

**Methodenkonvention 3.1
zur Ermittlung von Umweltkosten**

Kostensätze

Stand 12/2020

Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten

Kostensätze

Stand 12/2020

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:

August 2020

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Vorbemerkung.....	7
1 Bewertung von Klimafolgeschäden.....	8
1.1 Kostensatz für Kohlendioxid- und andere Treibhausgasemissionen	8
1.2 Kosten für Treibhausgasemissionen in Folge von Landnutzungsänderungen.....	11
2 Kostensätze für Luftschadstoffe	13
2.1 Durchschnittliche Kostensätze für Luftschadstoffemissionen.....	13
2.2 Differenzierte Kostensätze für Luftschadstoffemissionen aus unterschiedlichen Quellen..	15
2.3 Kostensätze für Luftschadstoffe aus dem Straßenverkehr	17
3 Umweltkosten der Strom- und Wärmeerzeugung.....	18
3.1 Umweltkosten der Stromerzeugung.....	18
3.2 Umweltkosten der Wärmeerzeugung.....	19
4 Umweltkosten des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland	21
4.1 Annahmen zur Emissionsberechnung.....	21
4.2 Kostensätze für Schäden durch Flächenverbrauch und Zerschneidung.....	23
4.3 Kostensätze für Lärm	24
4.4 Kostensätze für verkehrsbezogene Aktivitäten	27
5 Umweltkosten der Emissionen von Stickstoff (N) und Phosphor (P)	40
5.1 Emissionen in die Luft (direkt und indirekt).....	40
5.2 Emissionen in Oberflächengewässer und Grundwasser.....	41
5.3 Stickstoff- und Phosphor- Kostensätze für die Landwirtschaft.....	43
6 Umweltkosten von Baustoffen.....	45
7 Klimakosten in der Landwirtschaft.....	49
8 Anhang	54
9 Quellenverzeichnis	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	UBA-Empfehlung zu den Klimakosten in € ₂₀₂₀ / t CO ₂ äq8
Tabelle 2:	a) Kosten (negatives Vorzeichen) und Nutzen (positives Vorzeichen) gerundet pro Hektar und Jahr [€ ha ⁻¹ a ⁻¹] im Jahr der Umwandlung in der ober- und unterirdischen Biomasse nach Landnutzungsänderung für das Jahr 2017 bei einem Kostensatz von 195€/t CO ₂ äq11
Tabelle 3:	b) Kosten (negatives Vorzeichen) und Nutzen (positives Vorzeichen) gerundet pro Hektar und Jahr [€ ha ⁻¹ a ⁻¹] im Jahr der Umwandlung in der ober- und unterirdischen Biomasse nach Landnutzungsänderung für das Jahr 2017 bei einem Kostensatz von 680€/t CO ₂ äq12
Tabelle 4:	Durchschnittliche Umweltkosten der Luftverschmutzung durch Emissionen aus unbekannter Quelle (in € ₂₀₂₀ / t Emission)14
Tabelle 5:	Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen aus Kleinf Feuerungsanlagen und Verbrennungsprozessen in der Industrie (in € ₂₀₂₀ / t Emission)16
Tabelle 6:	Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen im Verkehr (in € ₂₀₂₀ / t Emission)17
Tabelle 7:	Umweltkosten der Stromerzeugung in Deutschland einschließlich Vorketten in €-Cent ₂₀₂₀ / kWh _{el}19
Tabelle 8:	Umweltkosten der Wärmeerzeugung der Haushalte in Deutschland in €-Cent ₂₀₂₀ / kWh _{Endenergie}20
Tabelle 9:	Verteilung der Fahrleistung im Straßenverkehr (innerorts, außerorts, Autobahn) nach Fahrzeugkategorie21
Tabelle 10:	Angaben zu Umweltkosten des Straßenverkehrs durch Flächenverbrauch und Zerschneidung, in €-Cent ₂₀₂₀ pro Fahrzeugkilometer23
Tabelle 11:	Kostenfunktionen für Lärmwirkungen bezogen auf L _{DEN} -Werte25
Tabelle 12:	Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach EU-Umgebungslärmrichtlinie und daraus resultierende Gesundheitskosten (Bezugsjahr der Kartierung: 2016)27
Tabelle 13:	a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Durchschnitt alle Strecken) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO ₂ äq , in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm28
Tabelle 14:	b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Durchschnitt alle Strecken) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO ₂ äq , in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm30
Tabelle 15:	a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Autobahn) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO ₂ äq in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm32

Tabelle 16:	b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Autobahn) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO ₂ äq, in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm.....	33
Tabelle 17:	a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Außerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO ₂ äq in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm	34
Tabelle 18:	b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Außerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO ₂ äq in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm	35
Tabelle 19:	a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Innerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO ₂ äq in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm	36
Tabelle 20:	b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Innerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO ₂ äq in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm	37
Tabelle 21:	Verwendete Besetzungs-/Auslastungsgrade nach Fahrzeugtyp	38
Tabelle 22:	Umweltkosten pro Personen- bzw. Tonnenkilometer für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent ₂₀₂₀ / Pkm bzw. tkm	39
Tabelle 23:	Umweltkosten durch die Emission von Stickstoff (N) in die Luft (direkt und indirekt, unbekannte Quelle).....	41
Tabelle 24:	Umweltkosten durch die Emission von Stickstoff ins Grundwasser und von Stickstoff und Phosphor als jeweils wachstumslimitierende Faktoren in Oberflächengewässern.....	42
Tabelle 25:	Umweltkosten durch die Emission von Stickstoff und Phosphor in Oberflächengewässer, wenn unbekannt ist, welcher Stoff in den betroffenen Gewässern limitierend ist	43
Tabelle 26:	Umweltkosten für Baustoffe (+) und Umweltnutzen durch Recycling von Baustoffen (-).....	47
Tabelle 27:	Klimakostensätze für die Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel (Klimakostensätze 195 € und 680€)	50
Tabelle 28:	Klimakostensätze der Produktion von Ölsaaten (Klimakostensätze 195 € und 680€)	51
Tabelle 29:	Klimakostensätze für die Produktion tierischer Nahrungsmittel (Klimakostensätze 195 € und 680€)	52
Tabelle 30:	a) Kostensätze Verkehr: differenziert nach Emissionskategorie (Euronorm) für die verschiedenen Fahrzeugtypen bei einem Kostensatz von 195€/t CO ₂ äq, in €-Cent ₂₀₂₀ / Fzkm	54
Tabelle 31:	b) Kostensätze Verkehr: differenziert nach Emissionskategorie (Euronorm) für die verschiedenen Fahrzeugtypen bei einem Kostensatz von 680€/t CO ₂ äq, in €-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm	61

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.

Die methodischen Grundlagen für den vorliegenden Bericht werden dargestellt in „Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Methodische Grundlagen“ (UBA 2018).

Die Kostensätze der überarbeiteten Kapitel 1-4 aus der Methodenkonvention 3.0 wurden ebenso wie die Kostensätze der neu hinzugekommenen Kapitel 5-7 an das Preisniveau des Jahres 2020 angepasst. Alle übrigen Daten (z.B. Emissionsfaktoren, Auslastungsgrade) beziehen sich aus Konsistenzgründen weiterhin auf die Datenbasis 2016. Insbesondere fand keine Anpassung der Emissionsfaktoren, der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte etc. statt.

Für eine Anwendung der Kostensätze auf Aktivitäten oder Emissionen nach 2020 ist eine Preisbereinigung erforderlich. Dazu empfehlen wir, die Kostensätze mit dem Verbraucherpreisindex des Statistischen Bundesamtes zu bereinigen.

1 Bewertung von Klimafolgeschäden

1.1 Kostensatz für Kohlendioxid- und andere Treibhausgasemissionen

Wir empfehlen die Verwendung eines Kostensatzes von 195 €/t CO₂ äq für das Jahr 2020 bei einer Höhergewichtung der Wohlfahrt heutiger gegenüber zukünftigen Generationen und eines Kostensatzes von 680 €/t CO₂ äq bei einer Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünftiger Generationen.¹ Zusätzlich empfehlen wir eine Sensitivitätsanalyse mit dem jeweils anderen Wert.

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

	Klimakosten in €/t CO ₂ äq		
	2020	2030	2050
1% reine Zeitpräferenzrate	195	215	250
0% reine Zeitpräferenzrate	680	700	765

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 Bundesamts².
- 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 28fachen Satz des CO₂ äq-Kostensatzes, für N₂O (Lachgas) dem 265fachen Satz³. 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 Verbrennungsprozesse in großer Höhe ein höheres Schadenspotenzial entwickeln⁴.

Die Empfehlungen der Tabelle 1 folgen dem Schadenskostenansatz und basieren auf dem Modell von Anthoff (2007) mit folgenden Spezifikationen⁵:

- 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;

¹ Bei Verwendung einer reinen Zeitpräferenzrate (RZPR) von 0% werden heutige und zukünftige Schäden gleichgewichtet. Bei Verwendung einer reinen Zeitpräferenzrate von 1% werden 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. Die Gewichtung mit RZPR=1% lässt sich als Proxy für praktische Politikrelevanz verwenden.

² <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=result&code=61111-0001&deep=true#abreadcrumb>

³ Vgl. IPCC AR5 (2014)

⁴ Vgl. ifeu / INFRAS / LBST (2016)

⁵ Vgl. auch Bachmann (2018)

- ▶ Diskontierung auf das Jahr der Emission;
- ▶ Verwendung des deutschen Verbraucherpreisindex des Statistischen Bundesamtes zur Preisbereinigung 2010-2020 (Faktor 1,13)⁶;
- ▶ Verwendung der Kaufkraftparitäten der Weltbank zur Währungsumrechnung von USD in EUR⁷.

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 195 €/2020 / t CO_{2 äq} kommt dem im 5. Sachstandsbericht des IPCC ermittelten Wert von 182€/2020 / t CO₂ nahe⁸.

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

6 Destatis (2020)

7 Weltbank (2018)

8 IPCC (2014), S. 691, Durchschnitt über alle verfügbaren Studien mit 1% reiner Zeitpräferenzrate und unterschiedlichen Annahmen zum Equity Weighting, aufgezinst auf 2020, Währungsumrechnung über Kaufkraftparitäten der Weltbank.

werden, müssen also die globalen Schäden jeweils mit dem Verhältnis der durchschnittlichen 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 gleichen Wohlfahrtsverluste zur Folge.

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.

1.2 Kosten für Treibhausgasemissionen in Folge von Landnutzungsänderungen

Aus dem Kostensatz für Treibhausgasemissionen lassen sich unter Verwendung des Treibhausgasinventars (UBA 2019a) die Kosten ableiten, die sich aus Landnutzungsänderungen ergeben, bspw. durch die Umwandlung von Wäldern in Ackerland (34.300 €/ha im Jahr der Umwandlung) oder die Versiegelung von Flächen. Umgekehrt lassen sich auch die Nutzen ableiten, bspw. durch Umwandlung von Acker in Grünland (100€/ha im Jahr der Umwandlung). In Tabelle 2 und Tabelle 3 finden sich diese Kosten bzw. Nutzen für Kostensätze von 195 €/t CO₂ äq bzw. 680€/t CO₂ äq. Sie beziehen sich auf das Jahr der Umwandlung, im Vergleich mit Folgejahren können durch Wachstumsprozesse Abweichungen auftreten.

Tabelle 2: a) Kosten (negatives Vorzeichen) und Nutzen (positives Vorzeichen) gerundet pro Hektar und Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹] im Jahr der Umwandlung in der ober- und unterirdischen Biomasse nach Landnutzungsänderung für das Jahr 2017 bei einem Kostensatz von 195€/t CO₂ äq

	Wald	Acker	Grünland i.e.S.	Gehölze	Terrestr. Feuchtgebiete	Gewässer	Siedlungen
Bewertung mittlerer Kohlenstoffvorrat in der ober- und unterirdischen Biomasse							
[€ ha ⁻¹]	39.100	4.800	4.900	30.900	13.500	0	8.900
Kosten Veränderung Biomasse [€ ha⁻¹ a⁻¹]							
Wald		-34.300	-34.200	-8.200	-25.500	-39.100	-30.200
Acker	2.500		100	26.100	8.700	-4.800	4.100
Grünland i.e.S.	2.300	-100		26.000	8.700	-4.900	4.100
Gehölze	1.400	-26.100	-26.000		-17.300	-30.900	-21.900
Terrestr. Feuchtgebiete	2.500	-8.700	-8.700	17.300		-13.500	-4.600
Gewässer	2.600	4.800	4.900	30.900	13.500		8.900
Siedlungen	2.400	-4.100	-4.100	21.900	4.600	-8.900	

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von UBA (2019a). Grünland i.e.S. umfasst Wiesen und Weiden.

