



Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten **Kostensätze**

Stand 02/2019

Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten

Kostensätze

Stand 02/2019

von

Dr. Astrid Matthey

Umweltbundesamt, Dessau Roßlau

Dr. Björn Bünger

Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

auf Grundlage der Ergebnisse des Forschungsprojekts
„Methodenkonvention 3.0 - Weiterentwicklung und
Erweiterung der Methodenkonvention zur Schätzung von
Umweltkosten“

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Tel: +49 340-2103-0

Fax: +49 340-2103-2285

info@umweltbundesamt.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Abschlussdatum: September 2018 (korrigierte Version vom 11.02.2019)

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2019

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	6
Vorbemerkung.....	8
1 Bewertung von Klimafolgeschäden: Kostensatz für Kohlendioxid- und andere Treibhausgasemissionen	9
2 Kostensätze für Luftschadstoffe.....	12
2.1 Durchschnittliche Kostensätze für Luftschadstoffemissionen.....	12
2.2 Differenzierte Kostensätze für Luftschadstoffemissionen aus unterschiedlichen Quellen..	13
2.3 Kostensätze für Luftschadstoffe aus dem Straßenverkehr	16
3 Umweltkosten der Strom- und Wärmeerzeugung.....	17
3.1 Umweltkosten der Stromerzeugung.....	17
3.2 Umweltkosten der Wärmeerzeugung.....	18
4 Umweltkosten des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland.....	20
4.1 Annahmen zur Emissionsberechnung.....	20
4.2 Kostensätze für Schäden durch Flächenverbrauch und Zerschneidung.....	21
4.3 Kostensätze für Lärm	22
4.4 Kostensätze für verkehrsbezogene Aktivitäten	27
5 Quellenverzeichnis	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	UBA-Empfehlung zu den Klimakosten in € ₂₀₁₆ / t CO ₂ äq	9
Tabelle 2:	Durchschnittliche Umweltkosten der Luftverschmutzung durch Emissionen aus unbekannter Quelle (in € ₂₀₁₆ / t Emission).....	13
Tabelle 3:	Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen aus Kleinf Feuerungsanlagen und Verbrennungsprozessen in der Industrie (in € ₂₀₁₆ / t Emission)	15
Tabelle 4:	Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen im Verkehr (in € ₂₀₁₆ / t Emission).....	16
Tabelle 5:	Umweltkosten der Stromerzeugung in Deutschland einschließlich Vorketten in €-Cent ₂₀₁₆ / kWh _{el}	18
Tabelle 6:	Umweltkosten der Wärmeerzeugung der Haushalte in Deutschland in €-Cent ₂₀₁₆ / kWh _{Endenergie}	19
Tabelle 7:	Verteilung der Fahrleistung im Straßenverkehr (innerorts, außerorts, Autobahn) nach Fahrzeugkategorie	20
Tabelle 8:	Angaben zu Umweltkosten des Straßenverkehrs durch Flächenverbrauch und Zerschneidung, in €-Cent ₂₀₁₆ pro Fahrzeugkilometer.....	22
Tabelle 9:	Kostenfunktionen für Lärmwirkungen bezogen auf L _{DEN} -Werte.....	24
Tabelle 10:	Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach EU-Umgebungslärmrichtlinie und daraus resultierende Gesundheitskosten (Bezugsjahr: 2016).....	27
Tabelle 11:	Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Durchschnitt alle Strecken) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm.....	29
Tabelle 12:	Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Autobahn) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm.....	30
Tabelle 13:	Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Außerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm.....	32
Tabelle 14:	Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Innerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm.....	33
Tabelle 15:	Kostensätze Verkehr: differenziert nach Emissionskategorie (Euronorm) für die verschiedenen Fahrzeugtypen in €-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm	35
Tabelle 16:	Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent ₂₀₁₆ / Fahrzeugkilometer.....	43
Tabelle 17:	Verwendete Besetzungs-/Auslastungsgrade nach Fahrzeugtyp.....	44

Tabelle 18:	Umweltkosten pro Personen- bzw. Tonnenkilometer für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent ₂₀₁₆ / Pkm bzw. tkm45
-------------	--

Vorbemerkung

Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Kostensätze basieren auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts „Methodenkonvention 3.0 - Weiterentwicklung und Erweiterung der Methodenkonvention zur Schätzung von Umweltkosten“ sowie eigenen Arbeiten des UBA. Detaillierte Angaben zu den verwendeten Daten und Methoden finden sich in den Sachstandspapieren, die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeitet wurden. Diese sind auf Nachfrage erhältlich (Astrid.Matthey@uba.de; Bjoern.Buenger@uba.de).

Bei den dargestellten Kostensätzen handelt es sich um Durchschnittswerte für Emissionen in Deutschland, deren Wirkung jedoch auch im Ausland auftreten kann. Dies gilt insbesondere für Schäden durch Treibhausgasemissionen. Emissionen von klassischen Luftschadstoffen und Lärm verursachen je nach Emissionssituation unterschiedlich hohe Kosten. Sollen die Kosten für konkrete lokale Umstände ermittelt werden, sollten die Kostensätze daher nach Möglichkeit an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden. Durchschnittswerte können dann nur eine Näherung bieten.

1 Bewertung von Klimafolgeschäden: Kostensatz für Kohlendioxid- und andere Treibhausgasemissionen

Wir empfehlen die Verwendung eines Kostensatzes von 180 €/2016 / t CO₂ äq für das Jahr 2016. Da es sich bei Schäden durch den Klimawandel um generationenübergreifende Schäden handelt, empfehlen wir eine Sensitivitätsanalyse mit einem Wert von 640 €/2016 / t CO₂ äq, da dieser eine Gleichgewichtung der Nutzen heutiger und zukünftiger Generationen widerspiegelt.¹

Tabelle 1: UBA-Empfehlung zu den Klimakosten in €/2016 / t CO₂ äq

	Klimakosten in €/2016 / t CO ₂ äq		
	2016	2030	2050
1% reine Zeitpräferenzrate	180	205	240
0% reine Zeitpräferenzrate	640	670	730

Quelle: Eigene Darstellung.

- Für die Verwendung von Kostensätzen für Jahre, für die in Tabelle 1 keine Werte angegeben sind, empfehlen wir, zwischen den angegebenen Kostensätzen linear zu interpolieren.
- Für eine Preisbereinigung der Kostensätze empfehlen wir die Verwendung des Verbraucherpreisindex des Statistischen Bundesamts.
- Für die Übertragung der Kostensätze von Kohlendioxid auf andere Treibhausgase empfehlen wir die Verwendung des Treibhausgaspotenzials (Global Warming Potential (GWP), Zeithorizont 100 Jahre). Für CH₄ (Methan) entspricht dies dem 25fachen Satz des CO₂ äq-Kostensatzes, für N₂O (Lachgas) dem 298fachen Satz². Die Kostensätze für alle weiteren Treibhausgase errechnen sich analog.
- Für die Übertragung der Kostensätze auf Treibhausgasemissionen des Flugverkehrs empfehlen wir die Verwendung eines Emissionsgewichtungsfaktors (EGF) von 2. Dieser trägt der Tatsache Rechnung, dass Emissionen in großer Höhe ein höheres Schadenspotenzial entwickeln³.

Die Empfehlungen der Tabelle 1 folgen dem Schadenskostenansatz und basieren auf dem Modell von Anthoff (2007) mit folgenden Spezifikationen⁴:

- Verwendung von Equity Weighting (Westeuropa) für die Berücksichtigung von Schäden in verschiedenen Weltregionen (siehe Kasten Equity Weighting zur Erläuterung);
- Verwendung von 1% getrimmten Durchschnittswerten als Methode zum Umgang mit statistischen Ausreißern der Modellsimulationen;
- Diskontierung auf das Jahr der Emission;

¹ Eine reine Zeitpräferenzrate von 1% bedeutet zum Beispiel, dass die Schäden, die der nächsten Generation (in 30 Jahren) entstehen, nur zu 74%, die der übernächsten Generation (in 60 Jahren) entstehenden Schäden nur zu 55% berücksichtigt werden. Bei einer reinen Zeitpräferenzrate von 0% werden hingegen heutige und zukünftige Schäden gleichgewichtet.

² Vgl. IPCC (2007)

³ Vgl. ifeu / INFRAS / LBST (2016)

⁴ Vgl. auch Bachmann (2018)

- ▶ Verwendung des deutschen Verbraucherpreisindex des Statistischen Bundesamtes zur Preisbereinigung 2010-2016 (Faktor 1,07)⁵;
- ▶ Verwendung der Kaufkraftparitäten der Weltbank zur Währungsumrechnung von USD in EUR⁶.

Begründung:

Seit der Veröffentlichung der Methodenkonvention 2.0 wurden neue wissenschaftliche Ergebnisse zu Klimaschadenskosten veröffentlicht. Eine Übersicht über diese Ergebnisse zeigt, dass die Schadenskostenschätzungen insgesamt robuster werden (vgl. auch IPCC (2014), S. 691). Wir halten es deswegen für angemessen, für den von uns empfohlenen Kostensatz einen reinen Schadenskostenansatz zu verwenden (siehe auch Kap. 3.1 im Teil „Methodische Grundlagen“, der Methodenkonvention 3.0).

Die Schadenskostensätze weisen eine beträchtliche Bandbreite auf. Im Sinne einer eher vorsichtigen Schätzung der Schadenskosten basieren die empfohlenen Kostensätze weiterhin auf dem in der Methodenkonvention 2.0 verwendeten Schadenskostenmodell FUND (Version 3.0, Anthoff 2007), dessen Ergebnisse im unteren Bereich der Schadenskostenschätzungen liegen (vgl. bspw. Moore und Diaz 2015, Gillingham et al. 2015, die deutlich höhere Kostensätze ermitteln). Der empfohlene Wert von 180 €₂₀₁₆ / t CO_{2 äq} kommt dem im 5. Sachstandsbericht des IPCC ermittelten Wert von 173,5 €₂₀₁₆ / t CO₂ nahe⁷.

Schadenskosten- und Vermeidungskostenansatz

Im Klimabereich wird mit dem Schadenskostenansatz die Höhe der Schäden geschätzt, die der Gesellschaft durch Treibhausgasemissionen und dem daraus resultierenden Klimawandel entstehen. Mit dem Vermeidungskostenansatz werden hingegen die Kosten geschätzt, die die Gesellschaft tragen muss, wenn sie den Klimawandel auf ein bestimmtes Ziel begrenzen, also Treibhausgasemissionen vermeiden will. Je nach Kontext und Fragestellung entspricht der eine oder der andere Ansatz dem konzeptionell richtigen Vorgehen (siehe auch Kap. 3.1 und 3.2 im Teil „Methodische Grundlagen“ der Methodenkonvention 3.0).

Alle Kostensätze der Methodenkonvention verfolgen das erstgenannte Ziel, die Schäden in monetären Werten zu bestimmen, die der Gesellschaft auf Grund von Umweltbelastungen entstehen. Dem entspricht konzeptionell der Schadenskostenansatz, welcher daher zur Ermittlung der Kostensätze der Methodenkonvention einschließlich der Kostensätze im Klimabereich verwendet wird.

