Forschungsprojekt zu diesen Thema und sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 6 Emission factors for diesel engines (in g/kg)

	CO ₂	NO _x	SO ₂	NMVOC	PM*
Rail Diesel Projekt					
Triebwagen		40.0			1.0
Lokomotivem		64.7			1.15
Defaultwert / Quelle	<i>UIC Indikator</i>	<i>Durchschnitt Rail Diesel</i>	<i>S-Gehalt 10ppm</i>	<i>UMC 2007</i>	<i>Durchschnitt Rail Diesel</i>
Personenzug	3,175	52.3	0.02	2.6	1.1
Anmerkung: *verbrennungsbedingte PM Quelle: Rail Diesel Projekt [UIC 2005]; UmweltMobilCheck [IFEU 2008]					

3.3 Flugverkehr

Der UmweltMobilCheck stellt Informationen zu den Umweltwirkungen von Flugreisen innerhalb Deutschlands zur Verfügung. Dazu wird die kürzeste Flugverbindung zwischen Start- und Zielort abgeschätzt. Die Gesamtdistanz dieser Flugverbindung setzt sich zusammen aus den Entfernungen für die Fahrt vom Startort zum Flughafen bzw. vom Zielflughafen zum Zielort und der Luftlinienentfernung zwischen den für die Start- und Zielort in Frage kommenden Flughäfen. Jede so bestimmte Flugverbindung wird auf Plausibilität geprüft, d. h. sie wird nur dann für die Emissionsberechnung in Betracht gezogen, wenn die mit der Benutzung der Flugverbindung verbundenen Umwege (in Summe mit der eigentlichen Flugdistanz) ein bestimmtes Verhältnis zur Luftlinienentfernung zwischen Start- und Zielort nicht überschreiten (Umwegfaktor). Erfüllt sie diese Bedingung nicht, wird sie verworfen und die nächst kürzere untersucht. Möglicherweise werden dabei alle in Frage kommenden Flugverbindungen als nicht plausibel eingestuft, so dass keine Ergebnisse für den Flugverkehr angezeigt werden.

Damit wird bspw. eine Flugverbindung für den Fall als nicht plausibel eingestuft, bei der Start- und Zielort auf einer Ellipse zwischen Frankfurt und Hannover liegen und vom Startort aus erst zum Flughafen Frankfurt (also vom Zielort weg) gefahren werden muss um dort in das Flugzeug nach Hannover zu steigen, um von dort wiederum in Richtung Frankfurt zum Zielort zu fahren. So erhält man keine sinnvolle Flugverbindung zwischen Hannover und Göttingen, weil der damit verbundene Umweg über Frankfurt das Verhältnis zwischen Gesamtdistanz und Luftlinienentfernung zwischen Hannover und Göttingen mehr als verdoppelt. Zwischen Fulda und Hannover wird eine bereitgestellt, weil hier der „Umwegfaktor“ einen akzeptierten Wert erreicht.

Insgesamt sind 35 innerdeutsche Flughäfen enthalten. Als Zu-/Abbringer zum Flughafen können Pkw oder Bahn ausgewählt werden.

Die Flugverbindungen werden unabhängig von konkreten Fahrplandaten berechnet. Die angegebenen Reisezeiten errechnen sich aus Durchschnittsangaben zu den Flugzeiten zwischen den Flughäfen und durchschnittlichen Reisezeiten für die Zubringer. Zusätzlich werden für den Übergang an den Flughäfen insgesamt 75 Minuten berücksichtigt.

Der nationale und internationale gewerbliche Flugverkehr wird heutzutage fast ausschließlich mit Verkehrsflugzeugen durchgeführt, die mit Flugzeugturbinen angetrieben werden und Kerosin als Kraftstoff benutzen. Mit der Verbrennung von Kerosin entstehen, wie bei anderen Verbrennungsprozessen in Fahrzeugen auch, eine Reihe von Emissionen. Das sind insbesondere die Komponenten, die auch bei den übrigen Verkehrsmitteln im Rahmen des UmweltMobilChecks betrachtet werden, also Kohlendioxid, Stickstoffdioxid, Kohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid und Feinstaub.