Tabelle 3: b) Kosten (negatives Vorzeichen) und Nutzen (positives Vorzeichen) gerundet pro Hektar und Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹] im Jahr der Umwandlung in der ober- und unterirdischen Biomasse nach Landnutzungsänderung für das Jahr 2017 bei einem Kostensatz von 680€/t CO₂ äq

	Wald	Acker	Grünland i.e.S.	Gehölze	Terrestr. Feuchtgebiete	Gewässer	Siedlungen
Bewertung mittlerer Kohlenstoffvorrat in der ober- und unterirdischen Biomasse							
[€ ha ⁻¹]	136.300	16.700	17.000	107.600	47.200	0	31.100
Kosten Veränderung Biomasse [€ ha⁻¹ a⁻¹]							
Wald		-119.600	-119.300	-28.700	-89.100	-136.300	-105.100
Acker	8.600		300	90.900	30.500	-16.700	14.400
Grünland i.e.S.	8.100	-300		90.600	30.200	-17.000	14.200
Gehölze	4.800	-90.900	-90.600		-60.400	-107.600	-76.500
Terrestr. Feuchtgebiete	8.700	-30.500	-30.200	60.400		-47.200	-16.100
Gewässer	9.100	16.700	17.000	107.600	47.200		31.100
Siedlungen	8.500	-14.400	-14.200	76.500	16.100	-31.100	

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von UBA (2019a). Grünland i.e.S. umfasst Wiesen und Weiden.

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 von Daten aus der Literatur ermittelt (zusammengestellt in WHO 2013) und monetäre Bewertungssätze weitestgehend an aktuelle EU-Standards angeglichen (Holland 2014). Ernteaufschläge 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 4 zeigt die durchschnittlichen Umweltkosten pro emittierte Tonne des jeweiligen Schadstoffs⁹ für Emissionen aus „unbekannten Quellen“¹⁰ in Deutschland. Diese Durchschnittswerte können für eine überschlägige Schätzung der Schadenskosten durch Luftschadstoffe verwendet werden, wenn es keine spezifischen Informationen zu den Emissionsquellen gibt.

⁹ Die wichtigsten Luftschadstoffe in diesem Zusammenhang sind Feinstaub (PM), Stickstoffoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) und Ammoniak (NH₃).

¹⁰ 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 4: Durchschnittliche Umweltkosten der Luftverschmutzung durch Emissionen aus unbekannter Quelle (in €₂₀₂₀ / t Emission)

€ ₂₀₁₆ /t Emission	Kostensätze für Emissionen in Deutschland				
	Gesundheits-schäden	Biodiversitäts-verluste	Ernte-schäden	Materialschäden	Gesamt
Deutschland gesamt					
PM _{2.5}	61.500	0	0	0	61.500
PM _{coarse}	1.000	0	0	0	1.000
PM ₁₀	43.300	0	0	0	43.300
NO _x	15.200	2.800	900	100	19.000
SO ₂	14.300	1.100	-200	600	15.800
NM VOC	1.200	0	1.000	0	2.200
NH ₃	22.800	11.000	-100	0	33.700

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), eigene Berechnungen. Hinweis: Die Preisbereinigung auf 2020 erfolgte an nicht-gerundeten Werten um Rundungsfehler zu reduzieren.

Diese und die folgenden Werte beziehen sich auf Emissionen im Jahr 2016, angegeben in Preisen von 2020. 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 2020 berücksichtigt. Dazu wurde der Konsumpreisindex von Destatis verwendet, um die Kostensätze in €₂₀₂₀ umzurechnen.¹¹ 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, eine BIP-Korrektur auf 2020 erfolgte aus Konsistenzgründen nicht)¹².

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.

¹¹ Die Daten sind abrufbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/Verbraucherpreisindizes/Tabellen/VerbraucherpreiseKategorien.html>.

¹² Die Daten sind aufrufbar unter <http://ec.europa.eu/eurostat/web/national-accounts/data/main-tables>.

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 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 5 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 €₂₀₂₀ umgerechnet.

Tabelle 5: Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen aus Kleinf Feuerungsanlagen und Verbrennungsprozessen in der Industrie (in €₂₀₂₀ / t Emission)

Höhe (in m)	Gesundheitsschäden											Material- schäden	Ernte- ausfälle	Biodi- versität
	Kraft- werke	Verbrennungsprozesse in der Industrie					Kleinf Feuerungsanlagen							
		Unbekannt	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}	33.100	68.300	122.200	69.000	84.700	69.000	64.900	116.300	65.600	80.500	65.600	0	0	0
PM _{coarse}	500	1.200	2.100	1.200	1.500	1.200	1.100	1.900	1.100	1.300	1.100	0	0	0
PM ₁₀	23.300	48.200	86.200	48.600	59.700	48.600	45.800	81.900	46.200	56.800	46.200	0	0	0
NO _x	11.600	16.100	16.100	16.100	16.100	16.100	16.600	16.600	16.600	16.600	16.600	140	850	2.750
SO ₂	13.400	15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.500	15.500	15.500	15.500	15.500	640	-170	1.060
NM VOC	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	0	1.000	0
NH ₃	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	24.800	24.800	24.800	24.800	24.800	0	-190	11.990

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 nur 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 6: Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen im Verkehr (in €₂₀₂₀ / t Emission)

Umgebung	Gesundheitsschäden				Nichtgesundheitliche Schäden
	Unbekannt	Urban	Suburban	Ländlich	
PM _{2.5}	62.900	255.300	73.600	43.200	0
PM _{coarse}	1.000	4.900	1.200	600	0
PM ₁₀	7.200	30.000	8.500	4.900	0
NO _x	15.800	15.800	15.800	15.800	3.700
SO ₂	14.900	14.900	14.900	14.900	1.500
NMVOC	1.200	1.200	1.200	1.200	1.000
NH ₃	24.200	24.200	24.200	24.200	10.900

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 nur die Schäden durch sekundäre Feinstaubbildung ab.

Hinweis: Die Preisbereinigung auf 2020 erfolgte an nicht-gerundeten Werten um Rundungsfehler zu reduzieren.

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.

Tabelle 7: Umweltkosten der Stromerzeugung in Deutschland einschließlich Vorketten in €-Cent₂₀₂₀ / kWh_{el}

Stromerzeugung durch	Luftschadstoffe	Treibhausgase (195 €/tCO ₂ äq)	Treibhausgase (680 €/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (195€/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (680 €/tCO ₂ äq)
Fossile Energien					
Braunkohle	2,05	20,65	71,56	22,70	73,61
Steinkohle	1,68	18,82	66,91	20,50	66,91
Erdgas	0,87	8,51	29,48	9,38	30,34
Öl	5,18	16,56	57,41	21,74	62,60
Erneuerbare Energien					
Wasserkraft	0,06	0,26	0,91	0,33	0,97
Windenergie*	0,11	0,20	0,68	0,30	0,79
Photovoltaik	0,43	1,35	4,67	1,78	5,09
Biomasse**	3,94	4,84	16,77	8,78	20,71

* 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 und van der Kamp (2018) und eigenen Berechnungen.

Die Umweltkosten des Strommix in Deutschland betragen für 2019 ca. 12,0 €-Cent / kWh_{el} (38,1 €-Cent / kWh_{el} bei einem Kostensatz von 640 €/t CO₂ äq), wobei auch hier die Emissionsfaktoren des Jahres 2016 zu Grunde gelegt wurden.

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 3.0 die Emissionsfaktoren der Technologie mit den höchsten Umweltkosten, in diesem Fall also Braunkohle, zu verwenden.¹³

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.

¹³ Ausführlicher zu diesem Vorgehen vgl. „Methodenkonvention 3.0 - Methodische Grundlagen“ Kap. 2.5.4. Dieser Empfehlung wurde auch bei der Ermittlung des o.g. Umweltkostensatzes für den Strommix 2019 in Deutschland gefolgt.

Tabelle 8: Umweltkosten der Wärmeerzeugung der Haushalte in Deutschland in €-Cent₂₀₂₀ / kWh_{Endenergie}

Wärmeerzeugung durch	Luftschadstoffe	Treibhausgase (195 €/tCO ₂ äq)	Treibhausgase (680 €/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (195 €/tCO ₂ äq)	Umweltkosten gesamt (680 €/tCO ₂ äq)
Fossile Energien					
Heizöl	0,86	6,27	21,74	7,14	22,59
Erdgas	0,41	4,90	17,00	5,32	17,41
Braunkohle (Brikett)	4,18	8,43	29,22	12,61	33,39
Fernwärme mit Netzverlusten*	1,37	6,25	21,66	7,62	23,05
Stromheizung mit Netzverlusten**	1,75	11,97	41,47	13,71	43,22
Erneuerbare Energien					
Solarthermie	0,21	0,24	0,83	0,45	1,03
Oberflächen-geothermie	0,74	3,95	13,70	4,69	14,43
Tiefengeothermie	0,01	0,01	0,04	0,02	0,05
Biomasse***	2,24	0,66	2,28	2,90	4,54

* 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 Deutschland

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 9) entsprechen den Angaben aus dem vom Umweltbundesamt verwendeten Modell TREMOD (Transport Emission Model).

Tabelle 9: 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 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.

Im Flugverkehr findet die Verbrennungsreaktion für den größten Teil des zurückgelegten Flugweges in großen Höhen statt und entfaltet dort eine Klimaschädlichkeit, die über die reine Emission der Treibhausgase hinausgeht. 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

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.

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

Tabelle 10: Angaben zu Umweltkosten des Straßenverkehrs durch Flächenverbrauch und Zerschneidung, in €-Cent₂₀₂₀ pro Fahrzeugkilometer

Fahrzeugkategorie	Kosten durch Flächenverbrauch und Zerschneidung [€-Cent ₂₀₂₀ /Fzkm]
PKW	0,36
Busse	0,85
Kleines Kraftrad	0,12
Kraftrad	0,16
Personenzug, Nahverkehr	41,75
Personenzug, Fernverkehr	62,63
Personen-Luftverkehr (Kurz- und Mittelstrecke; <2.000 km)	9,01
Personen-Luftverkehr (Langstrecke; > 2.000 km)	16,54
Leichte Nutzfahrzeuge (LNF)	0,38
LKW <7,5t	0,43
LKW 7,5-14t	0,79
LKW 14-28t	0,85
LKW: Trailer 28-40t	1,07
Güterzug	130,49
Güter-Luftverkehr	27,28

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

Quelle: INFRAS (2018), Umweltkosten Verkehr, Exceltool und eigene Berechnungen.

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

¹⁸ Vgl. Destatis (2017a).