Die Verwendung des Vermeidungskostenansatzes ist hingegen dort angemessen, wo die Menge der zu vermeidenden Umweltbelastungen (z.B. Treibhausgasemissionen) politisch festgelegt wurde und die Kosten der Maßnahmen geschätzt werden sollen, die zur Erreichung dieser Minderungsziele beitragen.

Das UBA hat sich bereits seit der ersten Methodenkonvention 2007 für die Verwendung von Equity Weighting ausgesprochen, um die Wohlfahrtseffekte auf alle Menschen gleichermaßen zu berücksichtigen. Sollen die Schäden für in Deutschland emittierte Treibhausgase geschätzt werden, müssen also die globalen Schäden jeweils mit dem Verhältnis der durchschnittlichen

⁵ Destatis (2018)

⁶ Weltbank (2018)

⁷ IPCC (2014), S. 691, Durchschnitt über alle verfügbaren Studien mit 1% reiner Zeitpräferenzrate und unterschiedlichen Annahmen zum Equity Weighting, aufgezinst auf 2016, Währungsumrechnung über Kaufkraftparitäten der Weltbank.

Einkommen gewichtet werden (siehe Kasten *Equity Weighting*). Liegen die Modellierungsdaten für das deutsche Durchschnittseinkommen nicht vor, sind entsprechend die Modellierungsdaten für das Durchschnittseinkommen zu verwenden, welches dem deutschen Wert am nächsten kommt. Dies ist im von uns zugrunde gelegten Modell von Anthoff (2007) das Durchschnittseinkommen für Westeuropa. Die Schadenskosten, die eine Tonne CO₂ äq verursacht, werden dadurch so bewertet, als würden sie (vollständig) in Westeuropa anfallen. Einkommensunterschiede innerhalb Westeuropas oder innerhalb Deutschlands bleiben dabei unberücksichtigt, d.h. die Schäden werden so bewertet, als hätten Klimafolgen für arme und reiche Menschen in Westeuropa bzw. Deutschland die gleiche Bedeutung.

Equity Weighting

Die Folgen des Klimawandels sind global, sie treten unabhängig davon auf, wo Treibhausgase emittiert werden. Entsprechend führt jede Tonne Treibhausgas, die in Deutschland emittiert wird, weltweit zu Schäden.

Auf Grund des unterschiedlichen materiellen Wohlstands in verschiedenen Weltregionen entsprechen vergleichbare Schäden jedoch unterschiedlichen nominalen Geldwerten. Werden beispielsweise durch Unwetterereignisse Wohngebäude zerstört, so ist deren materieller Wert in reicheren Ländern im Schnitt höher als in ärmeren Ländern. Die Menschen in ärmeren Ländern sind aber in ihrer Lebensqualität (in der Sprache der ökonomischen Theorie: ihrem „Nutzen“) mindestens ebenso betroffen wie Menschen in reicheren Ländern, oft sogar mehr, weil Versicherungen und staatliche Hilfen fehlen. Der Ersatz der entstandenen Schäden (z.B. Reparatur von Gebäuden und Infrastruktur) ist zwar nominal in ärmeren Ländern auch billiger, jedoch ist auch der Nutzenverlust pro Geldeinheit größer, der dadurch entsteht, dass das für die Reparatur benötigte Geld nicht für andere Zwecke verwendet werden kann. Diese Wohlstandsunterschiede lassen sich bei der Schätzung globaler Klimaschäden durch die Verwendung von Equity Weighting berücksichtigen.

Beim Equity Weighting werden die nominalen Geldwerte der Schäden mit dem durchschnittlichen Einkommen des Landes gewichtet, in dem sie auftreten. Wird durch den Klimawandel ein angenommener Schaden von 1 € in einem Land verursacht, welches ein durchschnittliches Einkommen von 100 € pro Kopf aufweist, so beträgt der Schaden 1/100 des Pro-Kopf-Einkommens. Tritt derselbe Schaden dagegen in einem Land mit einem durchschnittlichen Einkommen von 5.000 € auf, würde dieser Schaden nur 1/5.000 des Pro-Kopf-Einkommens ausmachen. Im Verhältnis zum Einkommen ist der Schaden also im reichen Land weniger gravierend. Equity Weighting bedeutet, dass man die Schäden entsprechend den durchschnittlichen Einkommen gewichtet. Daher werden die nominalen Schadenskosten 50-mal höher gewichtet, wenn das Pro-Kopf-Einkommen in einem armen Land 50-mal geringer ist.

Die Verwendung von Equity Weighting bei der Berechnung der Klimakosten wäre nicht erforderlich, wenn die Geschädigten tatsächlich umgehend von den Schadensverursachern entschädigt würden. Dies ist jedoch keine realistische Annahme. Equity Weighting ist daher erforderlich, da es bei der Bewertung der Folgen des Klimawandels letztendlich darum geht, die Auswirkungen auf die Lebensqualität (den „Nutzen“) der Menschen zu beziffern.

2 Kostensätze für Luftschadstoffe

2.1 Durchschnittliche Kostensätze für Luftschadstoffemissionen

Die Modellierung der Luftqualität erfolgt ebenso wie die Expositionsmodellierung analog zur Methodenkonvention 2.0 nach dem im EU-Projekt NEEDS entwickelten EcoSenseWeb-Modell in der Version v1.3 (Preiss et al. 2008). Zwar gibt es neuere Ergebnisse für die Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung von Emissionen mittels des EMEP-Modells. Diese werden jedoch in der aktuell verfügbaren Version von EcoSenseWeb nicht berücksichtigt und können daher für die Ermittlung der Kostensätze nicht verwendet werden.

Die Gesundheitseffekte von Luftschadstoffen wurden auf Basis aktueller Daten ermittelt (zusammengestellt in WHO 2013) und monetäre Bewertungssätze weitestgehend an aktuelle EU-Standards angeglichen (Holland 2014). Ernteaussfälle wurden auf Basis der Expositions-Wirkungsbeziehung in Mills et al. (2007) ermittelt. Wo dies nicht möglich war, wurden – wie auch für Gebäude-/Materialschäden und Biodiversitätsverluste – die Kosten aus aufdatierten NEEDS-Daten ermittelt.

Um die Kostensätze einzelnen Emissionen zurechnen zu können und sie damit für Anwendungen wie Kosten-Nutzen-Analysen handhabbar zu machen, werden die Umweltkosten als spezifische durchschnittliche Kosten pro Mengeneinheit des emittierten Schadstoffes ausgewiesen. Diesem Anwendungsbezug ist es auch geschuldet, dass die Werte an den Emissionen ansetzen, diese sind für einzelne Einrichtungen, Projekte, Gesetzesvorhaben und ähnliches oftmals deutlich einfacher zu bestimmen als die dazugehörigen Immissionen. Der Zusammenhang zwischen Emissionen und Immissionen wird im Rahmen des Wirkungspfadansatzes modelliert. Aus dem Anspruch der Methodenkonvention heraus, übertragbare, durchschnittliche Kostensätze für eine breite Reihe von Anwendungen zur Verfügung zu stellen, ist dieses Vorgehen gerechtfertigt.

Tabelle 2 zeigt die durchschnittlichen Umweltkosten pro emittierter Tonne des jeweiligen Schadstoffs⁸ für Emissionen aus „unbekannten Quellen“⁹ in Deutschland. Diese Durchschnittswerte können für eine überschlägige Schätzung der Schadenskosten durch Luftschadstoffe verwendet werden, wenn es keine spezifischen Informationen zu den Emissionsquellen gibt.

⁸ Die wichtigsten Luftschadstoffe in diesem Zusammenhang sind Feinstaub (PM), Stickstoffoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) und Ammoniak (NH₃).

⁹ Unbekannte Quellen (unknown height of release) bedeutet hier, dass es keine Spezifikation bzgl. der Schornsteinhöhe der jeweiligen Anlage gibt. Es handelt sich daher um Durchschnittswerte. Emissionen aus niedrigen Quellen (Anlagen mit niedrigen Schornsteinhöhen) weisen höhere Kosten auf; solche aus höheren Quellen entsprechend niedrigere Werte.

Tabelle 2: Durchschnittliche Umweltkosten der Luftverschmutzung durch Emissionen aus unbekannter Quelle (in €₂₀₁₆ / t Emission)

€ ₂₀₁₆ /t Emission	Kostensätze für Emissionen in Deutschland				
	Gesundheits-schäden	Biodiversitäts-verluste	Ernte-schäden	Material-schäden	Gesamt
Deutschland gesamt					
PM _{2.5}	58.400	0	0	0	58.400
PM _{coarse}	960	0	0	0	960
PM ₁₀	41.200	0	0	0	41.200
NO _x	14.400	2.600	800	130	17.930
SO ₂	13.600	1.000	-160	600	15.040
NM VOC	1.100	0	950	0	2.050
NH ₃	21.700	10.400	-100	0	32.000

Annahme: PM₁₀ besteht zu 70% aus PM_{2.5} und zu 30% aus PM_{coarse}. Für NO_x und SO₂ bilden die Kosten die Schäden durch sekundäre Feinstaubbildung ab. Quelle: Van der Kamp et al. (2017).

Diese und die folgenden Werte beziehen sich auf Emissionen im Jahr 2016. In den Originalquellen sind die Kosten in €₂₀₀₀ bzw. €₂₀₀₅ angegeben. Um den Gegenwartswert des Euros wiederzugeben, wurden die Preisniveauänderungen in Deutschland zwischen 2000 bzw. 2005 und 2016 berücksichtigt. Dazu wurde der Konsumpreisindex von Destatis verwendet, um die Kostensätze in €₂₀₁₆ umzurechnen.¹⁰ Weiterhin wurde berücksichtigt, dass die Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von immateriellen Gesundheitsschäden (Schmerzen und Leid) mit dem Einkommen steigt. Dazu wurden die Kostensätze entsprechend der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf in Deutschland zwischen 2005 und 2016 korrigiert (einschließlich der Verwendung einer Elastizitätszahl von 0,85, welche die angenommene Zunahme der Zahlungsbereitschaft mit dem Einkommen widerspiegelt)¹¹.

Im Rahmen des NEEDS Projektes wurden auch für andere europäische Länder Umweltkostensätze ermittelt. Aus wissenschaftlicher Sicht erbringt es jedoch kaum einen Erkenntnisgewinn, europäische Durchschnittswerte für Kostensätze aus Luftschadstoffemissionen anzugeben. Das liegt daran, dass es zwischen den europäischen Ländern beträchtliche Unterschiede in den bewertungsrelevanten Faktoren gibt, v.a. in der räumlichen Verteilung der Bevölkerung und der Emissionsquellen.

2.2 Differenzierte Kostensätze für Luftschadstoffemissionen aus unterschiedlichen Quellen

Die Schadwirkungen der Luftschadstoffemissionen auf die Gesundheit sind in der Regel umso gravierender, je niedriger die Emissionsquelle ist und je höher die Bevölkerungsdichte in der Nähe der Emissionsquelle. Daher unterscheiden sich auch die Umweltkosten pro Tonne Emission in Abhängigkeit dieser Einflussfaktoren. Diese Differenzierung ist vor allem für die

¹⁰ Die Daten sind abrufbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/Verbraucherpreisindizes/Tabellen/VerbraucherpreiseKategorien.html>.