Im Bereich der unteren Atmosphäre sind die Emissionen dieser Komponenten in ihrer Wirksamkeit mehr oder weniger vergleichbar (siehe Kap. 2.4) und werden daher bei einem Umweltvergleich der Verkehrsmittel direkt einander gegenüber gestellt.²

² Die besondere Klimawirksamkeit des Flugverkehrs wird z. B. im Emissionsrechner ATMOSFAIR [ATMOSFAIR 2008] bei Fernflügen berücksichtigt

3.3.1 Flugzyklen

Bei der Berechnung der Emissionen von konkreten Flügen muss neben dem genutzten Flugzeugtyp und der Auslastung des Fluges auch die Flugweite und die Flughöhe und somit die typischen Flugzyklen berücksichtigt werden.

Ein Flug wird in verschiedene Flugphasen unterteilt:

- Taxi (Rollverkehr)
- Start und Steigflug
- Reiseflug
- Sinkflug inklusive Landeanflug

Die entsprechenden Zyklen wurden aus der umfangreichen Untersuchung des Umweltbundesamtes [UBA 1999] übernommen. Die Länge der Zyklen ist abhängig von der gesamten Flugentfernung, da auf kürzeren Strecken eine geringere Reiseflughöhe erreicht wird. Die Studie enthält Zyklen für 250 km, 500 km, 750 km sowie 1000 und mehr km. Für den Inlandsflugverkehr sind die Entfernungsstufen bis 600 km von Interesse und damit die Flugprofile für 250 km, 500 km und 750 km. Zur besseren Berücksichtigung verschiedener Entfernungsstufen wurden von uns aus diesen Profilen zusätzlich Zyklen für 125 km, 375 km und 625 km abgeleitet.

Für die konkreten Flugreisen wurden die Zyklen ausgewählt, die der Flugentfernung am nächsten kommen. Die Anpassung des Flugzyklus an die Flugentfernung einer Verbindung erfolgt durch Variation der Reisefluglänge. In folgender Tabelle sind die Zyklen sowie die den Zyklen zugeordneten Fluglängen dargestellt.

Tab. 7 Flugzyklen für verschiedene Entfernungsstufen

Entfernungsstufe (km)	Fluglänge (km) von –bis	Länge Steigflug (km)	Länge Reiseflug* (km)	Länge Sinkflug (km)	Flughöhe (m)
125	0 – 187	27	35	62	3.000
250	188 – 312	69	53	128	4.615
375	313 – 437	101	111	163	6.050
500	438 – 562	132	170	197	7.484
625	563 – 687	163	247	215	9.050
750	688 – 875	207	276	267	9.430
1000	876-1.100	210	523	267	10.670
>1000	>1.100	212	>620	268	10.670

Anmerkungen: *Länge Reiseflug im Standardzyklus, ansonsten berechnet aus Fluglänge abzüglich Steigflug und Sinkflug; Zyklen 250, 500, 750 und 1000 nach UBA 1999; Zyklen 125, 375, 625 IFEU-Annahme
Quelle: UBA 1999, IFEU-Annahmen

3.3.2 Flugentfernungen

Grundlage für die Berechnung der kürzesten Flugverbindung zwischen einem Start- und einem Zielort sind die Großkreisentfernungen zwischen den Flughäfen. Diese berechnen sich aus der Luftlinie zwischen den Flughäfen unter Berücksichtigung der Erdkrümmung. Folgende Tabelle zeigt beispielhaft die Großkreisentfernungen zwischen acht großen deutschen Flughäfen.

Tab. 8 Großkreisentfernungen zwischen den großen Verkehrsflughäfen in Deutschland (in km)

	Bonn/ Köln	Düsseldorf	Frankfurt	Hamburg	Hannover	Leipzig	München	Stuttgart
Berlin/Tegel	464	470	430	-	262	146	479	518
Bonn/Köln		-	138	364	250	361	438	286
Düsseldorf			187	342	240	379	485	336
Frankfurt				410	279	299	300	158
Hamburg					-	288	600	552
Hannover						208	480	421
Leipzig							343	372
München								194

Quelle: berechnet mit Great Circle Mapper (gc.kls2.com)

Die reine Flugdistanz kann bei einem Flug verlängert werden durch **Umwege** und **Warteschleifen**. Zur Größenordnung der Länge von Umwegen und Warteschleifen lagen folgende Angaben vor:

- In der Atmosfair-Dokumentation [ATMOSFAIR 2008] werden Umwegfaktoren in Abhängigkeit der Großkreisentfernung nach einer persönlichen Mitteilung des DLR zitiert. Der absolute Umweg ergibt sich daraus für alle Distanzen zu etwa 50 km.
- Die Lufthansa gibt für das Jahr 2004 einen Gesamtverbrauch von 39.300 Tonnen Kerosin an, der in Warteschleifen verbraucht wurde [Lufthansa 2005]. Ordnet man davon 80% dem Passagierverkehr zu, entspricht dies einem Verbrauch von 0,75 kg je Passagier. Atmosfair verwendet, basierend auf den Angaben der Lufthansa von 2001, einen Wert von 1 kg/Passagier.

Der Einfluss des Windes braucht aufgrund der überwiegend paarigen Verkehre nicht berücksichtigt werden.

Um mögliche Umwege und Warteschleifen zu berücksichtigen, wird im UmweltMobil-Check zusätzlich zur Großkreisentfernung pauschal angenommen, dass je Flug zusätzlich 50 km zurückgelegt werden, die entsprechende Mehremissionen verursachen bzw. zusätzliche Energie verbrauchen. Dies entspricht einem Mehrverbrauch pro Flug und Passagier von gut 2 kg Kerosin.

3.3.3 Flugzeugtypen

Zur Emissionsberechnung der Flugreisen müssen die verwendeten Flugzeugtypen bekannt sein. Ist dies nicht der Fall, muss ein realistischer Typenmix als Vorgabe definiert sein, der statt eines konkreten Typs für die Berechnung verwendet wird. Im europäischen Kurz- und Mittelstreckenverkehr werden überwiegend Maschinen der Typen, A319, A 320, A321 und B737 eingesetzt.

Nach der Emissionsdatenbank des DLR [DLR 2000] weisen die Flugzeuge der B737-Familie ein ähnliches Emissionsverhalten auf. Die Typen A319 und A321 sind nicht in der Emissionsdatenbank enthalten, gehören jedoch zur A320-Familie und verwenden

die gleichen Triebwerke wie der A320. Es wird daher vereinfacht angenommen, dass diese Maschinen ein ähnliches Emissionsverhalten wie der A320 aufweisen. Daher werden die Verbrauchs- Emissionsfaktoren eines Durchschnittsflugzeugs im Inlandsverkehr als Mittelwert der drei Typen A 320, B 737-300 und B 737-500 berechnet.

3.3.4 Auslastung

Zur Umlegung der berechneten Energieverbräuche und Emissionen auf die einzelnen Reisenden wird einheitlich eine Auslastung der Sitzplätze von 72% unterstellt. Basis sind Werte von Eurostat und dem Statistischen Bundesamt: Die Auslastung von Passagierflügen in der EU variieren von 63% bis 80% für die zehn größten Flughäfen(2005) [EUROSTAT 2007]. Das Statistische Bundesamt weist ähnliche Werte aus. [StatBA 6].

Außerdem ist der Transport von Beifracht zu beachten, da die entsprechenden Aufwendungen dem Gütertransport zuzuordnen sind. Nach Angaben des statistischen Bundesamtes ist der Anteil des Güterverkehrs im Inlandsflugverkehr gering (2007: 0,045 Mrd. tkm, nach [StatBA 6]). Legt man den gesamten Energieverbrauch nach dem in TREMOD angewandten Verfahren auf den Personen- und Güterverkehr um [IFEU 2010], entfällt 2007 rund 4% des Energieverbrauchs des Inlandsflugverkehrs auf den Gütertransport. Der Anteil der Beifracht in Passagierflugzeugen wird nicht angegeben, ist aber aufgrund des geringen Anteils des gesamten Güterverkehrs sicher gering. Es wird daher kein Abzug für den möglichen Anteil der Beifracht am Energieverbrauch berücksichtigt.

3.3.5 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren

Der spezifische Energieverbrauch und die Emissionsfaktoren wurden der Untersuchung des TÜV Rheinland entnommen [UBA 1999]. Die Emissionsmodellierung wurde in der genannten Arbeit von der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt. Dabei wurden Emissionsfaktoren und Verbrauchswerte für unterschiedliche Flugzeugtypen für die verschiedenen Flugzyklen unter Annahme bestimmter Nutzlasten ermittelt.