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 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 11 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 11: 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	0	0										0	0	0
40-44	0	0	0										0	0	0
45-49	29,46	9,40	30,95										29,46	9,40	30,95
50-54	59,20	20,71	85,96										59,2	20,71	85,96
55-59	98,60	40,81	164,14										98,60	40,81	164,14
60-64	157,05	76,60	264,63										157,05	76,60	264,63
65-69	243,95	134,93	386,56										243,95	134,93	386,56
70-74	368,66	222,72	529,03										368,66	222,72	529,03
>= 75	540,56	346,83	691,18										540,56	346,83	691,18
Gesamtergebnis physische Gesundheitsfolgen															
45-49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50-54	0,12	0,08	0,05	0,23	0,19	0,18	0,99	0,12	0,88	0,04	0,01	0,02	1,38	0,40	1,14
55-59	0,56	0,40	0,31	1,47	1,16	1,11	3,88	0,56	3,25	0,19	0,04	0,09	6,10	2,16	4,76
60-64	1,33	0,98	0,96	3,73	2,89	3,36	7,80	1,70	6,88	0,44	0,11	0,33	13,3	5,68	11,52
65-69	2,40	1,85	2,34	6,07	4,70	7,48	12,79	3,92	13,34	0,75	0,23	0,97	22,01	10,70	24,12

	Kostenfunktionen nach Kategorien (EUR/Person, a)												Gesamtkosten (EUR/Person, a)		
70-74	3,64	2,91	4,23	8,46	6,56	13,03	18,44	6,77	21,83	1,08	0,39	1,94	31,62	16,64	41,02
>= 75	4,89	3,96	6,13	10,85	8,42	18,57	24,08	9,62	30,32	1,42	0,55	2,90	41,24	22,57	57,93

Gesamtergebnis kognitive und psychische Beeinträchtigungen

45-49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50-54	1,53	1,51	1,11	0,17	0,16	0	0,22	0,21	0	0,15	0,15	0	2,06	2,02	1,11
55-59	9,08	8,98	7,01	0,81	0,77	0	1,05	1,00	0	0,74	0,69	0	11,67	11,45	7,01
60-64	21,33	21,15	18,00	1,45	1,38	0,15	1,88	1,80	0,19	1,32	1,25	0,13	25,99	25,58	18,46
65-69	33,6	33,34	30,6	2,08	1,99	0,92	2,73	2,59	1,20	1,90	1,80	0,83	40,31	39,72	33,55
70-74	45,86	45,52	44,78	2,73	2,60	2,31	3,56	3,38	3,01	2,47	2,36	2,10	54,63	53,86	52,20
>= 75	58,13	57,70	58,97	3,37	3,21	3,71	4,39	4,18	4,82	3,05	2,91	3,36	68,94	67,99	70,85

Gesamtergebnis über alle Endpunkte (ohne selbstberichtete Schlafstörungen)

35-39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45-49	29,46	9,40	30,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29,46	9,40	30,95
50-54	60,85	22,31	87,11	0,40	0,35	0,18	1,21	0,32	0,88	0,19	0,15	0,02	62,65	23,13	88,20
55-59	108,24	50,2	171,45	2,29	1,93	1,11	4,93	1,56	3,25	0,93	0,74	0,09	116,38	54,42	175,9
60-64	179,73	98,74	283,58	5,18	4,26	3,51	9,69	3,50	7,07	1,76	1,36	0,45	196,34	107,85	294,61
65-69	279,94	170,13	419,48	8,16	6,69	8,39	15,52	6,51	14,54	2,64	2,03	1,80	306,27	185,35	444,22
70-74	418,16	271,15	578,04	11,19	9,16	15,34	22,00	10,15	24,84	3,56	2,75	4,03	454,91	293,21	622,25
>= 75	603,57	408,49	756,28	14,22	11,64	22,28	28,47	13,80	35,14	4,49	3,45	6,25	650,74	437,38	819,95

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

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 Ergebnisse der Lärmkartierung für das Jahr 2017 sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Tabelle zeigt die Anzahl der Personen, die im Bezugsjahr 2016 durch die einzelnen Verkehrsträger belastet wurden. Diese Angaben wurden mit in Tabelle 11 angegebenen Kostenfunktionen verschnitten. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach EU-Umgebungslärmrichtlinie und daraus resultierende Gesundheitskosten (Bezugsjahr der Kartierung: 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 [€]	461.018.066	473.028.062	505.122.947	287.637.399	42.428.474
Gesundheitskosten durch Schienenverkehrslärm [€]	206.101.230	177.464.312	125.963.221	67.906.938	40.501.815
Gesundheitskosten durch Fluglärm [€]	106.667.973	60.630.396	13.637.510	2.302.322	0

Quelle: Lärmkartierung und eigene Berechnungen. Die EU-Umgebungslärmrichtlinie führt tendenziell zu einer Unterschätzung der Gesamtlärmbetroffenen, da die Kartierung nicht alle Quellen von Verkehrslärm abdeckt.

Es ergaben sich somit in Deutschland für das Jahr 2016 Gesundheitskosten in Höhe von insgesamt 1,77 Mrd. €₂₀₂₀ durch Straßenverkehrslärm, 618 Mio. €₂₀₂₀ durch Schienenverkehrslärm und 183 Mio. €₂₀₂₀ 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 13a und b dargestellten Kostensätze für Verkehr in €-Cent₂₀₂₀ 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 fahrleistungsbezogener Maßnahmen oder der Verkehrsentwicklung monetär bewerten. Beispielweise 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. Bei den Kostensätzen der Methodenkonvention 3.1 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.

Tabelle 13: a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Durchschnitt alle Strecken) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO₂ äq, in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug-kategorie	Emissi- ons- konzept	Betrieb				Vorprozesse		Fläche nver- brauch u. Zer- schnei- dung	Gesamt
		Treib- hausgase	Luft- schad- stoffe Auspu- f	Luft- schad- stoffe Abrie- b	Lärm	Infra- struktur u. Fahrzeuge	Energie- bereit- stellung		
PKW	Benzin	3,01	0,32	0,03	***	2,22	1,01	0,36	6,95
PKW	Diesel	2,58	1,57	0,03	***	2,53	1,04	0,36	8,11
PKW	Elektro	0	0	0,03	***	3,38	2,82	0,36	6,58
kleines Kraftrad	Benzin	1,57	0,75	0,01	***	2,22	0,64	0,12	5,30
Kraftrad	Benzin	1,96	0,57	0,01	***	2,39	1,08	0,16	6,16
Linienbus	Diesel	20,66	11,34	0,16	***	5,18	6,39	0,85	44,58
Reisebus	Diesel	13,84	9,11	0,09	***	6,50	4,80	0,85	35,19
Personenzug, Fernverkehr	Elektris- ch	0	0	0,68	***	216,51	238,12	62,63	517,94
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	19,19	21,61	0,35	***	63,54	97,09	41,75	243,53

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.

Fahrzeug- kategorie	Emissi- ons- konzept	Betrieb				Vorprozesse		Fläche nver- brauch u. Zer- schnei- dung	Gesamt
		Treib- hausgase	Luft- schad- stoffe Auspu- f	Luft- schad- stoffe Abrie- b	Lärm	Infra- struktur u. Fahrzeuge	Energie- bereit- stellung		
Personen- Luftverkehr, Kurz- und Mittelstrecke n		504,61	254,34	0	***	21,6	151,84	9,01	941,40
Personen- Luftverkehr, Langstrecken		836,97	458,06	0	***	24,2	251,97	16,54	1.587,74
LNF	Benzin	3,09	0,63	0,03	***	1,79	1,19	0,38	7,10
LNF	Diesel	2,58	2,10	0,03	***	1,95	1,28	0,38	8,32
LNF	Elektro	0	0	0,03	***	3,03	5,19	0,38	8,63
LKW <7,5t	Diesel	6,21	2,41	0,07	***	2,60	3,02	0,43	14,74
LKW 7,5-14t	Diesel	8,50	2,74	0,07	***	3,86	3,59	0,79	19,55
LKW 14-28t	Diesel	11,55	3,42	0,07	***	5,28	4,70	0,85	25,88
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	14,65	3,37	0,07	***	7,44	5,38	1,07	31,99
Güterzug	gew. DS	18,16	25,59	0,81	***	297,42	216,00	130,49	688,47
Güter- Luftverkehr		1.078,24	612,89	0	***	23,85	323,82	27,28	2.066,09
Motorschiffe (Binnengüters- chiffahrt)		551,75	934,75	0	***	634,73	152,72	0	2.273,94
Schub- verbände (Binnengüters- chiffahrt)		1.003,66	1.718, 70	0	***	1.164,32	300,02	0	4.186,68

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 und eigene Berechnungen.

Tabelle 14: b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Durchschnitt alle Strecken) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO₂ äq, in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug- kategorie	Emissio- ns- konzept	Betrieb				Vorprozesse		Fläche nver- brauch u. Zer- schneid- ung	Gesamt
		Treib- hausgase	Luftschad- stoffe Auspuff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Lärm	Infra- struktur u. Fahr- zeuge	Energie bereit- stell- ung		
PKW	Benzin	10,45	0,32	0,03	***	5,14	2,68	0,36	18,97
PKW	Diesel	8,95	1,57	0,03	***	5,77	2,80	0,36	19,47
PKW	Elektro	0	0	0,03	***	7,35	8,85	0,36	16,58
kleines Kraftrad	Benzin	5,44	0,75	0,01	***	4,68	1,46	0,12	12,45
Kraftrad	Benzin	6,81	0,56	0,01	***	6,35	2,46	0,16	16,35
Linienbus	Diesel	71,58	11,34	0,16	***	12,84	17,20	0,85	113,96
Reisebus	Diesel	47,95	9,11	0,09	***	15,87	12,92	0,85	86,80
Personenzug, Fernverkehr	Elektrisc h	0	0	0,69	***	496,56	722,51	62,63	1.282,39
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	66,52	21,61	0,35	***	145,73	290,95	41,76	566,92
Personen- Luftverkehr, Kurz- und Mittelstrecke n		1.748,79	254,34	0	***	55,48	412,86	9,01	2.480,48
Personen- Luftverkehr, Langstrecken		2.900,65	458,06	0	***	62,14	685,15	16,54	4.122,54
LNF	Benzin	10,69	0,63	0,03	***	4,10	3,14	0,38	18,96
LNF	Diesel	8,95	2,09	0,03	***	4,42	3,43	0,38	19,30
LNF	Elektro	0	0	0,03	***	6,52	12,99	0,38	19,91
LKW <7,5t	Diesel	21,5	2,41	0,07	***	5,90	6,44	0,43	36,76
LKW 7,5-14t	Diesel	29,45	2,74	0,07	***	8,82	8,27	0,78	50,14
LKW 14-28t	Diesel	40,02	3,42	0,07	***	11,97	11,07	0,86	67,41
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	50,75	3,37	0,07	***	16,89	13,45	1,07	85,61
Güterzug	gew. DS	62,96	25,58	0,81	***	686,87	650,68	130,49	1.557,39

		Betrieb				Vorprozesse		Fläche nver- brauch u. Zer- schneid ung	Gesamt
Güter- Luftverkehr		3.736,82	612,88	0	***	61,25	881,86	27,28	5.320,10
Motorschiffe (Binnengüters chiffahrt)		1.912,15	934,75	0	***	641,05	388,05	0	3876,00
Schub- verbände (Binnengüters chiffahrt)		3.478,33	1.718,70	0	***	1.175,92	762,32	0	7135,27

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 und eigene Berechnungen.