¹¹ Die Daten sind aufrufbar unter <http://ec.europa.eu/eurostat/web/national-accounts/data/main-tables>.

Kosten von Feinstaubpartikeln relevant. Die Kostensätze der anderen Luftschadstoffe unterscheiden sich nur geringfügig bezüglich der Freisetzungshöhe und -orte.

Für die meisten Anwendungen reicht es daher aus, auf durchschnittliche Kostensätze zurückzugreifen. Sofern es jedoch um standortbezogene Bewertungen geht oder auch der Anteil von Staubemissionen relativ hoch ist, bietet die Anwendung differenzierter Kostensätze einen Erkenntnisgewinn.

Tabelle 3 zeigt die Kostensätze für Deutschland. Die Werte differieren dabei einerseits nach unterschiedlichen Freisetzungshöhen für die Energieerzeugung (Kraftwerke, Freisetzungshöhe >100m), industrielle Energieerzeugung (20-100m) und Kleinf Feuerungsanlagen (0-20m). Andererseits wird zwischen Emissionen aus großstädtischen und städtischen Gebieten unterschieden.

Die angegebenen Werte beziehen sich auf Emissionen für das Jahr 2016 und sind mit dem Verbraucherpreisindex auf €₂₀₁₆ umgerechnet.

Tabelle 3: Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen aus Kleinf Feuerungsanlagen und Verbrennungsprozessen in der Industrie (in €₂₀₁₆ / t Emission)

Höhe (in m)	Gesundheitsschäden											Materi- al- schä- den	Ernte- ausfälle	Biodi- versität
	Kraft- werke	Verbrennungsprozesse in der Industrie					Kleinf Feuerungsanlagen							
		Unbe- kannt	Großstadt		Stadt		Unbe- kannt	Großstadt		Stadt				
	>100		0-20	20-100	0-20	20-100		0-20	20-100	0-20	20-100			
PM _{2.5}	31.500	64.900	116.100	65.500	80.400	65.500	61.700	110.400	62.300	76.500	62.300	0	0	0
PM _{coarse}	400	1.100	2.000	1.100	1.400	1.100	1.000	1.800	1.000	1.300	1.000	0	0	0
PM ₁₀	22.100	45.700	81.900	46.200	56.700	46.200	43.500	77.800	43.900	53.900	43.900	0	0	0
NO _x	11.100	15.200	15.200	15.200	15.200	15.200	15.800	15.800	15.800	15.800	15.800	100	800	2.600
SO ₂	12.700	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500	14.700	14.700	14.700	14.700	14.700	600	-200	1.000
NM VOC	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	0	1000	0
NH ₃	23.700	23.700	23.700	23.700	23.700	23.700	23.600	23.600	23.600	23.600	23.600	0	-100	10.400

Kategorien „Großstadt“ und „Stadt“ unterscheiden sich nach der Gemeindegröße (Großstadt >100.000, 2.000<Stadt<100.000) Annahme: PM₁₀ besteht zu 70% aus PM_{2.5} und zu 30% aus PM_{coarse}. Diese Annahme sollte angepasst werden, falls quellspezifische Informationen zur Zusammensetzung vorliegen. Für NO_x und SO₂ bilden die Kosten die Schäden durch sekundäre Feinstaubbildung ab. Quelle: Van der Kamp et al. (2017) und eigene Berechnungen.

2.3 Kostensätze für Luftschadstoffe aus dem Straßenverkehr

Die Emissionen aus dem Straßenverkehr erfolgen mit sehr geringem Abstand zum Boden (Freisetzungshöhe 0-3m) und werden deshalb von den Rezeptoren stärker aufgenommen als die Emissionen aus größeren Freisetzungshöhen. Dies gilt in besonderem Maße für die Emissionen von Feinstaubpartikeln, da diese bei geringer Emissionshöhe vermehrt vom Menschen eingeatmet werden und somit zu höheren Gesundheitseffekten führen. Aus diesem Grund werden die Auswirkungen dieser Emissionen gesondert betrachtet. Hinzu kommt, dass in Ballungsgebieten mit hoher Bevölkerungsdichte mehr Menschen von den Emissionen betroffen sind. Die Kostensätze für die unterschiedlichen Gebiete erhalten daher einen Anpassungsfaktor auf die durchschnittlichen Kosten, der sich nach der Bevölkerungsdichte der jeweiligen Umgebung (urban, suburban, ländlich) richtet.

Tabelle 4: Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen im Verkehr (in €₂₀₁₆ / t Emission)

Umgebung	Gesundheitsschäden				Nichtgesundheitliche Schäden
	Unbekannt	Urban	Suburban	Ländlich	
PM _{2.5}	59.700	242.500	70.000	41.100	0
PM _{coarse}	1.000	4.700	1.200	600	0
PM ₁₀	6.800	28.500	8.000	4.600	0
NO _x	15.000	15.000	15.000	15.000	3.500
SO ₂	14.200	14.200	14.200	14.200	1.400
NMVOC	1.200	1.200	1.200	1.200	1.000
NH ₃	23.000	23.000	23.000	23.000	10.300

Die Kategorien Urban, Suburban und Ländlich unterscheiden sich nach der Bevölkerungsdichte (Urban > 1.500, 300 < Suburban < 1.500, Ländlich < 300), Annahme: PM₁₀ besteht zu 10% aus PM_{2.5} und zu 90% aus PM_{coarse}. Für NO_x und SO₂ bilden die Kosten die Schäden durch sekundäre Feinstaubbildung ab.

Quelle: Van der Kamp et al. (2017) und eigene Berechnungen.

3 Umweltkosten der Strom- und Wärmeerzeugung

3.1 Umweltkosten der Stromerzeugung

Um die Umweltkosten der Stromerzeugung in Deutschland zu ermitteln, benötigt man Emissionsfaktoren für die verschiedenen Stromerzeugungstechnologien. Das Umweltbundesamt veröffentlicht regelmäßig die Emissionsfaktoren in der Einheit Gramm pro elektrische Kilowattstunde (kWh_{el} , d. h. bezogen auf die produzierte Einheit elektrischen Stroms) für fossile und erneuerbare Stromerzeugungstechnologien.

Darüber hinaus werden die Emissionsfaktoren in indirekte und direkte Emissionen unterschieden. Direkte Emissionen beziehen sich auf die Emissionen, die im Rahmen der Energieerzeugung, also in der Operationsphase des Lebenszyklus der einzelnen Technologien, entstehen. Indirekte Emissionen ergeben sich in den anderen Phasen des Lebenszyklus (Bau, Instandhaltung, Abbau).

Unter der Verwendung dieser Emissionsfaktoren und den in Kapitel 1 und 2 dargestellten Umweltkosten pro Tonne emittierter Schadstoffe lassen sich die Umweltkosten für verschiedene Technologien zur Stromerzeugung berechnen. Durch den Vergleich der unterschiedlichen Kostensätze lassen sich u. a. die vermiedenen Umweltschäden durch Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen ermitteln. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Kostensätze lediglich Treibhausgase und klassische Luftschadstoffe berücksichtigen. Andere Umweltfolgen wie die Beeinträchtigung von Ökosystemen oder Landnutzungsänderungen sind in den Kostensätzen nur teilweise oder gar nicht berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Kostensätze gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Für eine differenzierte Analyse sind Informationen und Annahmen zu den Standorten der Energieerzeugungsanlagen in Deutschland und den jeweils emittierten Luftschadstoffen notwendig. Für eine Analyse auf nationalem Niveau sind hingegen Informationen zu den Gesamtemissionen hinreichend. Die Berechnungen lassen sich so einfacher nachvollziehen und sind auch leichter zu aktualisieren, wenn neue Emissionsfaktoren vorliegen. Die Abweichungen zur o. g. differenzierten Methode sind eher gering und haben keinen Einfluss auf die qualitativen Schlussfolgerungen. Daher basiert die Ermittlung der Kostensätze im Folgenden auf den Gesamtemissionen, wobei sowohl direkte als auch indirekte Emissionen mit den Kostensätzen für Deutschland bewertet werden (für die jeweilige Freisetzungshöhe und -umgebung). Sollen im Einzelfall standortbezogene Umweltschäden je Technologie bzw. Energieträger ausgewiesen werden, empfehlen wir die Verwendung der differenzierten Kostensätze aus den Kapiteln 1 und 2 anzusetzen.

Tabelle 5: Umweltkosten der Stromerzeugung in Deutschland einschließlich Vorketten in €-Cent₂₀₁₆ / kWh_{el}

Stromerzeugung durch	Luftschadstoffe	Treibhausgase (180 €/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (180 €/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (Sensitivitätsrechnung mit 640 €/tCO ₂ äq)
Fossile Energien				
Braunkohle	1,95	18,86	20,81	69,01
Steinkohle	1,60	17,19	18,79	62,72
Erdgas	0,83	7,77	8,59	28,44
Öl	4,92	15,13	20,06	58,73
Erneuerbare Energien				
Wasserkraft	0,06	0,24	0,30	0,91
Windenergie*	0,10	0,18	0,28	0,65
Photovoltaik	0,41	1,23	1,64	4,78
Biomasse**	3,74	4,42	7,71	19,46

* Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert aus onshore und offshore Windenergie;

**Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert für Biomasse gasförmig, flüssig und fest.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bachmann / van der Kamp (2018) und eigenen Berechnungen.

Die Umweltkosten des Strommix Deutschland betragen 13,6 €-Cent / kWh_{el} (44,1 €-Cent / kWh_{el} bei einem Kostensatz von 640 €/t CO₂ äq).

Bei der Abschätzung der Umweltkosten der Kernenergie besteht das Problem, dass die Ergebnisse der vorhandenen Studien große Bandbreiten aufweisen, was u. a. auf Schwierigkeiten bei der Bewertung nuklearer Störfälle und dem Umgang mit belasteten Abfällen zurückzuführen ist. Zur Bewertung der Emissionen aus der Kernenergie empfehlen wir daher analog zur Methodenkonvention 2.0 die Emissionsfaktoren der Technologie mit den höchsten Umweltkosten, in diesem Fall also Braunkohle, zu verwenden.¹²

3.2 Umweltkosten der Wärmeerzeugung

Das Vorgehen bei der Ermittlung der Umweltkosten der Wärmeerzeugung gleicht dem bei der Stromerzeugung. Auch hier werden vom Umweltbundesamt für jeden Energieträger die Emissionsfaktoren für die direkten und indirekten Emissionen ermittelt. Für die Ermittlung der Umweltkosten werden diese anschließend mit den deutschlandweit durchschnittlichen Kostensätzen bewertet (für die jeweilige Freisetzungshöhe und -umgebung). Wird eine standortspezifische Bewertung benötigt, sollte diese auch bei der Wärmeerzeugung unter Verwendung der differenzierten Kostensätze aus den Kapiteln 1 und 2 erfolgen.