Für die Ableitung der Emissionsfaktoren im UmweltMobilCheck werden als Basis die Werte der drei am häufigsten von der Deutschen Lufthansa im Inlandsflugverkehr eingesetzten Flugzeugtypen: A320-200 und B 737-300 und B 737-500 verwendet.

Die Beschränkung auf wenige Typen für die Mittelwertbildung erscheint uns vertretbar, da die Unterschiede im spezifischen Energieverbrauch und den Emissionen der einzelnen Typen zwar vorhanden, aber im Mittel nicht so groß sind. Weitaus größeren Einfluss haben die Annahmen zur Auslastung und zum Flugzyklus.

Die folgende Tabelle stellt eine Auswahl der angenommenen spezifischen Energieverbräuche dar.

Tab. 9 Spezifische Energieverbräuche (in g/Platz-km) verschiedener Flugzeugtypen und Mittelwert der drei Typen

Entfernungsstufe (km)	Flug phase	A320	B737-300	B737-500	Mittelwert
250	Start	60	73	86	73
	Reiseflug	23	29	35	29
	Landung	13	18	23	18
	Mittel	29	35	43	35
500	Start	50	58	69	59
	Reiseflug	20	25	31	25
	Landung	14	17	20	17
	Mittel	25	30	37	31
750	Start	42	48	58	49
	Reiseflug	18	22	27	22
	Landung	11	16	20	15
	Mittel	22	27	33	27
1000	Start	42	50	60	51
	Reiseflug	16	20	25	21
	Landung	9	13	16	13
	Mittel	20	24	30	25
No of seats		150	128	103	127

Source: DLR 2000, LH 2005 (Anzahl Plätze), IFEU-Annahmen

Nicht enthalten sind in den vorangegangenen Daten die Rollverkehre (Taxi-Out, Taxi-In) auf dem Boden. Hierfür schätzen wir aus internen Unterlagen der Lufthansa für alle Maschinentypen einen zusätzlichen Energieverbrauch von 1 kg Kerosin je Platz und Start-/Landezyklus ab. Die Emissionsfaktoren für den Rollverkehr wurden ebenfalls aus internen Unterlagen der Lufthansa entnommen [LH 1993].

Zur Berechnung der **Schwefeldioxidemissionen** wurde ein Schwefelgehalt im Kerosin von 30 ppm für den Inlandsverkehr angenommen [LH 2005].

Die **Kohlendioxidemissionen** wurden mit einem Wert von 3.150 g/kg Kerosin abgeleitet. Das **Treibhauspotenzial** (in CO₂-Äquivalenten) berücksichtigt zusätzlich die Klimawirksamkeit von Methan und Lachgas. Es ergibt sich für 2007 ein Wert von 3.200 g/kg. Dieser Wert ist nur unwesentlich höher als der reine CO₂-Faktor, was an den sehr geringen Methan- und Lachgasemissionen im Flugzeugabgas liegt.

Für die **Partikelemissionen** liegen uns keine aktuellen Werte vor. Es wird daher der Emissionsfaktor TREMOD (0,04 g/kg) für alle Flugphasen übernommen [IFEU 2010].

Das **Benzinäquivalent** berechnet sich mit dem Faktor 1,32 l Benzin/kg Kerosin aus dem Energiegehalt von Kerosin (42,7 MJ/kg), von Benzin (43,5 MJ/kg) und der Dichte von Benzin (0,74 kg/l).

Die folgende Tabelle fasst die mittleren Emissionsfaktoren je Entfernungsstufe zusammen.

Tab. 10 Mittlere Emissionsfaktoren (in g/kg) für den Verkehrsflug nach Entfernungsstufen

Entfernungs- klasse	FC	CO ₂	NO _x	SO ₂	NMVOG	PM
	g/Platz-km	kg/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
125 km	40.9	3.150	12.8	0.06	0.52	0.04
250 km	35.4	3.150	11.5	0.06	0.34	0.04
375 km	33.2	3.150	11.5	0.06	0.25	0.04
500 km	30.9	3.150	11.6	0.06	0.15	0.04
625 km	28.3	3.150	11.4	0.06	0.18	0.04
750 km	27.2	3.150	11.2	0.06	0.21	0.04
1000 km	24.8	3.150	10.7	0.06	0.24	0.04
>1000 km	23.9	3.150	9.4	0.06	0.09	0.04
Taxi (g/Seat)	1,000.0	3.150	4.1	0.06	1.7	0.04
Quelle: DLR 2000, LH ^o 1993, LH ^o 2005						