Tabelle 15: a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Autobahn) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO₂ äq in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug-kategorie	Emissions-konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächen-verbrauch und Zer-schneid-ung	Gesamt
		Treib-haus-gase	Luftschad-stoffe Auspuff	Luft-schad-stoffe Abrieb	Lärm	Infra-struktur und Fahr-zeuge	Energie-bereit-stellung		
PKW	Benzin	3,45	0,41	0,02	***	2,22	1,01	0,36	7,47
PKW	Diesel	2,64	1,95	0,02	***	2,53	1,04	0,36	8,53
PKW	Elektro	0	0	0,02	***	3,38	2,82	0,36	6,57
kleines Kraftrad	Benzin	2,41	1,14	0,01	***	2,22	0,64	0,12	6,53
Kraftrad	Benzin	2,53	1,36	0,01	***	2,39	1,08	0,16	7,52
Linienbus	Diesel	13,91	6,11	0,04	***	5,18	6,39	0,85	32,49
Reisebus	Diesel	13,20	7,89	0,04	***	6,50	4,80	0,85	33,28
LNF	Benzin	3,23	0,73	0,02	***	1,79	1,19	0,38	7,33
LNF	Diesel	2,64	3,04	0,02	***	1,95	1,28	0,38	9,31
LNF	Elektro	0	0	0,02	***	3,03	5,19	0,38	8,62
LKW <7,5t	Diesel	6,39	2,35	0,04	***	2,60	3,02	0,43	14,83
LKW 7,5-14t	Diesel	8,62	2,55	0,04	***	3,86	3,59	0,79	19,45
LKW 14-28t	Diesel	11,39	2,65	0,04	***	5,28	4,70	0,85	24,92
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	14,16	2,86	0,04	***	7,44	5,38	1,07	30,96

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 16: b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Autobahn) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO₂ äq, in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug-kategorie	Emissions-konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächen-verbrauch und Zer-schneid-ung	Gesamt
		Treib-haus-gase	Luftschad-stoffe Auspuff	Luft-schad-stoffe Abrieb	Lärm	Infra-struktur und Fahr-zeuge	Energie-bereit-stellung		
PKW	Benzin	11,95	0,41	0,02	***	5,14	2,68	0,36	20,55
PKW	Diesel	9,13	1,95	0,02	***	5,77	2,80	0,36	20,03
PKW	Elektro	0	0	0,02	***	7,35	8,85	0,36	16,57
kleines Kraftrad	Benzin	8,34	1,13	0,01	***	4,68	1,46	0,12	15,74
Kraftrad	Benzin	8,76	1,36	0,01	***	6,35	2,46	0,16	19,10
Linienbus	Diesel	48,21	6,11	0,04	***	12,84	17,20	0,85	85,24
Reisebus	Diesel	45,76	7,89	0,04	***	15,87	12,92	0,85	83,34
LNF	Benzin	11,21	0,73	0,02	***	4,10	3,14	0,38	19,58
LNF	Diesel	9,13	3,05	0,02	***	4,42	3,43	0,38	20,43
LNF	Elektro	0	0	0,02	***	6,52	12,99	0,38	19,91
LKW <7,5t	Diesel	22,17	2,34	0,04	***	5,90	6,44	0,43	37,32
LKW 7,5-14t	Diesel	29,84	2,55	0,04	***	8,82	8,27	0,78	50,32
LKW 14-28t	Diesel	39,45	2,65	0,04	***	11,97	11,07	0,86	66,05
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	49,06	2,86	0,04	***	16,89	13,45	1,07	83,38

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 17: a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Außerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO₂ äq in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug-kategorie	Emissio-ns-konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächen-verbrauch und Zer-schneidung	Gesamt
		Treib-haus-gase	Luft-schad-stoffe Auspuff	Luftschad-stoffe Abrieb	Lärm	Infra-struktur und Fahr-zeuge	Energie-bereit-stellung		
PKW	Benzin	2,53	0,29	0,02	***	2,22	1,01	0,36	6,43
PKW	Diesel	2,23	1,27	0,02	***	2,53	1,04	0,36	7,46
PKW	Elektro	0	0	0,02	***	3,38	2,82	0,36	6,57
kleines Kraftrad	Benzin	1,51	0,72	0	***	2,22	0,64	0,12	5,20
Kraftrad	Benzin	1,83	0,54	0	***	2,39	1,08	0,16	5,99
Linienbus	Diesel	17,89	8,00	0,06	***	5,18	6,39	0,85	38,38
Reisebus	Diesel	13,28	8,52	0,06	***	6,50	4,80	0,85	34,01
Personenzug, Fernverkehr	Elek-trisch	0	0	0,68	***	216,51	238,12	62,63	517,94
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	19,19	21,38	0,24	***	63,54	97,09	41,75	243,20
LNF	Benzin	2,66	0,56	0,01	***	1,79	1,19	0,38	6,58
LNF	Diesel	2,23	1,82	0,01	***	1,95	1,28	0,38	7,67
LNF	Elektro	0	0	0,01	***	3,03	5,19	0,38	8,61
LKW < 7,5t	Diesel	5,79	2,21	0,05	***	2,60	3,02	0,43	14,10
LKW 7,5-14t	Diesel	8,00	2,47	0,05	***	3,86	3,59	0,79	18,77
LKW 14-28t	Diesel	11,22	3,41	0,05	***	5,28	4,70	0,85	25,52
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	14,58	3,50	0,05	***	7,44	5,38	1,07	32,02
Güterzug	gew. DS	18,16	25,19	0,55	***	297,42	216,00	130,49	687,81

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 18: b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Außerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO₂ äq in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug-kategorie	Emissions-konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächen-verbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhaus-gase	Luft-schad-stoffe Auspuff	Luftschad-stoffe Abrieb	Lärm	Infra-struktur und Fahr-zeuge	Energie-bereit-stellung		
PKW	Benzin	8,76	0,30	0,02	***	5,14	2,68	0,36	17,25
PKW	Diesel	7,75	1,27	0,02	***	5,77	2,80	0,36	17,96
PKW	Elektro	0	0	0,02	***	7,35	8,85	0,36	16,57
kleines Kraftrad	Benzin	5,23	0,71	0	***	4,68	1,46	0,12	12,21
Kraftrad	Benzin	6,34	0,54	0	***	6,35	2,46	0,16	15,86
Linienbus	Diesel	62,01	8,00	0,06	***	12,84	17,20	0,85	100,95
Reisebus	Diesel	46,02	8,52	0,06	***	15,87	12,92	0,85	84,24
Personenzug, Fernverkehr	Elektrisch	0	0	0,46	***	496,56	722,51	62,63	1.282,17
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	66,52	21,38	0,24	***	145,73	290,95	41,76	566,57
LNF	Benzin	9,20	0,56	0,02	***	4,10	3,14	0,38	17,39
LNF	Diesel	7,75	1,82	0,02	***	4,42	3,43	0,38	17,82
LNF	Elektro	0	0	0,02	***	6,52	12,99	0,38	19,90
LKW < 7,5t	Diesel	20,08	2,21	0,05	***	5,90	6,44	0,43	35,10
LKW 7,5-14t	Diesel	27,73	2,47	0,05	***	8,82	8,27	0,78	48,13
LKW 14-28t	Diesel	38,91	3,41	0,05	***	11,97	11,07	0,86	66,27
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	50,53	3,49	0,05	***	16,89	13,45	1,07	85,49
Güterzug	gew. DS	62,96	25,19	0,55	***	686,87	650,68	130,49	1.556,73

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 19: a) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Innerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 195€/t CO₂ äq in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug- kategorie	Emissions- konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächen- ver- brauch und Zer- schneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Auspuff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Lärm	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
PKW	Benzin	3,22	0,27	0,11	***	2,22	1,01	0,36	7,19
PKW	Diesel	2,97	1,68	0,11	***	2,53	1,04	0,36	8,68
PKW	Elektro	0	0	0,11	***	3,38	2,82	0,36	6,66
kleines Kraftrad	Benzin	1,42	0,68	0,03	***	2,22	0,64	0,12	5,12
Kraftrad	Benzin	2,00	0,38	0,03	***	2,39	1,08	0,16	6,04
Linienbus	Diesel	23,02	14,63	0,86	***	5,18	6,39	0,85	50,93
Reisebus	Diesel	19,07	17,75	0,86	***	6,50	4,80	0,85	49,84
Personenzug, Fernverkehr	elektrisch	0	0	2,85	***	216,51	238,12	62,63	520,11
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	19,19	23,93	1,45	***	63,54	97,09	41,75	246,96
LNF	Benzin	3,24	0,63	0,11	***	1,79	1,19	0,38	7,33
LNF	Diesel	2,97	2,05	0,11	***	1,95	1,28	0,38	8,73
LNF	Elektro	0	0	0,11	***	3,03	5,19	0,38	8,70
LKW <7,5t	Diesel	5,66	3,80	0,80	***	2,60	3,02	0,43	16,31
LKW 7,5-14t	Diesel	8,99	5,29	0,80	***	3,86	3,59	0,79	23,32
LKW 14-28t	Diesel	14,28	8,26	0,80	***	5,28	4,70	0,85	34,17
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	19,56	8,53	0,80	***	7,44	5,38	1,07	42,79
Güterzug	gew. DS	18,16	29,48	3,39	***	297,42	216,00	130,49	694,94

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 20: b) Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Innerorts) für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland bei einem Kostensatz von 680€/t CO₂ äq in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeugkategorie	Emissionskonzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhausgase	Luftschadstoffe Auspuff	Luftschadstoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereitstellung		
PKW	Benzin	11,15	0,28	0,11	***	5,14	2,68	0,36	19,71
PKW	Diesel	10,27	1,69	0,11	***	5,77	2,80	0,36	20,99
PKW	Elektro	0	0	0,11	***	7,35	8,85	0,36	16,66
kleines Kraftrad	Benzin	4,92	0,69	0,03	***	4,68	1,46	0,12	11,89
Kraftrad	Benzin	6,94	0,38	0,03	***	6,35	2,46	0,16	16,31
Linienbus	Diesel	79,79	14,63	0,86	***	12,84	17,20	0,85	126,17
Reisebus	Diesel	66,09	17,75	0,86	***	15,87	12,92	0,85	114,36
Personenzug, Fernverkehr	elektrisch	0	0	2,86	***	496,56	722,51	62,63	1.284,56
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	66,52	23,94	1,46	***	145,73	290,95	41,76	570,35
LNF	Benzin	11,21	0,63	0,10	***	4,10	3,14	0,38	19,56
LNF	Diesel	10,27	2,05	0,10	***	4,42	3,43	0,38	20,66
LNF	Elektro	0	0	0,10	***	6,52	12,99	0,38	19,99
LKW <7,5t	Diesel	19,62	3,80	0,80	***	5,90	6,44	0,43	37,00
LKW 7,5-14t	Diesel	31,14	5,29	0,80	***	8,82	8,27	0,78	55,11
LKW 14-28t	Diesel	49,47	8,26	0,80	***	11,97	11,07	0,86	82,43
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	67,80	8,53	0,80	***	16,89	13,45	1,07	108,55
Güterzug	gew. DS	62,96	29,49	3,39	***	686,87	650,68	130,49	1.563,86

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.

Detaillierte Daten zu den Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer für die verschiedenen Euronorm-Klassen finden sich im Anhang.

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 21 fasst diese Angaben zusammen.

Tabelle 21: 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
Binnengüterschifffahrt Motorschiffe		1.060
Binnengüterschifffahrt 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 22 stellt beispielhaft die so errechneten durchschnittlichen Umweltkosten (über alle Strecken, Emissionsfaktoren für 2016) pro Personen- bzw. Tonnenkilometer dar. Da die Lärmkosten nicht fahrleistungsbezogen ausgewiesen werden, sind diese hier nicht enthalten. Gesondert ausgewiesen sind wiederum die Umweltkosten, wenn für Treibhausgase der Kostensatz von 680 EUR verwendet wird.

Tabelle 22: Umweltkosten pro Personen- bzw. Tonnenkilometer für verschiedene Fahrzeugtypen in Deutschland in €-Cent₂₀₂₀ / Pkm bzw. tkm

Fahrzeugtyp		Einheit	Umweltkosten gesamt (THG-Kostensatz 195 EUR/t CO ₂ äq.)	Umweltkosten gesamt (THG-Kostensatz 680 EUR/t CO ₂ äq.)
PKW	Benzin	€-Cent/Pkm	4,66	12,72
PKW	Diesel	€-Cent/Pkm	5,43	13,05
PKW	Elektro	€-Cent/Pkm	4,41	11,12
kleines Kraftrad	Benzin	€-Cent/Pkm	5,21	12,23
Kraftrad	Benzin	€-Cent/Pkm	5,55	14,73
Linienbus	Diesel	€-Cent/Pkm	2,70	6,90
Reisebus	Diesel	€-Cent/Pkm	1,16	2,85
Personenzug, Fernverkehr	elektrisch	€-Cent/Pkm	1,88	4,65
Personenzug, Nahverkehr	Gew. DS	€-Cent/Pkm	3,01	7,00
Personen-Luftverkehr	Kurz- u. Mittelstrecken	€-Cent/Pkm	9,00	23,7
Personen-Luftverkehr	Langstrecken	€-Cent/Pkm	6,18	16,06
LKW <7,5t	Diesel	€-Cent/tkm	15,61	38,93
LKW 7,5-14t	Diesel	€-Cent/tkm	12,29	31,54
LKW 14-28t	Diesel	€-Cent/tkm	7,52	19,58
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	€-Cent/tkm	2,97	7,96
Güterzug	Gew. DS	€-Cent/tkm	1,38	3,12
Güter-Luftverkehr		€-Cent/tkm	49,13	126,51
Motorschiffe (Binnengüterschifffahrt)		€-Cent/tkm	2,14	3,66
Schubverbände (Binnengüterschifffahrt)		€-Cent/tkm	2,15	3,67

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 Umweltkosten der Emissionen von Stickstoff (N) und Phosphor (P)

Umweltschäden durch Emissionen von Stickstoff und Phosphor entstehen entlang verschiedener Wirkungspfade. Stickstoffemissionen führen u.a. zur Belastung von Grundwasser und Luft und dadurch zu Gesundheitskosten und Kosten der Wasseraufbereitung, Stickstoff- und Phosphoremissionen führen u.a. zur Belastung von Oberflächengewässern durch Eutrophierung und Versauerung und dadurch zur Beeinträchtigung und dem Verlust von Ökosystemen. Die Kosten für Emissionen in die Luft, in Grundwasser und Oberflächengewässer werden im Folgenden einzeln dargestellt. Bei der Anwendung ist jeweils zu entscheiden, welcher Wirkungspfad oder welche Wirkungspfade im konkreten Fall relevant sind. Für die Versauerung von Böden und die dadurch entstehenden Schäden an Ökosystemen konnten keine Schadenskosten ermittelt werden.