¹² Ausführlicher zu diesem Vorgehen vgl. „Methodenkonvention 3.0 - Methodische Grundlagen“ Kap. 2.5.4.

Tabelle 6: Umweltkosten der Wärmeerzeugung der Haushalte in Deutschland in €-Cent2016 / kWh_{Endenergie}

Wärmeerzeugung durch	Luftschadstoffe	Treibhausgase (180 €/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (180 €/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (Sensitivitätsrechnung mit 640 €/tCO ₂ äq)
----------------------	-----------------	---	---	---

Fossile Energien

Heizöl	0,82	5,73	6,54	21,18
Erdgas	0,39	4,48	4,87	16,32
Braunkohle (Brikett)	3,97	7,70	11,67	31,34
Fernwärme mit Netzverlusten*	1,30	5,71	7,02	21,62
Stromheizung mit Netzverlusten**	1,66	10,93	12,59	40,52

Erneuerbare Energien

Solarthermie	0,20	0,22	0,41	0,97
Oberflächen-geothermie	0,70	3,61	4,31	13,53
Tiefengeothermie	0,01	0,01	0,02	0,05
Biomasse***	2,13	0,60	2,74	4,28

* Im Einzelnen variieren die Kostensätze je nach Wärmequelle z.T. beträchtlich.

** Zu Grunde gelegt wurde der Durchschnittssatz der Stromerzeugung (inkl. erneuerbare Energien und unter Berücksichtigung der Vorketten für die Erzeugung der jeweiligen Kraftstoffe).

*** Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert für Biomasse gasförmig, flüssig und fest.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bachmann / van der Kamp (2018) und eigenen Berechnungen.

4 Umweltkosten des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland¹³

Die Bestimmung der Kostensätze für die Umweltkosten des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland ist in zwei Teile gegliedert. Zunächst werden die Emissionen aus dem Betrieb der verschiedenen Fahrzeugtypen ermittelt, die bei der Verbrennung der Kraftstoffe, Abrieb und Staubaufwirbelungen entstehen. Im Anschluss daran werden die Emissionen aus den anderen Phasen des Lebenszyklus, z. B. bei Bau, Wartung und Entsorgung sowie aus der Bereitstellung der Kraftstoffe geschätzt.

Neben Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen verursacht Verkehr Lärm und weitere negative Effekte auf Natur und Landschaft, vor allem aufgrund von Landschaftszerschneidung und Flächenversiegelung durch die zugrundeliegende Infrastruktur. Auch hierfür liegen teilweise Kostenschätzungen vor, die zu den emissionsbezogenen Kosten noch hinzukommen. Das Vorgehen und die resultierenden verkehrsbezogenen Kostensätze werden im Folgenden beschrieben.

4.1 Annahmen zur Emissionsberechnung

Emissionsbedingte Umwelt- und Gesundheitsschäden sind aufgrund der unterschiedlichen Bevölkerungsdichte innerorts höher als außerorts oder auf Autobahnen. Um verkehrsbezogene Kostensätze zu schätzen (z. B. Kosten pro Fahrzeugkilometer) ist daher eine Bestimmung der jeweiligen Emissionen (z. B. pro Fahrzeugkilometer) und der Anteile von Fahrleistungen innerorts, außerorts und auf Autobahnen notwendig. Die Anteile an Fahrleistungen (Tabelle 7) entsprechen den Angaben aus dem vom Umweltbundesamt verwendeten Modell TREMOD (Transport Emission Model).

Tabelle 7: Verteilung der Fahrleistung im Straßenverkehr (innerorts, außerorts, Autobahn) nach Fahrzeugkategorie

Fahrzeugtyp	Innerorts	Außerorts	Autobahn
PKW	26%	41%	33%
Leichte Nutzfahrzeuge	44%	27%	29%
LKW	14%	25%	61%
Krafträder	39%	52%	9%
Linienbusse	57%	37%	6%
Reisebusse	9%	58%	34%

Quelle: HBEFA 3.3.

Für die Ermittlung der Emissionen für die Betriebsphase der Fahrzeuge im Straßenverkehr wurden Emissionsfaktoren aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA 3.3) für das Jahr 2016 verwendet. Das HBEFA liefert Emissionsfaktoren in der Einheit

¹³ Geänderte Version vom 11.02.2019. Es wurden Fehler in der Version vom Oktober 2018 korrigiert. Diese befanden sich in der Tabelle 17 und der auf dieser aufbauenden Tabelle 18. Sie bezogen sich auf den Auslastungsgrad von Güterzügen sowie die Berücksichtigung von Belly Freight bei der Auslastung von Luftfracht und Leerfahrten bei der Auslastung im Straßengüterverkehr. Darüber hinaus wurden Kostensätze auf Basis aktueller Daten überarbeitet.

Gramm pro Fahrzeugkilometer für die Luftschadstoffe CO, NH₃, NMVOC, NO_x, PPM_{2.5} und SO₂ sowie für die Treibhausgase CH₄, CO₂ und N₂O.

Die Emissionsfaktoren für die direkten Emissionen, die zur Ermittlung der Kostensätze für Personen- und Güterzüge verwendet werden, stammen aus dem Modell TREMOD.

Darüber hinaus werden die Berechnungen der Kostensätze für Emissionen aus dem Straßen- und Schienenverkehr in Deutschland zum einen für die durchschnittliche Flotte der verschiedenen Fahrzeugtypen und zum anderen für die Euronormklassen (Euro 1 bis Euro 6 für PKW und Euro I bis Euro VI für LKW¹⁴) für die Fahrzeugtypen und deren Unterklassen durchgeführt.

Die Berechnung der Kostensätze für die anderen Lebenszyklusphasen ist in unterschiedliche Bereiche gegliedert.

Im Flugverkehr findet die Emission der Treibhausgase für den größten Teil des zurückgelegten Flugweges in hohen Höhen statt und entfaltet dort eine höhere Klimaschädlichkeit. Um dies widerzuspiegeln werden die Umweltkosten der im Flugbetrieb emittierten Treibhausgase daher mit dem Faktor 2 multipliziert (siehe entsprechende Empfehlung im Kapitel zu Treibhausgasemissionen).

Kosten der Bau-, Wartungs- und Entsorgungsphase der Fahrzeuge

Für diese Phasen wurden Daten aus dem Ökobilanzinventar ecoinvent 3.3 verwendet. Die Emissionsfaktoren wurden dabei aus den Angaben aus Spielmann et al. (2007) zu Gesamtemissionen und gesamter Fahrleistung der einzelnen Fahrzeugtypen errechnet.¹⁵

Kraftstoffbereitstellung

Die Berechnung der Emissionen aus der Kraftstoffbereitstellung erfolgte unter Verwendung der Emissionsfaktoren aus TREMOD.¹⁶

4.2 Kostensätze für Schäden durch Flächenverbrauch und Zerschneidung

Um die durch Verlust und Fragmentierung natürlicher Habitate entstehenden Umweltkosten zu bestimmen, wurde auf Berechnungen der Studie „Externe Effekte des Verkehrs 2015“ des Schweizerischen Bundesamtes für Raumentwicklung zurückgegriffen. Diese Faktoren sind in der folgenden

Tabelle 8 abgebildet.

Die Kostensätze basieren dabei auf dem Ersatzkostenansatz: Zugrunde gelegt wurden bei Habitatverlusten die Kosten für (virtuelle) Wiederherstellung von verlorenen Biotop- bzw. Ökosystemflächen und bei Habitatfragmentierung die Kosten für die (virtuelle) Erstellung von Defragmentierungsbauwerken.¹⁷

Für den Straßenverkehr wurden Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen berücksichtigt. Für den Schienenverkehr wurden die Schienentrassen zugrunde gelegt. Die

¹⁴ Zusätzlich zu den Euro Normklassen 1 bis 6 beziehungsweise I bis VI wurden auch die Schadstoffwerte von Motoren berücksichtigt, die vor der Einführung der Abgasnorm im Verkehr waren. Diese werden im HBEFA 3.3 mit Euro 0 für PKW und 80ties für LKW bezeichnet.

¹⁵ Aus Spielmann et al. (2007) geht hervor, welche Prozesse betrachtet wurden: „Included processes: The inventory includes processes of material, energy and water use in vehicle manufacturing. Rail and road transport of materials is accounted for. Plant infrastructure is included, addressing issues such as land use, building, road and parking construction.“

¹⁶ Für die Berechnung der Emissionen aus der Kraftstoffbereitstellung wurden aus der ecoinvent Datenbank die Prozesse „market for diesel“ sowie „market for petrol“ verwendet. Diese Prozesse beinhalten bereits sämtliche Transportwege der Treibstoffe.

¹⁷ Vgl. INFRAS/Ecoplan (2018), S. 79 i. V. m. Ecoplan/INFRAS (2014), S. 18.

Flächennutzung für den Luftverkehr wurde der Statistik „Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung“ des Statistischen Bundesamtes¹⁸ entnommen.

Tabelle 8: Angaben zu Umweltkosten des Straßenverkehrs durch Flächenverbrauch und Zerschneidung, in €-Cent₂₀₁₆ pro Fahrzeugkilometer

Fahrzeugkategorie	Kosten durch Flächenverbrauch und Zerschneidung [€-Cent ₂₀₁₆ /Fzkm]
PKW	0,34
Busse	0,81
Kleines Kraftrad	0,11
Kraftrad	0,15
Personenzug, Nahverkehr	39,65
Personenzug, Fernverkehr	59,48
Personen-Luftverkehr (Kurz- und Mittelstrecke; <2.000 km)	8,56
Personen-Luftverkehr (Langstrecke; > 2.000 km)	15,71
Leichte Nutzfahrzeuge (LNF)	0,36
LKW <7,5t	0,41
LKW 7,5-14t	0,75
LKW 14-28t	0,81
LKW: Trailer 28-40t	1,02
Güterzug	123,92
Güter-Luftverkehr	25,91

Bei den Angaben für den Luftverkehr wird Belly Freight anteilig berücksichtigt.

Quelle: INFRAS (2018), Umweltkosten Verkehr, Exceltool.

4.3 Kostensätze für Lärm

Im dicht besiedelten und verkehrsreichen Deutschland sind weite Teile der Bevölkerung von Lärm betroffen. Viele Menschen sind hohen Lärmbelastungen ausgesetzt, die ihre Gesundheit beeinträchtigen und die Lebensqualität mindern. Die Lärmbelastungen werden vor allem durch Straßen-, Schienen- und Luftverkehr verursacht. Für den Verkehrslärm werden im Folgenden Kostensätze hergeleitet. Dabei sind noch stärker als bei der Emission von Luftschadstoffen die jeweiligen Rahmenbedingungen bei der Beurteilung der Auswirkungen des Lärms auf die

¹⁸ Vgl. Destatis (2017).

menschliche Gesundheit zu beachten (Geräuschcharakteristik, Abstand zur Geräuschquelle, Tageszeit, Bevölkerungsdichte etc.).

Die Gesundheitskosten, die durch Verkehrslärm entstehen, werden nach Pegelklassen differenziert dargestellt. Dabei wird zwischen Straßen-, Schienen- und Luftverkehr unterschieden, um die akustischen Eigenschaften und die daraus resultierenden die Lärmauswirkungen dieser Verkehrsträger sachgerecht zu berücksichtigen.