3.4 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung

Bei Otto- und Dieselmotoren werden die Emissionsfaktoren für die Energiebereitstellungskette der Kraftstoffe ab Förderung des Rohöls bis zur Betankung der Fahrzeuge, einschließlich der Verdunstungsemissionen bei Umfüllvorgängen und der Transporte der Energieträger mit Fahrzeugen berücksichtigt. Dabei werden durchschnittliche europäische Kennzahlen aus der Datenbank Ecoinvent [Ecoinvent 2009] zugrunde gelegt.

Tab. 11 Umwandlungseffizienz und Emissionsfaktoren der Energiebereitstellungskette für Kraftstoffe

	Effizienz*	CO ₂	NO _x	SO ₂	NM VOC	PM
		kg	g	g	g	g
Benzin	75%	0.67	2.1	5.8	2.1	0.29
Diesel	78%	0.47	1.8	4.4	1.5	0.23
Kerosin	79%	0.45	1.8	4.3	1.5	0.23
LPG	83%	0.55	1.8	4.9	1.5	0.24
Marine Diesel Oil	79%	0.40	1.7	4.0	1.5	0.21

Efficiency: Relation final energy/primary energy ; emission factors related to final energy (kg fuel)
Source. Ecoinvent 2009

Die Energiebereitstellungskette enthält die anteiligen Aufwendungen ab der Förderung von Kohle, Uran etc. bis zum Stromabnehmer der Fahrzeuge einschließlich Transport der Primärenergieträger bis Kraftwerk und den Umform- und Leitungsverlusten. Zur Bestimmung der mittleren Emissionsfaktoren wird die Stromerzeugung im Jahresdurchschnitt zugrunde gelegt. Die folgende Tabelle enthält den Strommix für alle europäischen Länder. Für Deutschland wird der aktuelle Bahnstrommix des Jahres 2009 angesetzt [DB AG 2010], alle anderen Kennzahlen wurden für die aktuelle Version von Ecopassenger abgeleitet. Für viele Länder konnte ebenfalls der Bahnstrommix aus der UIC-Statistik [UIC 2009] verwendet werden, für alle anderen Länder wurde der öffentliche Strommix zugrunde gelegt.

Tab. 12 Anteil der Primärenergieträger an der Stromerzeugung für den Bahnstrommix

Land	Quelle	Kohle	Öl	Gas	Kernkraft	Erneuerbare	Andere
AT	UIC 2009	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	89,65%	10,35%
BE	UIC 2009	13,63%	0,00%	16,56%	57,95%	2,11%	9,74%
BG	UIC 2009	56,73%	0,99%	3,91%	29,15%	9,22%	0,00%
CH	UIC 2009	0,00%	0,00%	0,00%	26,47%	73,53%	0,00%
CZ	UIC 2009	57,31%	0,00%	0,00%	40,65%	2,04%	0,00%
DE	DB AG 2010	45,19%	0,00%	9,14%	25,22%	18,49%	1,95%
DK	UIC 2009	49,42%	2,69%	17,47%	0,00%	26,24%	4,18%
ES	UIC 2009	25,07%	0,78%	24,73%	19,50%	29,91%	0,00%
FI	UIC 2009	0,00%	0,00%	0,00%	26,35%	33,86%	39,79%
FR	UIC 2009	4,02%	1,76%	3,27%	85,65%	4,91%	0,39%
GR	Eurostat 2009	53,76%	14,95%	22,28%	0,00%	9,01%	0,00%
HR	UIC 2009	10,47%	21,81%	0,00%	31,60%	36,12%	0,00%
HU	UIC 2009	17,97%	1,46%	38,72%	36,52%	4,64%	0,68%
IE	Eurostat 2009	26,33%	6,81%	55,37%	0,00%	11,50%	0,00%
IT	UIC 2009	28,10%	7,21%	35,17%	0,00%	29,50%	0,03%
LU	Eurostat 2009	0,00%	0,00%	71,91%	0,00%	28,09%	0,00%
ME	IEA 2007	67,23%	0,87%	0,19%	0,00%	31,57%	0,13%
NL	UIC 2009	23,31%	0,00%	51,79%	9,11%	9,76%	6,02%
NO	UIC 2009	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%
PL	UIC 2009	93,70%	0,00%	1,91%	0,00%	0,00%	4,40%
PT	Eurostat 2009	25,33%	9,95%	27,98%	0,00%	36,74%	0,00%
RO	UIC 2009	40,52%	1,08%	17,66%	12,97%	26,92%	0,86%
RS	IEA 2007	67,23%	0,87%	0,19%	0,00%	31,57%	0,13%
SE	UIC 2009	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%
SI	UIC 2009	48,17%	0,98%	6,15%	30,05%	13,66%	0,98%
SK	UIC 2009	26,02%	0,00%	4,44%	57,78%	11,77%	0,00%
UK	UIC 2009	33,09%	0,97%	43,66%	14,87%	5,95%	1,46%