5.1 Emissionen in die Luft (direkt und indirekt)

Für die Emission von Phosphor in die Luft liegen keine Daten zur Schadwirkung vor. Entsprechend lassen sich auch keine Schadenskosten ermitteln. Für die Emission von Stickstoff empfehlen wir folgende Kostensätze entsprechend der jeweiligen Schadwirkung, wenn keine Angaben zur Emissionsquelle vorliegen (Werte analog der Kostensätze für N-Verbindungen im Kapitel Luftschadstoffe und des Wertes für N₂O im Kapitel „Treibhausgase“):

Tabelle 23: Umweltkosten durch die Emission von Stickstoff (N) in die Luft (direkt und indirekt, unbekannte Quelle)

N-Verbindung	Wirkungskategorie	Kostensatz € ₂₀₂₀ /kg N
Stickoxide (NO _x)	- Gesundheit	49,9
	- Biodiversität	9,1
	- Ernteaufälle	2,8
	- Gebäude/Material	0,5
	Gesamt	62,2
Ammoniak (NH ₃)	- Gesundheit	27,7
	- Biodiversität	13,4
	- Ernteaufälle ²⁰	-0,1
	- Gebäude/Material	0
	Gesamt	40,9
Distickstoffoxid (Lachgas - N ₂ O)	- Klimawirkung	78,9
	- Ozon-Abbau ²¹	1,2
	Gesamt	80,2

Quelle: Schäppi et al. (2019), eigene Berechnungen; Kosten für Biodiversitätsverluste enthalten Schäden in Folge von Eutrophierung und Versauerung durch Deposition. Hinweis: Im Unterschied zu den Kapiteln „Luftschadstoffe“ und „Treibhausgase“ beziehen sich die Kostensätze hier auf 1kg N, nicht auf 1kg der jeweiligen chemischen Verbindung (NO_x, NH₃, N₂O); indirekte Emissionen entstehen beispielsweise durch die Emission von N₂O aus Böden oder durch den Beitrag von NO_x zur Entstehung von Feinstaub.

5.2 Emissionen in Oberflächengewässer und Grundwasser

Bei der Ermittlung der Schäden durch die Emission von Stickstoff und Phosphor in Oberflächengewässer ist zu berücksichtigen, dass diese Stoffe beim Eintrag in Gewässer erst im Zusammenspiel eine schädigende Wirkung durch Eutrophierung entfalten. Da Pflanzen zum Wachstum ein Verhältnis von ca. 16 Teilen Stickstoff zu 1 Teil Phosphor benötigen, wirkt in fast allen Fällen einer der beiden Stoffe wachstumslimitierend. Die Emission des anderen Stoffes in das entsprechende Gewässer erzeugt dann zumindest kurzfristig keinen zusätzlichen Schaden.

Bei der ausschließlichen Bewertung des limitierenden Stoffes bleibt jedoch unberücksichtigt, dass insgesamt die Konzentrationen von beiden Stoffen in den Gewässern zu hoch sind, also durch beide Stoffe mindestens potentiell Schäden entstehen. Die angegebenen Umweltkosten sind daher als **Schadensuntergrenze** zu verstehen, weil bei Ansatz eines Kostensatzes von 0 für den nichtlimitierenden Stoff unterschlagen wird, dass auch dieser in den meisten Fällen bereits

²⁰ Ernteaufälle in Folge von Bodenversauerung sind hier auf Grund fehlender Daten nicht berücksichtigt.

²¹ Nach Compton et al. (2011) basierend auf Ravishankara et al. (2009).

in größerer Konzentration vorhanden ist, als für einen guten Gewässerzustand angemessen wäre.

Die Emission von Stickstoff in Oberflächengewässer trägt außerdem zur Versauerung bei. Für diesen Effekt konnten jedoch keine Schadenskosten ermittelt werden.

Im Folgenden werden die Umweltkosten von N und P zunächst für den Fall ausgewiesen, dass der jeweilige Stoff für die Eutrophierung des in Frage stehenden Gewässers der limitierende Faktor ist. Daher wird den Stoffen jeweils die komplette Umweltwirkung angelastet. Bei der Ermittlung der Umweltkosten im Einzelfall ist zu entscheiden, welcher Stoff limitierend wirkt. Nur diesem sind die Umweltkosten anzulasten, um bei der Ermittlung der Gesamtkosten Doppelzählungen zu vermeiden.

Tabelle 24: Umweltkosten durch die Emission von Stickstoff ins Grundwasser und von Stickstoff und Phosphor als jeweils wachstumslimitierende Faktoren in Oberflächengewässern

Stoff	Wirkungspfad	Kostensatz € ₂₀₂₀ /kg N
Stickstoff	Grundwasser	1,9
	Binnengewässer	7,3
	Küsten- und Meeresgewässer	20,8
Phosphor	Binnengewässer	153,5
	Küsten- und Meeresgewässer	441,4

Quelle: Schäppi et al (2019), eigene Berechnungen.

Bei der Emission von Stickstoff und Phosphor in Oberflächengewässer erfolgt die schädigende Wirkung erst im Binnengewässer und anschließend im Küsten- bzw. Meeresgewässer (außer im eher seltenen Fall einer direkten Emission in Küstengewässer). Die Wirkungen sind daher zu addieren.

In den meisten Fällen dürfte für die Emissionen nicht bekannt sein, ob sie Stickstoff- oder Phosphor-limitierte Gewässer betreffen. Für diese Fälle werden folgende Kostensätze empfohlen:

Tabelle 25: Umweltkosten durch die Emission von Stickstoff und Phosphor in Oberflächengewässer, wenn unbekannt ist, welcher Stoff in den betroffenen Gewässern limitierend ist

	Kostensatz Stickstoff EUR ₂₀₂₀ / kg N	Kostensatz Phosphor EUR ₂₀₂₀ / kg P
Emission in Oberflächengewässer	20,8	153,5

Quelle: Schäppi et al. (2019), eigene Berechnungen.

Diesen durchschnittlichen Kostensätzen für die Emission in Oberflächengewässer liegt die Annahme zugrunde, dass der entsprechende Schadstoff die Schäden im jeweiligen Gewässertyp vollständig allein verursacht. Dies reflektiert den Umstand, dass in den meisten Binnengewässern Phosphor für das Pflanzenwachstum limitierend ist, für die Meeres- und Küstengewässer hingegen in den meisten Fällen Stickstoff. Für den Gesamtschaden durch Eintrag in Oberflächengewässer (Binnengewässer + Meer) ist daher für Stickstoff der Kostensatz von 20,8 €/kg (Kostensatz für Eintrag in Meeresgewässer), für Phosphor der Kostensatz von 153,5 €/kg (Kostensatz für Eintrag in Binnengewässer) zu verwenden. Damit werden Doppelzählungen vermieden.

5.3 Stickstoff- und Phosphor- Kostensätze für die Landwirtschaft

Ein zentraler Emittent für Stickstoff und Phosphor ist die Landwirtschaft aufgrund der Ausbringung von Wirtschafts- und Mineraldünger. Neben der beabsichtigten Aufnahme durch Pflanzen gelangen Stickstoff und Phosphor dabei auch auf verschiedenen Wegen in die Umwelt und richten dort Schäden an.

Durchschnittliche Umweltkosten der Ausbringung von Stickstoff in der landwirtschaftlichen Praxis:

6,30 € pro kg Stickstoff.

Dieser Wert setzt sich als gewichteter Durchschnitt (vgl. UBA (2020)²²) zusammen aus den Wirkungen von NO_x-, N₂O- und NH₃-Emissionen aus der Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln sowie aus der Bewirtschaftung organischer Böden, Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser aus Landwirtschaftsflächen und N-Eintrag aus Landwirtschaftsflächen in Oberflächengewässer über Runoff, Erosion und Drainagen.

²² UBA: Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010-2014 (DESTINO Bericht 2), Mai 2020, Abb 12-1 S. 140

Durchschnittliche Umweltkosten der Ausbringung von Phosphor in der landwirtschaftlichen Praxis:

4,44 € pro kg Phosphor.

Dieser Wert setzt sich als Durchschnittswert zusammen aus den Wirkungen von P-Emissionen aus der Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln. Dabei wurden die insgesamt ausgebrachten Mengen Phosphor²³ ins Verhältnis zu den Mengen Phosphor gesetzt, die durch solche Eintragspfade in die Gewässer gelangen, welche mehrheitlich auf landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen sind (Erosion, Grundwasser, Oberflächenabfluss, Drainagen)²⁴.

²³ Wirtschaftsdünger: DESTATIS (2017b); Mineraldünger: DESTATIS (2019); Umrechnungsfaktor P_2O_5 in P (= 0,436): Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau, Sachsen-Anhalt (2018).

²⁴ Ergebnisse aus Modeling of Regionalized Emissions (MoRe). Werte jeweils für 2015.

6 Umweltkosten von Baustoffen

Die Produktion von Baustoffen erzeugt vielfältige Umweltkosten: Beim Abbau von Rohstoffen werden Ökosysteme zerstört, Treibhausgase und Luftschadstoffe emittiert und giftige Stoffe in Böden und Gewässer freigesetzt. Beim Transport und der Verarbeitung entstehen weitere Emissionen verschiedener Art.

Bei der Ermittlung der Umweltkosten von Baustoffen ist zwischen dem Einsatz von Primärbaustoffen und dem Einsatz von Recycling-Baustoffen zu unterscheiden. Durch den Einsatz von Recycling-Baustoffen lassen sich die Umweltkosten des Rohstoffabbaus vermeiden. Auch die Kosten der Verarbeitung lassen sich reduzieren, wenn die Aufbereitung der recycelten Baustoffe weniger aufwändig ist als die Verarbeitung der Primärbaustoffe.

Wie im gesamten Dokument werden auch für die Ermittlung der Kostensätze für Baustoffe die Emissionsfaktoren von 2016 zu Grunde gelegt. Das heißt, dass neuere Verfahren bzw. ein etwaiger Anstieg in der Verwendung von erneuerbaren Energien nach 2016 nicht berücksichtigt wurden.

Die Umweltkosten von Baustoffen hängen von den Umwelteffekten entlang der Lieferkette ab. Die Daten dazu werden – sofern verfügbar – in Ökobilanz-Datenbanken gesammelt. Die in der Methodenkonvention verwendeten Daten stammen zum Großteil aus der EcoInvent-Datenbank²⁵. Die im Folgenden berichteten Kosten berücksichtigen nicht die Verwendungsphase der Baustoffe (bspw. die Umweltkosten der Gebäudenutzung) oder deren Rückbau, Recycling oder Entsorgung. Sie erfassen also nicht den gesamten Lebenszyklus. Daher lassen sich allein aus diesen Daten auch keine abschließenden Empfehlungen für konkrete Bauweisen ableiten.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Ökobilanzdaten nicht alle Umwelteffekte berücksichtigen. Gerade im Anfangsbereich der Lieferkette (Rohstoffabbau) sind die Daten häufig unvollständig (betreffend die Folgen für die Biodiversität, Unfälle etc.). Dazu kommt, dass die hier zu Grunde gelegte Bewertung von Ökosystems Schäden (nach Ott et al. 2007) als sehr konservativ gelten muss. **Bei den ermittelten Umweltkosten handelt es sich daher um Untergrenzen, die die tatsächlich entstehenden Kosten je nach Baustoff deutlich unterschätzen.**

Bei den Empfehlungen zu den Umweltkosten der Baustoffe ist zu berücksichtigen, dass für den Vergleich von Bauwerken zwei weitere mindestens ebenso wichtige Faktoren die Umweltkosten beeinflussen: Zum einen ist neben den verwendeten Baustoffen die Konstruktionsweise (z.B. gedämmt oder nicht) bspw. für den entstehenden Aufwand für Wärme und Dämmung zentral. Auch ist beispielsweise eine Aluminiumkonstruktion deutlich leichter als eine Stahlkonstruktion ähnlicher Funktion, was bei der Interpretation der Kostensätze pro Tonne Baustoff zu berücksichtigen ist.