Die in Tabelle 9 angegebenen Kostenansätze können bspw. verwendet werden, um eine durch Lärminderungsmaßnahmen entstehende Veränderung der Lärmsituation zu monetarisieren. Dabei ist zu beachten, dass es sich um Durchschnittswerte handelt, für eine genauere Bestimmung der Werte sind Geräuschmessungen und Untersuchungen vor Ort notwendig.

Tabelle 9: Kostenfunktionen für Lärmwirkungen bezogen auf L_{DEN} -Werte

dB(A)	Kostenfunktionen nach Kategorien (EUR/Person, a)												Gesamtkosten (EUR/Person, a)		
	Immaterielle Kosten - YLD			Immaterielle Kosten – YLL			Kosten Gesundheitssystem			Kosten Produktionsausfälle			Alle Kategorien		
	Straße	Bahn	Flug	Straße	Bahn	Flug	Straße	Bahn	Flug	Straße	Bahn	Flug	Straße	Bahn	Flug
Gesamtergebnis Belästigungen (ohne selbstberichtete Schlafstörungen)															
35-39	0,00	0,00	0,00										0,00	0,00	0,00
40-44	0,00	0,00	0,00										0,00	0,00	0,00
45-49	27,98	8,93	29,39										27,98	8,93	29,39
50-54	56,22	19,67	81,63										56,22	19,67	81,63
55-59	93,64	38,76	155,88										93,64	38,76	155,88
60-64	149,15	72,74	251,31										149,15	72,74	251,31
65-69	231,67	128,14	367,10										231,67	128,14	367,10
70-74	350,10	211,51	502,40										350,10	211,51	502,40
>= 75	513,35	329,37	656,39										513,35	329,37	656,39
Gesamtergebnis physische Gesundheitsfolgen															
45-49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
50-54	0,11	0,08	0,05	0,22	0,18	0,17	0,94	0,11	0,84	0,04	0,01	0,02	1,31	0,38	1,08
55-59	0,53	0,38	0,29	1,40	1,10	1,05	3,68	0,53	3,09	0,18	0,04	0,09	5,79	2,05	4,52
60-64	1,26	0,93	0,91	3,54	2,74	3,19	7,41	1,61	6,53	0,42	0,10	0,31	12,63	5,39	10,94

	Kostenfunktionen nach Kategorien (EUR/Person, a)												Gesamtkosten (EUR/Person, a)		
65-69	2,28	1,76	2,22	5,76	4,46	7,10	12,15	3,72	12,67	0,71	0,22	0,92	20,90	10,16	22,91
70-74	3,46	2,76	4,02	8,03	6,23	12,37	17,51	6,43	20,73	1,03	0,37	1,84	30,03	15,80	38,96
>= 75	4,64	3,76	5,82	10,30	8,00	17,64	22,87	9,14	28,79	1,35	0,52	2,75	39,16	21,43	55,01

Gesamtergebnis kognitive und psychische Beeinträchtigungen

45-49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50-54	1,45	1,43	1,05	0,16	0,15	0,00	0,21	0,20	0,00	0,14	0,14	0,00	1,96	1,92	1,05
55-59	8,62	8,53	6,66	0,77	0,73	0,00	1,00	0,95	0,00	0,70	0,66	0,00	11,08	10,87	6,66
60-64	20,26	20,09	17,09	1,38	1,31	0,14	1,79	1,71	0,18	1,25	1,19	0,12	24,68	24,29	17,53
65-69	31,91	31,66	29,06	1,98	1,89	0,87	2,59	2,46	1,14	1,80	1,71	0,79	38,28	37,72	31,86
70-74	43,55	43,23	42,53	2,59	2,47	2,19	3,38	3,21	2,86	2,35	2,24	1,99	51,88	51,15	49,57
>= 75	55,20	54,80	56,00	3,20	3,05	3,52	4,17	3,97	4,58	2,90	2,76	3,19	65,47	64,57	67,28

Gesamtergebnis über alle Endpunkte (ohne selbstberichtete Schlafstörungen)

35-39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40-44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45-49	27,98	8,93	29,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,98	8,93	29,39
50-54	57,79	21,19	82,73	0,38	0,33	0,17	1,15	0,30	0,84	0,18	0,14	0,02	59,50	21,97	83,76
55-59	102,79	47,67	162,82	2,17	1,83	1,05	4,68	1,48	3,09	0,88	0,70	0,09	110,52	51,68	167,05
60-64	170,68	93,77	269,31	4,92	4,05	3,33	9,20	3,32	6,71	1,67	1,29	0,43	186,46	102,42	279,78
65-69	265,85	161,57	398,37	7,75	6,35	7,97	14,74	6,18	13,81	2,51	1,93	1,71	290,85	176,02	421,86
70-74	397,11	257,50	548,95	10,63	8,70	14,57	20,89	9,64	23,59	3,38	2,61	3,83	432,01	278,45	590,93

	Kostenfunktionen nach Kategorien (EUR/Person, a)												Gesamtkosten (EUR/Person, a)		
>= 75	573,19	387,93	718,21	13,50	11,05	21,16	27,04	13,11	33,37	4,26	3,28	5,94	617,99	415,37	778,68

LDEN = Day-Evening-Night Noise Level; Quelle: Sachstandspapier Lärm.

Darüber hinaus können Kostenaussagen über die Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm in Deutschland getroffen werden. Hierzu können die Ergebnisse der Lärmkartierung nach der EU-Umgebungslärmrichtlinie verwendet werden. Die aktuellen Ergebnisse der Lärmkartierung für das Jahr 2017 sind in Tabelle 10 dargestellt. Die Tabelle zeigt die Anzahl der Personen, die im Bezugsjahr 2016 durch die einzelnen Verkehrsträger belastet wurden. Diese Angaben wurden mit in Tabelle 9 angegebenen Kostenfunktionen verschnitten. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach EU-Umgebungslärmrichtlinie und daraus resultierende Gesundheitskosten (Bezugsjahr: 2016)

	L_{DEN} > 55-60 dB	L_{DEN} > 60-65 dB	L_{DEN} > 65-70 dB	L_{DEN} > 70-75 dB	L_{DEN} > 75 dB
Anzahl der durch Straßenverkehrslärm betroffenen Personen	3.961.400	2.409.200	1.649.300	632.300	65.200
Anzahl der durch Schienenverkehrslärm betroffenen Personen	3.787.300	1.645.500	679.600	231.600	92.600
Anzahl der durch Fluglärm betroffenen Personen	606.400	205.800	30.700	3.700	0
Gesundheitskosten durch Straßenverkehrslärm [€]	437.813.928	449.219.432	479.698.905	273.159.923	40.292.948
Gesundheitskosten durch Schienenverkehrslärm [€]	195.727.664	168.532.110	119.623.192	64.489.020	38.463.262
Gesundheitskosten durch Fluglärm [€]	101.299.120	57.578.724	12.951.102	2.186.441	0

Quelle: Lärmkartierung und eigene Berechnungen.

Es ergeben sich somit in Deutschland für das Jahr 2016 Gesundheitskosten in Höhe von insgesamt 1,68 Mrd. € durch Straßenverkehrslärm, 586 Mio. € durch Schienenverkehrslärm und 174 Mio. € durch Fluglärm.

4.4 Kostensätze für verkehrsbezogene Aktivitäten

Über die Verknüpfung der Emissionsfaktoren für die einzelnen Fahrzeugkategorien, die Unterscheidung in innerorts, außerorts und Autobahnen (nach der oben dargestellten Verteilung) und in Betriebs- und andere Life Cycle (LC)-Phasen erhält man die in Tabelle 11 dargestellten Kostensätze für Verkehr in €-Cent₂₀₁₆ pro gefahrenem Fahrzeugkilometer.

Fahrleistungsbezogene Lärmkostensätze (in € pro Fahrzeugkilometer, pro Personenkilometer oder Tonnenkilometer) können zwar als reine Umlagequotienten berechnet werden, d.h. es kann eine bestehende Lärmbelastung bzw. die korrespondierenden Kosten durch die

Fahrleistung, z.B. die diesbezüglichen Fahrzeugkilometer (Fzkm), geteilt werden. So kann man beispielsweise einen lärmbezogenen Mautkostensatz ableiten, der dann pro gefahrenem Kilometer angelastet werden könnte. Jedoch kann man mit diesem Kostensatz nicht die Lärmauswirkungen beliebiger fahrleistungsbezogenen Maßnahmen oder der Verkehrsentwicklung monetär bewerten. Beispielsweise wird der Bau einer Umgehungsstraße normalerweise zu einer Steigerung der Fahrzeugkilometer führen, gleichzeitig aber die Lärmbelastung senken. Ebenso geht ein Rückgang des deutschlandweiten jährlichen Verkehrsaufwands (in Fzkm) nicht zwangsläufig mit einer geringeren Lärmbelastung einher, da es z.B. sein kann, dass der Verkehr in dünn besiedelten Gebieten stark abgenommen hat, dafür aber in dicht besiedelten Gebieten oder auch im besonders belastenden Nachtzeitraum zugenommen hat. In der Methodenkonvention 3.0 werden daher keine fahrleistungsbezogenen Lärmkostensätze ausgewiesen.¹⁹ Um dennoch zu betonen, dass auch durch den verkehrsbedingten Lärm Umweltkosten entstehen, sind als Merkposten die entsprechenden Spalten in den Tabellen mit Sternchen (***) gekennzeichnet.

¹⁹ Um z.B. einen Variantenvergleich zwischen zwei Maßnahmen bzw. Trassenalternativen vorzunehmen, ist jeweils die lokale räumliche und zeitliche Verteilung der Quellen, Ausbreitungsbedingungen und Empfänger zu modellieren und die resultierende Lärmbelastung zu berechnen. Diese kann dann mit den einschlägigen Expositions-Wirkungs-Funktionen und gegebenenfalls den expositionsbezogenen Lärmkostensätzen der Methodenkonvention bewertet werden.