*außer Serbien und Montenegro (Bezugsjahr 2006)
UIC 2009: Bahnmix, DB AG 2010: Bahnmix Deutschland 2009, andere Länder: nationaler Mix

Insgesamt ergeben sich daraus für die betrachteten Endenergien folgende Emissionsfaktoren:

Tab. 13 Umwandlungseffizienz und Emissionsfaktoren (in g/kWh Endenergie) für die Bereitstellung von Elektrizität

Land	Anteil KWK**	Effizienz	CO2	NO _x	SO2	NM VOC	PM10
	%	%	kg/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
AT	27%	78%	0,112	0,094	0,079	0,007	0,024
BE	8%	26%	0,371	0,749	1,296	0,054	0,102
BG	8%	30%	0,588	1,295	1,896	0,071	0,140
CH	1%	54%	0,005	0,019	0,012	0,004	0,012
CZ	23%	32%	0,612	0,970	1,155	0,018	0,054
DE	-	32%	0,595	0,549	0,619	0,038	0,031
DK	77%	70%	0,302	0,340	0,639	0,042	0,036
ES	12%	39%	0,386	1,243	1,977	0,064	0,159
FI	38%	36%	0,452	0,510	1,805	0,024	0,137
FR	4%	27%	0,069	0,211	0,296	0,023	0,024
GR	11%	23%	0,961	1,120	4,346	0,136	0,606
HR	10%	34%	0,336	0,834	2,847	0,112	0,121
HU	22%	25%	0,552	0,701	0,767	0,243	0,046
IE	2%	30%	0,730	1,153	2,368	0,217	0,118
IT	31%	46%	0,464	1,093	1,542	0,160	0,100
LU	10%	26%	0,678	0,786	0,250	0,306	0,024
ME	0%	31%	0,918	1,096	5,247	0,029	0,416
NL	58%	45%	0,422	0,600	0,494	0,059	0,042
NO	1%	70%	0,006	0,018	0,008	0,003	0,013
PL	22%	29%	0,980	1,685	4,570	0,048	0,291
PT	14%	40%	0,509	1,403	2,999	0,157	0,101
RO	22%	39%	0,503	0,613	2,412	0,055	0,192
RS	0%	27%	1,001	1,768	11,834	0,031	1,912
SE	7%	91%	0,004	0,014	0,006	0,003	0,016
SI	3%	31%	0,669	1,589	11,007	0,040	0,293
SK	18%	30%	0,233	0,465	1,553	0,035	0,395
UK	8%	34%	0,576	1,026	1,306	0,074	0,096

* einschließlich Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), außer Deutschland
 ** Anteil der Stromerzeugung in kombinierten KWK-Kraftwerken an allen thermischen (Kohle, Gas oder Öl) Kraftwerken im Jahr 2005
 Quelle: Eurelectric 2007