Zum anderen hängt die tatsächliche Menge der verwendeten Materialien von der spezifischen Funktion des Bauwerkes ab. Daher können Baustoffe nur verglichen werden, wenn sie in einem Gebäude ähnlicher Funktion verwendet werden. Ebenso ist auch die Nutzung der Gebäude unter diesen Aspekten in den Blick zu nehmen, da auch diese maßgeblich über die im Laufe des Lebenszyklus` der Gebäude entstehenden Umweltkosten entscheidet.

²⁵ Für die Einzelnachweise der Daten siehe Sachstandspapier (auf Anfrage).

Unter Berücksichtigung dieser Hinweise lässt sich folgendes zu den Umweltkosten (nach dem Cradle-to-Gate-Konzept²⁶) der Baustoffe sagen:

- ▶ Nicht-Eisen Metalle weisen trotz der unvollständigen Berücksichtigung des Rohstoffabbaus relativ hohe Umweltkosten pro Tonne auf.
- ▶ Stahl und Kunststoffe (Dämmungen und PVC Rohre) sind kohlenstoffintensive Materialien und weisen ebenfalls recht hohe Umweltkosten auf.
- ▶ Sand und Schotter haben die niedrigsten Umweltkosten pro Tonne, da sie recht einfach gewonnen werden und geringe oder gar keine Weiterverarbeitungsschritte erforderlich sind (lediglich optionales Brechen und Waschen). Ziegel haben verglichen mit Sand und Schotter geringfügig höhere Umweltkosten aufgrund der Produktionsschritte für die Ziegelherstellung.
- ▶ Beton und Asphalt haben relative geringe Umweltkosten pro Tonne, werden aber in sehr großen Mengen in Bauprojekten verwendet. Daher haben sie insgesamt einen sehr großen Umwelteffekt.

Die hohen Umweltkosten für die meisten Holzvarianten stammen zu einem Großteil aus der Landnutzung (diese machen zwischen etwa 40% bis zu 75% aus). Trotz der hohen Kosten ist durch die sehr konservative Berücksichtigung der Biodiversitätsschäden beim Holz mit einer deutlichen Unterschätzung der wahren Kosten zu rechnen. Dies gilt insbesondere für viele Arten von Holz aus tropischen Gebieten.

²⁶ Bei dem Cradle-to-Gate-Konzept werden alle Vorketten und Produktionsprozesse des Baustoffes erfasst. Außen vor bleiben demnach die Umweltwirkungen, die bei Transport, der Verwendung und Entsorgung des fertigen Baustoffes entstehen.

Tabelle 26: Umweltkosten für Baustoffe (+) und Umweltnutzen durch Recycling von Baustoffen (-)

Kategorie	Variante	Einheit	Charakteristik	Kostensatz in €/Einheit
Stahl	Oberflächenveredeltes, kaltgewalztes Blech, cradle-to-gate	1.000 kg		580
Stahl	Feuerverzinktes Blech, cradle-to-gate	1.000 kg		640
Stahl	Armierungsstahl, Cradle to Gate	1.000 kg		550
Stahl	Stahlprofil, Cradle-to-Gate	1.000 kg		580
Stahl	Geschweißtes Rohr, Cradle-to-Gate	1.000 kg		620
Stahl, Recyclingpotenzial	alle o.g. Kategorien	1.000 kg		-350
Nicht-Eisen-Metalle	Aluminiumblech, 60% Recycling-Anteil	1.000 kg	60% Schrott	2480
Nicht-Eisen-Metalle, Recyclingpotenzial	Aluminiumblech, 60% Recycling-Anteil	1.000 kg	60% Schrott	-970
Nicht-Eisen-Metalle	Kupferrohr, 71% Recycling-Anteil	1.000 kg	71% Schrott	7150
Nicht-Eisen-Metalle, Recyclingpotenzial	Kupferrohr, 71% Recycling-Anteil	1.000 kg	71% Schrott	-2180
Holz	Gesägtes Weichholz EU	1m ³	540 kg/m ³ (bei 20% Feuchtigkeit)	320
		1.000 kg		590
Holz	Gesägtes Hartholz EU	1m ³	780 kg/m ³ (bei 20% Feuchtigkeit)	180
		1.000 kg		230
Holz	Gesägtes tropisches Hartholz, Kamerun (CM)	1m ³	1.200 kg/m ³ (bei 20% Feuchtigkeit)	1440
		1.000 kg		1200
Holz	Gesägtes tropisches Weichholz, Brasilien (BR)	1m ³	600 kg/m ³ (bei 20% Feuchtigkeit)	1000
		1.000 kg		1670
Holz	Rundholz, Hartholz Eucalyptus, Thailand (TH)	1m ³	990 kg/m ³ (bei 20% Feuchtigkeit)	80
		1.000 kg		80
Holz	Sperrholzplatte (Innenraumnutzung)	1.000 kg	780 kg/m ³ (bei 20% Feuchtigkeit)	540
Holz	Grobspanplatte (OSB-Platte)	1.000 kg	540 kg/m ³ (bei 20% Feuchtigkeit)	400

Kategorie	Variante	Einheit	Charakteristik	Kostensatz in €/Einheit
Beton	Beton C20/25	1.000 kg		19
Beton	Beton C30/37	1.000 kg		23
Beton	Beton C35/45	1.000 kg		26
Beton	Beton C45/55	1.000 kg		30
Beton	Beton C50/60	1.000 kg		32
Asphalt	Asphalt-Fahrbahndecke, 0% rückgewonnene Asphalt-Fahrbahndecke (RAP)	1m ² ; 1,8 kg/m ²		17
Asphalt	Asphalt-Fahrbahndecke, 7% rückgewonnene Asphalt-Fahrbahndecke (RAP)	1m ² ; 1,8 kg/m ²		16
Asphalt	Asphalt-Fahrbahndecke, 24% rückgewonnene Asphalt-Fahrbahndecke (RAP)	1m ² ; 1,8 kg/m ²		15
Steinhaltige Baustoffe	Schotter	1.000 kg		2
Steinhaltige Baustoffe	Sand	1.000 kg		2
Steinhaltige Baustoffe	Lehmziegel	1.000 kg		72
Steinhaltige Baustoffe	Kalksandsteinziegel	1.000 kg		45
Kunststoffe/Isolierung	PVC-Rohre	1.000 kg		580
Kunststoffe/Isolierung	Polystyrolschaum-(EPS-) Isolierung	1.000 kg	Dichte 20 kg/m ³	720
Kunststoffe/Isolierung	Glaswollisolierung	1.000 kg	Dichte 10-100 kg/m ³	620
Kunststoffe/Isolierung	Mineralwollisolierung	1.000 kg	Dichte 46 kg/m ³	450
Kunststoffe/Isolierung	Polyurethan- Hartschaumisolierung	1.000 kg	Dichte 33 kg/m ³	1310

Hinweis: Die Umweltkosten der verschiedenen Stahlvarianten berücksichtigen die in Deutschland durchschnittlich geltenden Anteile von Stahlschrott in der Produktion der jeweiligen Varianten. Die Gesamtrecyclingquote bei der Stahlproduktion in Deutschland beträgt ca. 44% (siehe statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie). Recyclingpotenzial stellt den Umweltnutzen durch zusätzliches Recycling-Material dar, welches durch Recycling des Baustoffes auf den Markt gebracht wird. Die entsprechenden Kostensätze weisen daher ein negatives Vorzeichen auf. Enthält ein Baustoff bereits einen Recycling-Anteil, so wird das Recyclingpotenzial lediglich für den verbleibenden Anteil an Primärbaustoff gerechnet. Quelle: Bijleveld M. et al (2019).

7 Klimakosten in der Landwirtschaft

Die Landwirtschaftliche Produktion ist für einen nicht unerheblichen Teil der Emission von Treibhausgasen in Deutschland verantwortlich.

Mit Blick auf die „Pflanzenproduktion“ werden im Folgenden Kostensätze zum Anbau wichtiger Nutzpflanzen empfohlen. Die in Deutschland in größten Mengen produzierten Nutzpflanzen sind Weizen, Gerste, Kartoffeln und Silomais. Diese werden entweder zu Nahrungsmittel oder zu Futtermittel weiterverarbeitet. Zusätzlich wird Soja als Futtermittel verwendet. Neben diesen Pflanzen werden bei der Ermittlung der Klimakosten in der Landwirtschaft Ölsaaten berücksichtigt, einheimisches Rapsöl sowie Palmölimporte (aus Malaysia).

Auf Seiten der „Tierproduktion“ wird die Produktion von Milch²⁷ sowie von Rind-, Schweine- und Geflügelfleisch berücksichtigt. Sämtliche tierischen Produkte werden in Kilogramm Lebendgewicht ab Hof bewertet. Weitere Veredelungsschritte sowie die Verpackung fließen nicht in die Kostensätze ein. Die Kostensätze beziehen sich also auf den landwirtschaftlichen Output ab Hof, nicht auf die Endprodukte (also 1 Liter Milch ab Hof und nicht 1 Liter Milch nach der Verarbeitung bzw. im Supermarkt).

Pflanzliche Produkte (inkl. Ölsaaten):

- ▶ Weizen
- ▶ Gerste
- ▶ Kartoffeln
- ▶ Mais (Körner und Silomais)
- ▶ Soja (Europa und Südamerika)
- ▶ Rapsöl
- ▶ Palmöl (Import)

Tierische Produkte:

- ▶ Milch
- ▶ Rindfleisch
- ▶ Schweinefleisch
- ▶ Geflügel

Den Berechnungen zugrunde liegen ein Klimakostensatz von 195 €₂₀₂₀ / t CO₂-Äq. bzw. ein Klimakostensatz von 680 €₂₀₂₀ / t CO₂-Äq., jeweils für das Jahr 2020. Die besten verfügbaren

²⁷ Zu den Umweltkosten der Milchproduktion wird derzeit ein separates REFOPLAN-Vorhaben durchgeführt: „Sichtbarmachung versteckter Umweltkosten der Landwirtschaft am Beispiel von Milchproduktionssystemen“ (FKZ: 3717 11 238 0).

Datensätze beziehen sich dabei auf Anbau in der Schweiz (Weizen, Gerste, Kartoffeln, Schweinefleisch, Geflügel jeweils biologisch; Körnermais, Silomais, Soja jeweils integriert und biologisch, Rapsöl durchschnittlich, Rindfleisch Mutterkuhhaltung integriert), Deutschland (Weizen, Gerste, Milch, Rindfleisch Großviehmast, Schweinefleisch jeweils konventionell), Kanada (Kartoffeln ohne Angabe zur Produktionsart), Brasilien (südamerikanische Soja), Malaysia (Palmöl), Frankreich (Geflügel konventionell).

Sowohl bei Schweinefleisch wie auch beim Geflügel liegen in der Ecoinvent-Datenbank keine Werte für Deutschland oder das nahe Ausland vor. Die Daten stammen von der Forschungsanstalt Agroscope (ART 2012).

In der folgenden Tabelle sind die Klimakostensätze der Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel aufgeführt. Dabei werden die Produktionsarten konventionell, Integrierte Produktion (IP)²⁸ und biologisch unterschieden.