Tabelle 11: Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Durchschnitt alle Strecken) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent₂₀₁₆ / Fzkm

Fahrzeugkategorie	Emissionskonzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch u. Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur u. Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
PKW	Benzin	2,75	0,30	0,03	***	2,06	0,94	0,34	6,42
PKW	Diesel	2,36	1,49	0,03	***	2,35	0,96	0,34	7,53
PKW	Elektro	0,00	0,00	0,03	***	3,15	2,59	0,34	6,10
kleines Kraftrad	Benzin	1,43	0,71	0,01	***	2,07	0,59	0,11	4,93
Kraftrad	Benzin	1,79	0,54	0,01	***	2,21	1,00	0,15	5,70
Linienbus	Diesel	18,87	10,77	0,15	***	4,81	5,91	0,81	41,30
Reisebus	Diesel	12,64	8,65	0,09	***	6,03	4,44	0,81	32,65
Personenzug, Fernverkehr	Elektrisch	0,00	0,00	0,65	***	201,50	219,01	59,48	480,64
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	17,53	20,52	0,33	***	59,13	89,36	39,65	226,54
Personen-Luftverkehr, Kurz- und Mittelstrecken		460,92	241,54	---	***	20,01	140,36	8,56	871,39
Personen-Luftverkehr, Langstrecken		764,51	435,00	---	***	22,43	232,92	15,71	1.470,57
LNF	Benzin	2,82	0,60	0,03	***	1,66	1,10	0,36	6,56
LNF	Diesel	2,36	1,99	0,03	***	1,82	1,18	0,36	7,73
LNF	Elektro	0,00	0,00	0,03	***	2,83	4,81	0,36	8,02
LKW <7,5t	Diesel	5,67	2,29	0,07	***	2,42	2,82	0,41	13,67

Fahrzeugkategorie	Emissionskonzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch u. Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur u. Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
LKW 7,5-14t	Diesel	7,76	2,60	0,07	***	3,59	3,34	0,75	18,11
LKW 14-28t	Diesel	10,55	3,25	0,07	***	4,92	4,37	0,81	23,97
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	13,38	3,20	0,07	***	6,93	4,99	1,02	29,58
Güterzug	gew. DS	16,59	24,30	0,77	***	276,72	198,74	123,92	641,05
Güter-Luftverkehr		984,89	582,04	---	***	22,10	299,32	25,91	1.914,27
Motorschiffe (Binnengüterschifffahrt)		503,98	887,70	---	***	602,69	141,57	---	2.135,94
Schubverbände (Binnengüterschifffahrt)		916,76	1.632,19	---	***	1.105,54	278,12	---	3.932,62

LNF = Leichte Nutzfahrzeuge; gew. DS = gewichteter Durchschnitt Elektrisch/Diesel.

Bei den Angaben für den Luftverkehr wird Belly Freight anteilig berücksichtigt.

Quelle: Emissionsfaktoren direkte Emissionen stammen aus HBEFA v3.3 und Tremod; Emissionsfaktoren indirekte Emissionen stammen aus Tremod, Ecoinvent 3.3 und Mobitool. Berechnungen von INFRAS im Rahmen des Forschungsprojekts.

Tabelle 12: Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Autobahn) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent₂₀₁₆ / Fzkm

Fahrzeugkategorie	Emissionskonzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
PKW	Benzin	3,15	0,39	0,02	***	2,06	0,94	0,34	6,90
PKW	Diesel	2,41	1,85	0,02	***	2,35	0,96	0,34	7,94
PKW	Elektro	0,00	0,00	0,02	***	3,15	2,59	0,34	6,09

Fahrzeugkategorie	Emissionskonzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zer- schneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschad- stoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energie- bereitstell- ung		
kleines Kraftrad	Benzin	2,20	1,08	0,01	***	2,07	0,59	0,11	6,06
Kraftrad	Benzin	2,31	1,29	0,01	***	2,21	1,00	0,15	6,97
Linienbus	Diesel	12,71	5,80	0,04	***	4,81	5,91	0,81	30,07
Reisebus	Diesel	12,06	7,49	0,04	***	6,03	4,44	0,81	30,87
LNF	Benzin	2,95	0,69	0,02	***	1,66	1,10	0,36	6,79
LNF	Diesel	2,41	2,89	0,02	***	1,82	1,18	0,36	8,68
LNF	Elektro	0,00	0,00	0,02	***	2,83	4,81	0,36	8,02
LKW <7,5t	Diesel	5,84	2,23	0,04	***	2,42	2,82	0,41	13,75
LKW 7,5-14t	Diesel	7,87	2,42	0,04	***	3,59	3,34	0,75	18,01
LKW 14-28t	Diesel	10,40	2,52	0,04	***	4,92	4,37	0,81	23,06
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	12,93	2,72	0,04	***	6,93	4,99	1,02	28,62

LNF = Leichte Nutzfahrzeuge.

Quelle: Emissionsfaktoren direkte Emissionen stammen aus HBEFA v3.3 und Tremod; Emissionsfaktoren indirekte Emissionen stammen aus Tremod, Ecoinvent 3.3 und Mobitool. Berechnungen von INFRAS im Rahmen des Forschungsprojekts.

Tabelle 13: Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Außerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent₂₀₁₆ / Fzkm

Fahrzeugkategorie	Emissions-konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
PKW	Benzin	2,31	0,28	0,02	***	2,06	0,94	0,34	5,94
PKW	Diesel	2,04	1,21	0,02	***	2,35	0,96	0,34	6,92
PKW	Elektro	0,00	0,00	0,02	***	3,15	2,59	0,34	6,09
kleines Kraftrad	Benzin	1,38	0,68	0,00	***	2,07	0,59	0,11	4,84
Kraftrad	Benzin	1,67	0,51	0,00	***	2,21	1,00	0,15	5,55
Linienbus	Diesel	16,34	7,60	0,06	***	4,81	5,91	0,81	35,52
Reisebus	Diesel	12,13	8,09	0,06	***	6,03	4,44	0,81	31,55
Personenzug, Fernverkehr	Elektrisch	0,00	0,00	0,65	***	201,50	219,01	59,48	480,43
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	17,53	20,30	0,23	***	59,13	89,36	39,65	226,20
LNF	Benzin	2,43	0,53	0,01	***	1,66	1,10	0,36	6,10
LNF	Diesel	2,04	1,73	0,01	***	1,82	1,18	0,36	7,14
LNF	Elektro	0,00	0,00	0,01	***	2,83	4,81	0,36	8,01
LKW < 7,5t	Diesel	5,29	2,10	0,05	***	2,42	2,82	0,41	13,07
LKW 7,5-14t	Diesel	7,31	2,35	0,05	***	3,59	3,34	0,75	17,39
LKW 14-28t	Diesel	10,25	3,24	0,05	***	4,92	4,37	0,81	23,64
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	13,32	3,32	0,05	***	6,93	4,99	1,02	29,62
Güterzug	gew. DS	16,59	23,92	0,52	***	276,72	198,74	123,92	640,42

LNF = Leichte Nutzfahrzeuge; gew. DS = gewichteter Durchschnitt Elektrisch/Diesel.

Quelle: Emissionsfaktoren direkte Emissionen stammen aus HBEFA v3.3 und Tremod; Emissionsfaktoren indirekte Emissionen stammen aus Tremod, Ecoinvent 3.3 und Mobitool. Berechnungen von INFRAS im Rahmen des Forschungsprojekts.

Tabelle 14: Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Innerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent₂₀₁₆ / Fzkm

Fahrzeug- kategorie	Emissions- konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luftschad- stoffe Auspuff	Luftschad- stoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereit- stellung		
PKW	Benzin	2,94	0,26	0,10	***	2,06	0,94	0,34	6,64
PKW	Diesel	2,71	1,60	0,10	***	2,35	0,96	0,34	8,07
PKW	Elektro	0,00	0,00	0,10	***	3,15	2,59	0,34	6,17
kleines Kraftrad	Benzin	1,30	0,65	0,03	***	2,07	0,59	0,11	4,75
Kraftrad	Benzin	1,83	0,36	0,03	***	2,21	1,00	0,15	5,57
Linienbus	Diesel	21,03	13,89	0,82	***	4,81	5,91	0,81	47,26
Reisebus	Diesel	17,42	16,86	0,82	***	6,03	4,44	0,81	46,38
Personenzug, Fernverkehr	elektrisch	0,00	0,00	2,71	***	201,50	219,01	59,48	482,70
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	17,53	22,73	1,38	***	59,13	89,36	39,65	229,79
LNF	Benzin	2,96	0,60	0,10	***	1,66	1,10	0,36	6,77
LNF	Diesel	2,71	1,95	0,10	***	1,82	1,18	0,36	8,11
LNF	Elektro	0,00	0,00	0,10	***	2,83	4,81	0,36	8,10
LKW <7,5t	Diesel	5,17	3,61	0,76	***	2,42	2,82	0,41	15,18
LKW 7,5-14t	Diesel	8,21	5,02	0,76	***	3,59	3,34	0,75	21,67
LKW 14-28t	Diesel	13,04	7,84	0,76	***	4,92	4,37	0,81	31,75
LKW: Trailer 28- 40t	Diesel	17,87	8,10	0,76	***	6,93	4,99	1,02	39,67

Fahrzeug- kategorie	Emissions- konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luftschad- stoffe Auspuff	Luftschad- stoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereit- stellung		
Güterzug	gew. DS	16,59	28,00	3,22	***	276,72	198,74	123,92	647,20

LNF = Leichte Nutzfahrzeuge; gew. DS = Gewichteter Durchschnitt Elektrisch/Diesel.

Quelle: Emissionsfaktoren direkte Emissionen stammen aus HBEFA v3.3 und Tremod; Emissionsfaktoren indirekte Emissionen stammen aus Tremod, Ecoinvent 3.3 und Mobitool. Berechnungen von INFRAS im Rahmen des Forschungsprojekts.

Tabelle 15 stellt die Kostensätze nach Euronormen für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen dar.²⁰ Bei den verschiedenen LKW-Typen erfolgt eine zusätzliche Unterscheidung nach Transportgewicht, außerdem ist eine zusätzliche Kategorie für Schwerlastzüge enthalten. Um die Tabelle übersichtlicher zu gestalten, sind die berechneten Kostensätze für Bau, Wartung, Entsorgung und Kraftstoffbereitstellung sowie die Schäden an Natur und Landschaft durch den Straßenbau in der Kategorie Lebenszyklus zusammengefasst.

²⁰ Die Differenzierung der Emissionsfaktoren nach Euronormen basiert dabei auf HBEFA v3.3.