4 Literaturverzeichnis

- ATMOSFAIR 2008** Atmosfair – Der Emissionsrechner; Dokumentation der Grundlagen des Emissionsrechners:
http://www.atmosfair.de/fileadmin/user_upload/image4/PDF_Dokumentation_deutsch.pdf
- DB AG 1999** Mobilitäts-Bilanz für Personen und Güter – Die Verkehrssysteme Deutschlands im Vergleich; eine Initiative von WWF und DB; Berlin/Frankfurt am Main 1999
- DB AG 2002** Reisen und Umwelt in Deutschland; Softwaretool entwickelt von IFEU Heidelberg im Auftrag der Deutschen Bahn AG und des WWF; Aktualisierung; Berlin/Frankfurt/M. 2002
- DB AG 2010** Auswertungen des Bahn-Umwelt-Zentrums der aktuellen Verkehrsleistungs-, Energie- und Umweltkennzahlen der DB AG (Bezugsjahr 2009); Interne Unterlagen; Berlin, April 2010
- DLR 2000:** Datenbank Emissionsfaktoren für Zivilflugzeuge, erstellt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für die Studie „Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs“, F + E – Vorhaben 105 06 085, im Auftrag des Umweltbundesamtes
- Ecoinvent 2009** ecoinvent Centre (2009): ecoinvent data v2.1. Final reports ecoinvent data v2.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009, www.ecoinvent.org
- Eurelectric°2007°** Union of the electricity industry: EURPROG 2007 – Statistics and prospects for the European electricity sector, Bruxelles, December 2007, www.eurelectric.org
- EUROSTAT 2007** Eurostat: Air transport in Europe in 2005; Statistics in Focus, Transport 8/2007; Catalogue number: KS-SF-07-008-EN-N; 2007
- IFEU 1992** Funk, G., Network, Knörr, W. et al. (IFEU): Kilometer-Bilanz Personenverkehr; im Auftrag des WWF und der DB; 1992
- IFEU 2008** UmweltMobilCheck – Grundlagenbericht; im Auftrag der DB AG; Heidelberg, Juni 2008
- IFEU 2010** Knörr, W. et al. (IFEU): Daten- und Rechenmodell, Energieverbrauch und Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 bis 2030; sowie TREMOD (Transport Emission Model), Version 5.1 März 2010; im Auftrag des Umweltbundesamtes; Dessau 2010
- IPCC 1999** Aviation and the Global Atmosphere; Bericht vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); 1999; unter www.grida.no/climate/ipcc/aviation/index.htm
- LAT 2009** Samaras, Z. et al., Aristotle University of Thessaloniki - Lab of Applied Thermodynamics: COPERT 4 (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport); Version 6.1; commissioned by the European Environment Agency (AAE); Thessaloniki 2009
- LH 1993** Interne Unterlagen zu Energieverbrauch und Emissionen der Lufthansa-Flotte 1993
- LH 2005** Balance: Daten und Fakten, Berichtsjahr 2004 Herausgeber: Deutsche Lufthansa AG, Frankfurt am Main, Juni 2005
- StatBA 6** Statistisches Bundesamt, Fachserie 8, Reihe 6: Luftverkehr
- UBA 1999** TÜV Rheinland, Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt (DLR), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie: Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs; im Auftrag des Umweltbundesamtes; F+E-Vorhaben 105 06 085; Köln, Dezember 1999
- UBA 2005** Umweltbundesamt: Hintergrundpapier zum Thema Staub/Feinstaub (PM); Berlin, März 2005; <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/feinstaub.pdf>
- UIC 2005** UIC/CER: Rail Diesel Study (EU funded) - WP1: Status and future development of the diesel fleet; Final Report; 21.07.2005

UIC 2009 UIC Energiedatenbank, aktualisierte Energiestatistiken; 2009

UIC 2010 Ecopassenger; im Auftrag des Internationalen Eisenbahnverbandes (UIC). Tool und Grundlagenbericht auf www.ecopassenger.org

ViZ BMVBW (Hrsg.): Verkehr in Zahlen; bearbeitet von DIW; Erscheinungsweise jährlich; Bonn/Berlin

5 Anhang: Internationale Ländercodes

AT	Österreich
BE	Belgien
BG	Bulgarien
CH	Schweiz
CZ	Tschechische Republik
DE	Deutschland
DK	Dänemark
ES	Spanien
FI	Finnland
FR	Frankreich
GR	Griechenland
HR	Kroatien
HU	Ungarn
IE	Irland
IT	Italien
LU	Luxemburg
ME	Montenegro
NL	Niederlande
NO	Norwegen
PL	Polen
PT	Portugal
RO	Romania
RS	Serbien
SE	Schweden
SI	Slovenien
SK	Slovakei
UK	Großbritannien