Tabelle 27: Klimakostensätze für die Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel (Klimakostensätze 195 € und 680€)

Produkte	Produktionsart	195 € / t CO ₂ -Äq	680 € / t CO ₂ -Äq
		€-Cent / kg	€-Cent / kg
Weizen	Konventionell	10,92	38,08
	Biologisch	7,96	27,77
Gerste	Konventionell	9,95	34,68
	Biologisch	7,17	25,01
Kartoffeln	keine Angaben	4,10	14,28
	Biologisch	2,47	8,61
Mais (Körner)	integrierte Produktion	7,15	24,93
	Biologisch	10,56	36,83
Silomais	integrierte Produktion	0,96	3,36
	Biologisch	0,92	3,21
Soja (Europa)	integrierte Produktion	14,53	50,66
	Biologisch	11,88	41,44
Soja (Südamerika)	Konventionell	90,29	314,84

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Ecoinvent Version 3.5 und UBA 2019, Datenherkunft je nach Verfügbarkeit Deutschland, Schweiz, Kanada und Brasilien.

²⁸ Die Integrierte Produktion (IP) stellt einen Zwischenschritt zwischen der konventionellen Landwirtschaft und der ökologischen Landwirtschaft dar. Bei der Integrierten Produktion werden Methoden verwendet, die möglichst geringe negative Wirkungen auf die Umwelt haben, ohne jedoch alle Beschränkungen der ökologisch betriebenen Landwirtschaft zu übernehmen. In der Schweiz sind die IP Vorschriften eindeutig definiert. In Deutschland gibt es kein eindeutiges funktionelles Äquivalent.

Die in Deutschland angebauten pflanzlichen Futter- und Nahrungsmittel verursachen Klimakosten zwischen rund 0,92 und 14,53 €-Cent (bzw. 3,21 und 50,66 €-Cent) pro Kilogramm, wobei im Allgemeinen die Klimakosten im ökologischen Landbau geringer sind als beim konventionellen Anbau. Die niedrigsten Klimakosten bei den Nahrungsmitteln verursacht die Kartoffelproduktion (rund 2,47 bis 4,10 €-Cent pro kg) und bei den Futtermitteln diejenigen von Silomais (rund 0,92 bis 0,96 €-Cent pro kg). Die Produktion von Gerste, Weizen und (Körner)Mais verursacht Klimakosten, die dazwischen liegen (rund 7,15 bis 10,92 €-Cent pro kg, jeweils berechnet mit einem Klimakostensatz von 195€ /t CO₂-Äq.).

Die mit Abstand höchsten Klimakosten verursacht importiertes Soja aus Südamerika (Brasilien). Dabei ist die Landumnutzung berücksichtigt, nicht jedoch der Transport nach Europa. Da ein nicht unerheblicher Teil des Futters in der Landwirtschaft als Soja importiert wird, wurde dieser Datensatz zu Vergleichszwecken ebenfalls berücksichtigt. Dieser weist vor allem verursacht durch die Klimawirkung der Landumnutzung rund sechsmal höhere Klimakosten (über 80 €-Cent pro kg) auf als in Europa produziertes Soja. Bei Nutzung einer biologischer Anbauweise in Europa ist der Unterschied noch höher.

Tabelle 28: Klimakostensätze der Produktion von Ölsaaten (Klimakostensätze 195 € und 680€)

Produkte	Produktionsart	195 € / t CO ₂ -Äq	680 € / t CO ₂ -Äq
		€-Cent / kg	€-Cent / kg
Rapsöl	Durchschnitt	32,66	113,90
Palmöl (Import)	Inkl. Landumnutzung	73,34	255,75

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Ecoinvent Version 3.5 und UBA 2019.

Die Klimakostensätze der Ölsaaten belaufen sich auf 32,66 €-Cent (bzw. 113,90 €-Cent) für Rapsöl bzw. auf 73,34 €-Cent (bzw. 255,75 €-Cent) pro kg für Palmöl. Beim in Malaysia produzierten Palmöl fällt die Klimawirkung von Landumnutzung stark ins Gewicht, weil dort Primärwälder gerodet werden um Ölpalmen anzubauen. In Deutschland dagegen ist die Landumnutzung von Primärwäldern oder anderen CO₂-Senken selten.

Die folgende Tabelle zeigt die Klimakostensätze für die Produktion tierischer Nahrungsmittel.

Tabelle 29: Klimakostensätze für die Produktion tierischer Nahrungsmittel (Klimakostensätze 195 € und 680 €)

Produkte	Produktionsart	195 € / t CO ₂ -Äq	680 € / t CO ₂ -Äq
		€-Cent / kg	€-Cent / kg
Milch (ECM)	Konventionell	26	90
	Bandbreite in der Literatur	16 - 57	55 - 198
Rindfleisch (Lebendgewicht)	Grossviehmast, konventionell	153	533
	Mutterkuhhaltung, integrierte Produktion	275	959
Schweinefleisch (Lebendgewicht)	Konventionell	64	224
	Biologisch	66	231
Geflügel (Lebendgewicht)	Konventionell	45	156
	Biologisch	41	143

ECM = Energie-korrigierte Milchmenge: auf gleichen Energiegehalt umgerechnete Milch, um Milch mit unterschiedlichen Gehalten von Fett und Eiweiß vergleichen zu können. Großviehmast bezieht sich auf die Mast von Kälbern aus Milchviehhaltung; Mutterkuhhaltung bezieht sich auf die Aufzucht von Rindern lediglich aus Gründen der Fleischproduktion.

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Ecoinvent Version 3.5, Bystricky et al., 2015, ART 2012 und UBA 2019.

Für die Produktion von Milch²⁹ lassen sich aus den Emissionsfaktoren in der Literatur Klimakostensätze in einer Bandbreite von durchschnittlich 16 bis 57 €-Cent (bzw. 55-198 €-Cent) pro kg Milch (ECM)³⁰ berechnen. Wir empfehlen die Verwendung eines Durchschnittswerts basierend auf Bystricky et al. (2015) und UBA (2019b). Dieser liegt bei rund 26 €-Cent (bzw. 90 €-Cent) pro kg Milch (ECM) ab Hof.

Bei den Klimakosten für die Fleischproduktion resultiert für Deutschland ein durchschnittlicher Klimakostensatz von 1,53 € (bzw. 5,33 €) pro kg Rindfleisch Lebendgewicht bei der konventionellen Großviehmast (Kälber aus Milchviehhaltung) und 2,75 € (bzw. 9,59 €) pro kg Rindfleisch Lebendgewicht bei der Mutterkuhhaltung (reine Fleischproduktion) (integrierte Produktion in der Schweiz). Die Daten zeigen, dass die Klimakosten bei der Großviehmast geringer sind als bei der Mutterkuhhaltung, hauptsächlich weil bei der Großviehmast ein Teil der Emissionen der Mutterkühe der Milchproduktion zugerechnet werden kann.

Die Klimakostensätze für ein Kilogramm Schweinefleisch (Lebendgewicht) variieren je nach Region zwischen 64 €-Cent (bzw. 2,24 €) pro kg bei konventioneller Produktion und 66 €-Cent

²⁹ Eine deutlich differenziertere Darstellung der Umweltkosten der Milchproduktion erfolgt derzeit in dem REFOPLAN-Vorhaben „Sichtbarmachung versteckter Umweltkosten der Landwirtschaft am Beispiel von Milchproduktionssystemen“ (FKZ: 3717 11 238 0).

³⁰ Energie-korrigierte Milchmenge (ECM).

(bzw. 2,31 €) pro kg bei biologischer Produktion. Die Produktion von Geflügelfleisch (Lebendgewicht) verursacht zwischen 38 und 41 €-Cent pro kg.

Für eine Anwendung der dargestellten Kostensätze im Sinne einer Konsumentenperspektive müssten andere Systemgrenzen gewählt werden, da je nach Tierart der Anteil Schlachtfleisch am Lebendgewicht unterschiedlich ist. Zudem sind bei einem Vergleich von Nahrungsmitteln aus Konsumentensicht auch die Emissionen aus der Weiterverarbeitung und dem Transport zu berücksichtigen.

Sämtliche hier dargestellte Umweltkostensätze werden in €-Cent bzw. € pro kg angegeben. Wenn Nahrungsmittel aus der Ernährungsperspektive miteinander verglichen werden, sollte dagegen der Energieinhalt berücksichtigt werden. Das heißt, die Klimakostensätze sind mit den Kilojoule-Werten pro Kilogramm zu verrechnen, um z.B. die Klimawirkungen von Schweinefleisch mit der von Kartoffeln zu vergleichen.

8 Anhang

Tabelle 30 und Tabelle 31 stellen die Kostensätze nach Euronormen für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen dar.³¹ Bei den verschiedenen LKW-Typen erfolgt eine zusätzliche Unterscheidung nach Transportgewicht, außerdem ist eine zusätzliche Kategorie für Schwerlastzüge enthalten. Um die Tabellen 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.

Tabelle 30: a) Kostensätze Verkehr: differenziert nach Emissionskategorie (Euronorm) für die verschiedenen Fahrzeugtypen bei einem Kostensatz von 195€/t CO₂ äq, in €-Cent₂₀₂₀ / Fzkm

Fahrzeug-kategorie	EURO-Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver-brauch und Zerschneid-ung	Gesamt
		Treib-haus-gase	Luft-schad-stoffe Aus-puff	Luft-schad-stoffe Abrieb	Infra-struktur und Fahr-zeuge	Energie-bereit-stellung		
PKW, Diesel	Euro 0	3,07	1,83	0,03	2,53	1,23	0,36	9,05
	Euro 1	3,35	1,95	0,03	2,53	1,35	0,36	9,57
	Euro 2	3,16	1,90	0,03	2,53	1,27	0,36	9,25
	Euro 3	2,91	1,78	0,03	2,53	1,17	0,36	8,78
	Euro 4	2,77	1,39	0,03	2,53	1,12	0,36	8,19
	Euro 5	2,52	1,82	0,03	2,53	1,02	0,36	8,27
	Euro 6	2,36	1,03	0,03	2,53	0,95	0,36	7,27
PKW, Benzin	Euro 0	4,30	2,44	0,03	2,22	1,62	0,36	10,97
	Euro 1	3,91	1,98	0,03	2,22	1,47	0,36	9,96
	Euro 2	3,77	1,27	0,03	2,22	1,43	0,36	9,07
	Euro 3	3,48	0,29	0,03	2,22	1,33	0,36	7,71
	Euro 4	3,13	0,28	0,03	2,22	1,19	0,36	7,21
	Euro 5	2,79	0,20	0,03	2,22	1,06	0,36	6,66
	Euro 6	2,63	0,20	0,03	2,22	1,00	0,36	6,44
Kraftrad (Benzin, 2T)	Euro 0	2,26	1,62	0,01	2,22	0,92	0,12	7,14
	Euro 1	2,34	0,80	0,01	2,22	0,95	0,12	6,45
	Euro 2	1,85	0,47	0,01	2,22	0,75	0,12	5,43
	Euro 3	1,51	0,35	0,01	2,22	0,61	0,12	4,82
Kraftrad (Benzin, 4T)	Euro 0	2,11	0,90	0,01	2,39	1,16	0,16	6,72

³¹ Die Differenzierung der Emissionsfaktoren nach Euronormen basiert dabei auf HBEFA v3.3.