Tabelle 15: Kostensätze Verkehr: differenziert nach Emissionskategorie (Euronorm) für die verschiedenen Fahrzeugtypen in €-Cent₂₀₁₆ / Fzkm

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
PKW, Diesel	Euro 0	2,80	1,74	0,03	2,35	1,14	0,34	8,40
	Euro 1	3,06	1,85	0,03	2,35	1,25	0,34	8,88
	Euro 2	2,89	1,80	0,03	2,35	1,18	0,34	8,58
	Euro 3	2,66	1,69	0,03	2,35	1,09	0,34	8,15
	Euro 4	2,53	1,32	0,03	2,35	1,03	0,34	7,60
	Euro 5	2,30	1,73	0,03	2,35	0,94	0,34	7,69
	Euro 6	2,16	0,98	0,03	2,35	0,88	0,34	6,73
PKW, Benzin	Euro 0	3,93	2,32	0,03	2,06	1,50	0,34	10,18
	Euro 1	3,57	1,88	0,03	2,06	1,36	0,34	9,23
	Euro 2	3,44	1,21	0,03	2,06	1,32	0,34	8,39
	Euro 3	3,18	0,28	0,03	2,06	1,23	0,34	7,11
	Euro 4	2,86	0,27	0,03	2,06	1,10	0,34	6,65
	Euro 5	2,55	0,19	0,03	2,06	0,99	0,34	6,15
	Euro 6	2,40	0,19	0,03	2,06	0,93	0,34	5,94
Kraftrad (Benzin, 2T)	Euro 0	2,06	1,54	0,01	2,07	0,85	0,11	6,64
	Euro 1	2,14	0,76	0,01	2,07	0,89	0,11	5,98
	Euro 2	1,69	0,45	0,01	2,07	0,70	0,11	5,03

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
Kraftrad (Benzin, 4T)	Euro 3	1,38	0,33	0,01	2,07	0,57	0,11	4,47
	Euro 0	1,93	0,85	0,01	2,21	1,08	0,15	6,23
	Euro 1	1,83	0,69	0,01	2,21	1,02	0,15	5,90
	Euro 2	1,69	0,59	0,01	2,21	0,94	0,15	5,59
Leichtes Nutzfahrzeug (Benzin)	Euro 3	1,75	0,35	0,01	2,21	0,98	0,15	5,44
	Euro 0	4,10	4,23	0,03	1,66	1,60	0,36	11,98
	Euro 1	3,64	2,81	0,03	1,66	1,42	0,36	9,91
	Euro 2	3,24	1,35	0,03	1,66	1,26	0,36	7,90
	Euro 3	3,25	0,31	0,03	1,66	1,26	0,36	6,87
	Euro 4	2,81	0,25	0,03	1,66	1,09	0,36	6,20
	Euro 5	2,51	0,18	0,03	1,66	0,98	0,36	5,71
	Euro 6	2,24	0,17	0,03	1,66	0,87	0,36	5,33
Leichtes Nutzfahrzeug (Diesel)	Euro 0	5,05	4,85	0,03	1,82	1,84	0,36	13,94
	Euro 1	4,63	3,99	0,03	1,82	1,68	0,36	12,51
	Euro 2	4,15	3,30	0,03	1,82	1,51	0,36	11,16
	Euro 3	3,41	2,63	0,03	1,82	1,24	0,36	9,48
	Euro 4	3,24	1,97	0,03	1,82	1,18	0,36	8,59
	Euro 5	3,01	1,68	0,03	1,82	1,09	0,36	7,98

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
Linienbus	Euro 6	2,79	0,58	0,03	1,82	1,02	0,36	6,59
	Euro 0	18,81	34,58	0,15	4,81	5,89	0,81	65,05
	Euro 1	16,31	21,24	0,15	4,81	5,11	0,81	48,42
	Euro 2	16,45	21,38	0,15	4,81	5,15	0,81	48,75
	Euro 3	18,13	18,57	0,15	4,81	5,68	0,81	48,14
	Euro 4	18,89	12,42	0,15	4,81	5,91	0,81	42,99
Reisebus	Euro 5	19,46	9,11	0,15	4,81	6,09	0,81	40,43
	Euro 6	19,16	0,72	0,15	4,81	6,00	0,81	31,64
	Euro 0	13,20	21,96	0,09	6,03	4,64	0,81	46,72
	Euro 1	12,24	16,43	0,09	6,03	4,30	0,81	39,90
	Euro 2	11,64	16,09	0,09	6,03	4,09	0,81	38,74
	Euro 3	12,37	12,81	0,09	6,03	4,34	0,81	36,45
Lastwagen (<= 7,5t)	Euro 4	12,40	8,07	0,09	6,03	4,36	0,81	31,76
	Euro 5	12,94	5,94	0,09	6,03	4,54	0,81	30,34
	Euro 6	13,09	0,76	0,09	6,03	4,60	0,81	25,37
	80ties	6,45	10,36	0,07	3,59	3,21	0,75	24,43
	Euro I	5,58	7,09	0,07	3,59	2,77	0,75	19,85
	Euro II	5,41	7,04	0,07	3,59	2,69	0,75	19,54
	Euro III	5,69	5,01	0,07	3,59	2,82	0,75	17,94

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
	Euro IV EGR	5,78	3,39	0,07	3,59	2,87	0,75	16,45
	Euro IV SCR	5,59	2,59	0,07	3,59	2,78	0,75	15,37
	Euro V EGR	5,85	2,50	0,07	3,59	2,91	0,75	15,67
	Euro V SCR	5,59	1,56	0,07	3,59	2,78	0,75	14,34
	Euro VI	5,67	0,23	0,07	3,59	2,82	0,75	13,13
Lastwagen (>7,5t-12t)	80ties	8,65	16,60	0,07	3,59	3,72	0,75	33,38
	Euro I	7,68	9,92	0,07	3,59	3,31	0,75	25,32
	Euro II	7,46	9,93	0,07	3,59	3,21	0,75	25,01
	Euro III	7,84	7,17	0,07	3,59	3,37	0,75	22,79
	Euro IV EGR	7,90	4,77	0,07	3,59	3,40	0,75	20,47
	Euro IV SCR	7,64	3,76	0,07	3,59	3,29	0,75	19,09
	Euro V EGR	8,00	3,58	0,07	3,59	3,44	0,75	19,42
	Euro V SCR	7,63	2,48	0,07	3,59	3,29	0,75	17,80
	Euro VI	7,77	0,39	0,07	3,59	3,34	0,75	15,91
Lastwagen (>12t-14t)	80ties	9,13	17,55	0,07	3,59	3,93	0,75	35,02
	Euro I	8,09	10,59	0,07	3,59	3,48	0,75	26,58
	Euro II	7,87	10,62	0,07	3,59	3,38	0,75	26,28
	Euro III	8,23	7,78	0,07	3,59	3,54	0,75	23,96
	Euro IV EGR	8,25	5,15	0,07	3,59	3,55	0,75	21,35

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
	Euro IV SCR	7,96	3,90	0,07	3,59	3,43	0,75	19,71
	Euro V EGR	8,40	3,84	0,07	3,59	3,62	0,75	20,27
	Euro V SCR	8,01	2,61	0,07	3,59	3,45	0,75	18,48
	Euro VI	8,15	0,44	0,07	3,59	3,51	0,75	16,51
Lastwagen (>14t-20t)	80ties	11,07	21,00	0,07	4,92	4,59	0,81	42,45
	Euro I	9,39	12,61	0,07	4,92	3,89	0,81	31,69
	Euro II	9,12	12,79	0,07	4,92	3,78	0,81	31,49
	Euro III	9,55	9,41	0,07	4,92	3,96	0,81	28,71
	Euro IV EGR	9,44	6,28	0,07	4,92	3,91	0,81	25,43
	Euro IV SCR	9,07	5,01	0,07	4,92	3,76	0,81	23,63
	Euro V EGR	9,60	4,81	0,07	4,92	3,98	0,81	24,18
	Euro V SCR	9,12	3,50	0,07	4,92	3,78	0,81	22,20
	Euro VI	9,34	0,60	0,07	4,92	3,87	0,81	19,61
Lastwagen (>20t-26t)	80ties	12,96	21,85	0,07	4,92	5,37	0,81	45,98
	Euro I	11,28	15,36	0,07	4,92	4,67	0,81	37,12
	Euro II	11,05	15,59	0,07	4,92	4,58	0,81	37,01
	Euro III	11,45	11,68	0,07	4,92	4,75	0,81	33,68
	Euro IV EGR	11,26	7,87	0,07	4,92	4,66	0,81	29,59
	Euro IV SCR	10,88	5,70	0,07	4,92	4,51	0,81	26,89

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
	Euro V EGR	11,47	5,93	0,07	4,92	4,75	0,81	27,96
	Euro V SCR	10,97	3,89	0,07	4,92	4,54	0,81	25,20
	Euro VI	11,16	0,63	0,07	4,92	4,62	0,81	22,21
Lastwagen (>26t-28t)	Euro I	11,77	16,05	0,07	4,92	4,88	0,81	38,49
	Euro II	11,76	15,90	0,07	4,92	4,87	0,81	38,33
	Euro III	12,13	12,01	0,07	4,92	5,03	0,81	34,97
	Euro IV EGR	11,97	8,09	0,07	4,92	4,96	0,81	30,82
	Euro IV SCR	11,57	5,90	0,07	4,92	4,79	0,81	28,06
	Euro V EGR	12,16	6,05	0,07	4,92	5,04	0,81	29,05
	Euro V SCR	11,60	4,01	0,07	4,92	4,81	0,81	26,22
	Euro VI	11,81	0,65	0,07	4,92	4,89	0,81	23,16
Lastwagen (>28t-32t)	Euro I	13,71	18,53	0,07	4,92	5,11	0,81	43,15
	Euro II	13,58	18,34	0,07	4,92	5,06	0,81	42,79
	Euro III	14,00	13,65	0,07	4,92	5,22	0,81	38,67
	Euro IV EGR	13,98	9,14	0,07	4,92	5,21	0,81	34,14
	Euro IV SCR	13,53	6,64	0,07	4,92	5,05	0,81	31,02
	Euro V EGR	14,25	6,80	0,07	4,92	5,31	0,81	32,17
	Euro V SCR	13,61	4,41	0,07	4,92	5,07	0,81	28,90
	Euro VI	13,87	0,71	0,07	4,92	5,17	0,81	25,54

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
Lastwagen (>32t)	Euro I	13,52	18,45	0,07	4,92	5,04	0,81	42,81
	Euro II	13,30	18,58	0,07	4,92	4,96	0,81	42,64
	Euro III	13,70	14,01	0,07	4,92	5,11	0,81	38,62
	Euro IV EGR	13,58	9,40	0,07	4,92	5,06	0,81	33,84
	Euro IV SCR	13,18	6,46	0,07	4,92	4,91	0,81	30,35
	Euro V EGR	13,87	6,99	0,07	4,92	5,17	0,81	31,83
	Euro V SCR	13,28	4,33	0,07	4,92	4,95	0,81	28,36
Lastzüge/Sattelschlepper (>20-28t)	Euro VI	13,47	0,69	0,07	4,92	5,02	0,81	24,98
	80ties	12,82	21,57	0,07	4,92	4,78	0,81	44,96
	Euro I	11,39	15,27	0,07	4,92	4,25	0,81	36,70
	Euro II	11,08	15,08	0,07	4,92	4,13	0,81	36,09
	Euro III	11,49	11,26	0,07	4,92	4,28	0,81	32,83
	Euro IV EGR	11,45	7,58	0,07	4,92	4,27	0,81	29,10
	Euro IV SCR	11,05	5,72	0,07	4,92	4,12	0,81	26,69
	Euro V EGR	11,64	5,68	0,07	4,92	4,34	0,81	27,46
Lastzüge/Sattelschlepper (>28-34t)	Euro V SCR	11,11	3,81	0,07	4,92	4,14	0,81	24,86
	Euro VI	11,32	0,59	0,07	4,92	4,22	0,81	21,93
	80ties	13,43	22,71	0,07	4,92	5,01	0,81	46,96

Fahrzeugkategorie	EURONorm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
	Euro I	11,98	16,02	0,07	4,92	4,47	0,81	38,27
	Euro II	11,69	15,78	0,07	4,92	4,36	0,81	37,63
	Euro III	12,11	11,81	0,07	4,92	4,51	0,81	34,23
	Euro IV EGR	12,07	7,88	0,07	4,92	4,50	0,81	30,25
	Euro IV SCR	11,69	5,81	0,07	4,92	4,36	0,81	27,66
	Euro V EGR	12,31	5,84	0,07	4,92	4,59	0,81	28,54
	Euro V SCR	11,81	3,82	0,07	4,92	4,40	0,81	25,83
	Euro VI	11,98	0,57	0,07	4,92	4,47	0,81	22,82
Lastzüge/Sattelschlepper (>34-40t)	80ties	15,28	25,75	0,07	6,93	5,70	1,02	54,75
	Euro I	13,40	18,18	0,07	6,93	5,00	1,02	44,59
	Euro II	13,23	18,20	0,07	6,93	4,93	1,02	44,38
	Euro III	13,59	13,80	0,07	6,93	5,07	1,02	40,47
	Euro IV EGR	13,50	9,17	0,07	6,93	5,03	1,02	35,72
	Euro IV SCR	13,10	6,66	0,07	6,93	4,88	1,02	32,66
	Euro V EGR	13,81	6,87	0,07	6,93	5,15	1,02	33,85
	Euro V SCR	13,23	4,43	0,07	6,93	4,93	1,02	30,60
	Euro VI	13,41	0,64	0,07	6,93	5,00	1,02	27,07

Motoren, die vor der Einführung der Abgasnorm im Verkehr waren, werden im HBEFA 3.3 mit Euro 0 für PKW und 80ties für LKW bezeichnet.

Quelle: Berechnungen von INFRAS im Rahmen des Forschungsprojekts.

Die durchschnittlichen Umweltkosten pro Fahrzeugkm (Fzkm) sind in Tabelle 16 noch einmal ausgewiesen. Gesondert ausgewiesen sind die Umweltkosten, wenn im Sinne einer Sensitivitätsanalyse für Treibhausgase der Kostensatz von 640 EUR verwendet wird.

Tabelle 16: Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent₂₀₁₆ / Fahrzeugkilometer

Fahrzeugtyp		Umweltkosten gesamt (THG-Kostensatz 180 EUR/t CO ₂ äq.)	Sensitivitätsanalyse Umweltkosten gesamt (THG-Kostensatz 640 EUR/t CO ₂ äq.)
PKW	Benzin	6,42	17,80
PKW	Diesel	7,53	18,29
PKW	Elektro	6,10	15,57
kleines Kraftrad	Benzin	4,93	11,69
Kraftrad	Benzin	5,70	15,35
Linienbus	Diesel	41,30	107,00
Reisebus	Diesel	32,65	81,52
Personenzug, Fernverkehr	elektrisch	480,64	1.203,71
Personenzug, Nahverkehr	Gew. DS	226,54	532,63
Personen-Luftverkehr, Kurz- u. Mittelstrecken		871,39	2.328,49
Personen-Luftverkehr, Langstrecken		1.470,57	3.870,33
LNF	Benzin	6,56	17,80
LNF	Diesel	7,73	18,14
LNF	Elektro	8,02	18,71
LKW <7,5t	Diesel	13,67	34,52
LKW 7,5-14t	Diesel	18,11	47,08
LKW 14-28t	Diesel	23,97	63,29
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	29,58	80,35
Güterzug	Gew. DS	641,05	1.464,23
Güter-Luftverkehr		1.914,27	4.994,93
Motorschiffe (Binnengüterschifffahrt)		2.135,94	3.652,66
Schubverbände (Binnengüterschifffahrt)		3.932,62	6.724,13

Gew. DS = Gewichteter Durchschnitt Elektrisch/Diesel.

Bei den Angaben für den Luftverkehr wird Belly Freight anteilig berücksichtigt.

Quelle: Berechnungen von INFRAS im Rahmen des Forschungsprojekts.

Um eine Umrechnung der dargestellten Kosten pro Fahrzeugkilometer für die verschiedenen Fahrzeugtypen in Kostensätze je Personenkilometer (Pkm) und Tonnenkilometer (tkm) zu ermöglichen, benötigt man Angaben zu den Besetzungs-/Auslastungsgraden nach Fahrzeugtyp. Hier wurden Empfehlungen aus TREMOD 5.8 und für die Besetzungsgrade der Züge aus der Marktuntersuchung 2018 der Bundesnetzagentur verwendet. Die folgende Tabelle 17 fasst diese Angaben zusammen.

Tabelle 17: Verwendete Besetzungs-/Auslastungsgrade nach Fahrzeugtyp

Fahrzeugtyp	Personen / Fzg.	Tonnen / Fzg.
PKW	1,49	
Kleines Kraftrad	1,02	
Kraftrad	1,11	
Linienbus	16,5	
Reisebus	30,4	
Passagierzug, Fernverkehr	276	
Personenzug, Nahverkehr	81	
Personen-Luftverkehr (Kurz- und Mittelstrecken)	105	
Personen-Luftverkehr (Langstrecke)	257	
LKW <7,5t		0,94
LKW 7,5-14t		1,59
LKW 14-28t		3,44
LKW: Trailer 28-40t		10,75
Güterzug		499
Güter-Luftverkehr		42,1
Binnengüterschiffahrt Motorschiffe		1.060
Binnengüterschiffahrt Schubverbände		1.945

Bei den Angaben für den Luftverkehr wird Belly Freight anteilig berücksichtigt.

Für Leichte Nutzfahrzeuge (LNF) liegen keine Auslastungsdaten vor.

Quelle: TREMOD 5.8 bzw. Bundesnetzagentur, Marktuntersuchung Eisenbahn 2018.

Mit diesen Faktoren lassen sich alle in Fahrzeugkilometer angegebenen Kosten in Personenkilometer (Pkm) bzw. Tonnenkilometer (tkm) umrechnen.

Tabelle 18 stellt beispielhaft die so errechneten durchschnittlichen Umweltkosten (über alle Strecken) pro Personen- bzw. Tonnenkilometer dar. Da die Lärmkosten nicht fahrleistungsbezogen ausgewiesen werden, sind die Umweltkosten hier nicht enthalten. Gesondert ausgewiesen sind wiederum die Umweltkosten, wenn im Sinne einer Sensitivitätsanalyse für Treibhausgase der Kostensatz von 640 EUR verwendet wird.

Tabelle 18: Umweltkosten pro Personen- bzw. Tonnenkilometer für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent₂₀₁₆ / Pkm bzw. tkm

Fahrzeugtyp		Einheit	Umweltkosten gesamt (THG-Kostensatz 180 EUR/t CO ₂ äq.)	Sensitivitätsanalyse Umweltkosten gesamt (THG-Kostensatz 640 EUR/t CO ₂ äq.)
PKW	Benzin	€-Cent/Pkm	4,30	11,94
PKW	Diesel	€-Cent/Pkm	5,05	12,26
PKW	Elektro	€-Cent/Pkm	4,09	10,44
kleines Kraftrad	Benzin	€-Cent/Pkm	4,84	11,49
Kraftrad	Benzin	€-Cent/Pkm	5,13	13,83
Linienbus	Diesel	€-Cent/Pkm	2,50	6,48
Reisebus	Diesel	€-Cent/Pkm	1,07	2,68
Personenzug, Fernverkehr	elektrisch	€-Cent/Pkm	1,74	4,36
Personenzug, Nahverkehr	Gew. DS	€-Cent/Pkm	2,80	6,58
Personen-Luftverkehr	Kurz- u. Mittelstrecken	€-Cent/Pkm	8,33	22,25
Personen-Luftverkehr	Langstrecken	€-Cent/Pkm	5,73	15,07
LKW <7,5t	Diesel	€-Cent/tkm	14,48	36,56
LKW 7,5-14t	Diesel	€-Cent/tkm	11,39	29,61
LKW 14-28t	Diesel	€-Cent/tkm	6,96	18,38
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	€-Cent/tkm	2,75	7,47
Güterzug	Gew. DS	€-Cent/tkm	1,28	2,93
Güter-Luftverkehr		€-Cent/tkm	45,52	118,78
Motorschiffe (Binnengüterschifffahrt)		€-Cent/tkm	2,01	3,45
Schubverbände (Binnengüterschifffahrt)		€-Cent/tkm	2,02	3,46

Gew. DS = Gewichteter Durchschnitt Elektrisch/Diesel.

Bei den Angaben zum Luftverkehr wird Belly Freight anteilig berücksichtigt.

Quelle: Berechnungen von INFRAS im Rahmen des Forschungsprojekts.

5 Quellenverzeichnis

- Anthoff, D. (2007): Report on marginal external damage costs inventory of greenhouse gas emissions. Hamburg, Hamburg University: 47.
- Bachmann, T. M. (2018): Umweltkosten durch Treibhausgasemissionen, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, Juli 2018.
- Bachmann, T. M., van der Kamp, J. (2018): Umweltkosten der Strom- und Wärmeerzeugung, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, September 2018.
- Bieler, C., Sutter, D. (2018): Umweltkosten des Verkehrs in Deutschland, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, September 2018.
- Destatis (2017), Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, Fachserie 3 Reihe 5.1 – 2016.
- Destatis (2018): Verbraucherpreise, https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/Verbraucherpreisindizes/Tabellen/_/VerbraucherpreiseKategorien.html?cms_gtp=145110_slot%253D2, abgerufen am 19.2.2018.
- Doll, C., Sutter, D. (2018): Umweltkosten durch Lärm, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, September 2018.
- Ecoplan/INFRAS (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010 - Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten; Auftraggeber: Bundesamt für Raumentwicklung; Bern, Zürich und Altdorf.
- Gillingham, K., Nordhaus, W., Anthoff, D., Blandford, G., Bosetti, V., Christensen, P., McJeon, H., Reilly, J., Sztorc, P. (2015): Modeling Uncertainty in Climate Change: A Multi-Model Comparison. Cambridge, MA, National Bureau of Economic Research (NBER).
- Holland, M. (2014a): Cost-benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package - Version 2, Corresponding to IIASA TSAP Report 11, Version 1, EMRC: 67.
- ifeu / INFRAS / LBST (2016): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. UBA-Texte 56/2016; Dessau -Roßlau.
- INFRAS/Ecoplan (2018), Externe Effekte des Verkehrs 2015 - Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015, Auftraggeber: Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Zürich und Bern.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html , abgerufen 5.9.2018.
- IPCC (2014a): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Mills, G., Buse, A., Gimeno, B., Bermejo, V., Holland, M., Emberson, L., Pleijel, H. (2007): A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. Atmospheric Environment 41, pp. 2630-2643.
- Moore, F. C. und D. B. Diaz (2015): Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. Nature Clim. Change 5(2): 127-131.
- Preiss, P., R. Friedrich, Klotz, V. (2008): Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data (including a MS excel spreadsheet on: External costs per unit emission, Version as of August 21, 2008). Stuttgart, Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), University of Stuttgart.

van der Kamp, J., Bachmann, T. M., Preiss, P., Sutter, D., Bieler, C. (2017): Umweltkosten durch Luftschadstoffemissionen, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, Dezember 2017.

Weltbank (2018): Purchasing power parities,
<https://data.worldbank.org/indicator/PA.NUS.PRVT.PP.05?locations=DE&view=chart>, abgerufen am 19.02.2018.

WHO (2013): Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, World Health Organization, Regional Office for Europe: 54.



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/