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro 1	2,00	0,73	0,01	2,39	1,10	0,16	6,38
	Euro 2	1,85	0,62	0,01	2,39	1,01	0,16	6,04
	Euro 3	1,92	0,37	0,01	2,39	1,05	0,16	5,89
Leichtes Nutzfahrzeug (Benzin)	Euro 0	4,49	4,45	0,03	1,79	1,73	0,38	12,87
	Euro 1	3,99	2,96	0,03	1,79	1,53	0,38	10,67
	Euro 2	3,55	1,42	0,03	1,79	1,36	0,38	8,53
	Euro 3	3,56	0,33	0,03	1,79	1,36	0,38	7,45
	Euro 4	3,08	0,26	0,03	1,79	1,18	0,38	6,72
	Euro 5	2,75	0,19	0,03	1,79	1,06	0,38	6,19
	Euro 6	2,45	0,18	0,03	1,79	0,94	0,38	5,77
Leichtes Nutzfahrzeug (Diesel)	Euro 0	5,53	5,11	0,03	1,95	1,99	0,38	14,98
	Euro 1	5,07	4,20	0,03	1,95	1,82	0,38	13,46
	Euro 2	4,54	3,47	0,03	1,95	1,63	0,38	12,01
	Euro 3	3,73	2,77	0,03	1,95	1,34	0,38	10,21
	Euro 4	3,55	2,07	0,03	1,95	1,27	0,38	9,26
	Euro 5	3,30	1,77	0,03	1,95	1,18	0,38	8,61
	Euro 6	3,05	0,61	0,03	1,95	1,10	0,38	7,13
Linienbus	Euro 0	20,59	36,41	0,16	5,18	6,37	0,85	69,57
	Euro 1	17,86	22,37	0,16	5,18	5,52	0,85	51,94
	Euro 2	18,01	22,51	0,16	5,18	5,57	0,85	52,28
	Euro 3	19,85	19,55	0,16	5,18	6,14	0,85	51,73
	Euro 4	20,68	13,08	0,16	5,18	6,40	0,85	46,35
	Euro 5	21,30	9,59	0,16	5,18	6,59	0,85	43,68
	Euro 6	20,98	0,76	0,16	5,18	6,49	0,85	34,41
Reisebus	Euro 0	14,45	23,12	0,09	6,50	5,01	0,85	50,03
	Euro 1	13,40	17,30	0,09	6,50	4,65	0,85	42,79
	Euro 2	12,74	16,94	0,09	6,50	4,42	0,85	41,55

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro 3	13,54	13,49	0,09	6,50	4,70	0,85	39,17
	Euro 4	13,58	8,50	0,09	6,50	4,71	0,85	34,23
	Euro 5	14,17	6,25	0,09	6,50	4,91	0,85	32,78
	Euro 6	14,33	0,80	0,09	6,50	4,97	0,85	27,55
Lastwagen (<= 7,5t)	80ties	7,06	10,91	0,07	3,86	3,44	0,79	26,13
	Euro I	6,11	7,47	0,07	3,86	2,97	0,79	21,27
	Euro II	5,92	7,41	0,07	3,86	2,88	0,79	20,94
	Euro III	6,23	5,28	0,07	3,86	3,03	0,79	19,26
	Euro IV EGR	6,33	3,57	0,07	3,86	3,08	0,79	17,7
	Euro IV SCR	6,12	2,73	0,07	3,86	2,98	0,79	16,55
	Euro V EGR	6,40	2,63	0,07	3,86	3,12	0,79	16,88
	Euro V SCR	6,12	1,64	0,07	3,86	2,98	0,79	15,47
	Euro VI	6,21	0,24	0,07	3,86	3,02	0,79	14,19
Lastwagen (>7,5t-12t)	80ties	9,47	17,48	0,07	3,86	4,00	0,79	35,68
	Euro I	8,41	10,45	0,07	3,86	3,55	0,79	27,13
	Euro II	8,17	10,46	0,07	3,86	3,45	0,79	26,80
	Euro III	8,58	7,55	0,07	3,86	3,63	0,79	24,48
	Euro IV EGR	8,65	5,02	0,07	3,86	3,65	0,79	22,05
	Euro IV SCR	8,36	3,96	0,07	3,86	3,53	0,79	20,58
	Euro V EGR	8,76	3,77	0,07	3,86	3,70	0,79	20,95
	Euro V SCR	8,35	2,61	0,07	3,86	3,53	0,79	19,22
	Euro VI	8,51	0,41	0,07	3,86	3,59	0,79	17,23

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
Lastwagen (>12t-14t)	80ties	10,00	18,48	0,07	3,86	4,22	0,79	37,43
	Euro I	8,86	11,15	0,07	3,86	3,74	0,79	28,48
	Euro II	8,62	11,18	0,07	3,86	3,64	0,79	28,16
	Euro III	9,01	8,19	0,07	3,86	3,80	0,79	25,73
	Euro IV EGR	9,03	5,42	0,07	3,86	3,81	0,79	22,99
	Euro IV SCR	8,71	4,11	0,07	3,86	3,68	0,79	21,23
	Euro V EGR	9,20	4,04	0,07	3,86	3,89	0,79	21,85
	Euro V SCR	8,77	2,75	0,07	3,86	3,70	0,79	19,95
	Euro VI	8,92	0,46	0,07	3,86	3,77	0,79	17,88
Lastwagen (>14t-20t)	80ties	12,12	22,11	0,07	5,28	4,93	0,85	45,37
	Euro I	10,28	13,28	0,07	5,28	4,19	0,85	33,95
	Euro II	9,98	13,47	0,07	5,28	4,06	0,85	33,72
	Euro III	10,46	9,91	0,07	5,28	4,26	0,85	30,83
	Euro IV EGR	10,33	6,61	0,07	5,28	4,20	0,85	27,36
	Euro IV SCR	9,93	5,28	0,07	5,28	4,04	0,85	25,45
	Euro V EGR	10,51	5,06	0,07	5,28	4,28	0,85	26,06
	Euro V SCR	9,98	3,69	0,07	5,28	4,06	0,85	23,94
	Euro VI	10,23	0,63	0,07	5,28	4,16	0,85	21,23
Lastwagen (>20t-26t)	80ties	14,19	23,01	0,07	5,28	5,78	0,85	49,18
	Euro I	12,35	16,17	0,07	5,28	5,03	0,85	39,76
	Euro II	12,10	16,42	0,07	5,28	4,92	0,85	39,64
	Euro III	12,54	12,30	0,07	5,28	5,10	0,85	36,15

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro IV EGR	12,33	8,29	0,07	5,28	5,02	0,85	31,84
	Euro IV SCR	11,91	6,00	0,07	5,28	4,85	0,85	28,97
	Euro V EGR	12,56	6,24	0,07	5,28	5,11	0,85	30,12
	Euro V SCR	12,01	4,10	0,07	5,28	4,89	0,85	27,2
	Euro VI	12,22	0,66	0,07	5,28	4,97	0,85	24,06
Lastwagen (>26t-28t)	Euro I	12,89	16,9	0,07	5,28	5,24	0,85	41,24
	Euro II	12,87	16,74	0,07	5,28	5,24	0,85	41,07
	Euro III	13,28	12,65	0,07	5,28	5,41	0,85	37,54
	Euro IV EGR	13,10	8,52	0,07	5,28	5,33	0,85	33,16
	Euro IV SCR	12,67	6,21	0,07	5,28	5,15	0,85	30,24
	Euro V EGR	13,31	6,37	0,07	5,28	5,42	0,85	31,31
	Euro V SCR	12,7	4,22	0,07	5,28	5,17	0,85	28,30
	Euro VI	12,93	0,68	0,07	5,28	5,26	0,85	25,09
Lastwagen (>28t-32t)	Euro I	15,01	19,51	0,07	5,28	5,51	0,85	46,24
	Euro II	14,87	19,31	0,07	5,28	5,46	0,85	45,85
	Euro III	15,33	14,37	0,07	5,28	5,63	0,85	41,53
	Euro IV EGR	15,31	9,62	0,07	5,28	5,62	0,85	36,76
	Euro IV SCR	14,81	6,99	0,07	5,28	5,44	0,85	33,45
	Euro V EGR	15,60	7,16	0,07	5,28	5,73	0,85	34,70
	Euro V SCR	14,90	4,64	0,07	5,28	5,47	0,85	31,22
	Euro VI	15,18	0,75	0,07	5,28	5,57	0,85	27,71

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
Lastwagen (>32t)	Euro I	14,80	19,43	0,07	5,28	5,43	0,85	45,87
	Euro II	14,56	19,56	0,07	5,28	5,35	0,85	45,68
	Euro III	15,00	14,75	0,07	5,28	5,51	0,85	41,46
	Euro IV EGR	14,87	9,90	0,07	5,28	5,46	0,85	36,43
	Euro IV SCR	14,43	6,80	0,07	5,28	5,30	0,85	32,73
	Euro V EGR	15,18	7,36	0,07	5,28	5,57	0,85	34,33
	Euro V SCR	14,54	4,56	0,07	5,28	5,34	0,85	30,64
	Euro VI	14,75	0,73	0,07	5,28	5,41	0,85	27,10
Lastzüge/Sattel- schlepper (>20- 28t)	80ties	14,04	22,71	0,07	5,28	5,15	0,85	48,11
	Euro I	12,47	16,08	0,07	5,28	4,58	0,85	39,33
	Euro II	12,13	15,88	0,07	5,28	4,45	0,85	38,67
	Euro III	12,58	11,86	0,07	5,28	4,62	0,85	35,26
	Euro IV EGR	12,54	7,98	0,07	5,28	4,60	0,85	31,33
	Euro IV SCR	12,1	6,02	0,07	5,28	4,44	0,85	28,77
	Euro V EGR	12,74	5,98	0,07	5,28	4,68	0,85	29,61
	Euro V SCR	12,16	4,01	0,07	5,28	4,46	0,85	26,85
Lastzüge/Sattel- schlepper (>28- 34t)	Euro VI	12,39	0,62	0,07	5,28	4,55	0,85	23,77
	80ties	14,7	23,91	0,07	5,28	5,40	0,85	50,22
	Euro I	13,12	16,87	0,07	5,28	4,81	0,85	41,01
	Euro II	12,80	16,62	0,07	5,28	4,70	0,85	40,32
	Euro III	13,26	12,44	0,07	5,28	4,87	0,85	36,77

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro IV EGR	13,21	8,30	0,07	5,28	4,85	0,85	32,57
	Euro IV SCR	12,8	6,12	0,07	5,28	4,70	0,85	29,82
	Euro V EGR	13,48	6,15	0,07	5,28	4,95	0,85	30,78
	Euro V SCR	12,93	4,02	0,07	5,28	4,75	0,85	27,91
	Euro VI	13,12	0,60	0,07	5,28	4,82	0,85	24,74
Lastzüge/Sattel- schlepper (>34- 40t)	80ties	16,73	27,11	0,07	7,44	6,14	1,07	58,58
	Euro I	14,67	19,14	0,07	7,44	5,39	1,07	47,79
	Euro II	14,48	19,16	0,07	7,44	5,32	1,07	47,56
	Euro III	14,88	14,53	0,07	7,44	5,46	1,07	43,46
	Euro IV EGR	14,78	9,66	0,07	7,44	5,43	1,07	38,45
	Euro IV SCR	14,34	7,01	0,07	7,44	5,27	1,07	35,21
	Euro V EGR	15,12	7,23	0,07	7,44	5,55	1,07	36,5
	Euro V SCR	14,48	4,66	0,07	7,44	5,32	1,07	33,06
	Euro VI	14,68	0,67	0,07	7,44	5,39	1,07	29,34

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.

Tabelle 31: b) Kostensätze Verkehr: differenziert nach Emissionskategorie (Euronorm) für die verschiedenen Fahrzeugtypen bei einem Kostensatz von 680€/t CO₂ äq, in €-Cent₂₀₁₆ / Fzkm

Fahrzeug-kategorie	EURO-Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver-brauch und Zerschneid-ung	Gesamt
		Treib-haus-gase	Luft-schad-stoffe Aus-puff	Luft-schad-stoffe Abrieb	Infra-struktur und Fahr-zeuge	Energie-bereit-stellung		
PKW, Diesel	Euro 0	10,62	1,83	0,03	5,77	3,32	0,36	21,92
	Euro 1	11,62	1,95	0,03	5,77	3,64	0,36	23,35
	Euro 2	10,95	1,90	0,03	5,77	3,43	0,36	22,42
	Euro 3	10,09	1,78	0,03	5,77	3,16	0,36	21,18
	Euro 4	9,60	1,39	0,03	5,77	3,01	0,36	20,14
	Euro 5	8,74	1,82	0,03	5,77	2,74	0,36	19,45
PKW, Benzin	Euro 0	14,92	2,44	0,03	5,14	4,29	0,36	27,18
	Euro 1	13,55	1,98	0,03	5,14	3,88	0,36	24,94
	Euro 2	13,06	1,27	0,03	5,14	3,77	0,36	23,62
	Euro 3	12,05	0,30	0,03	5,14	3,51	0,36	21,38
	Euro 4	10,85	0,28	0,03	5,14	3,16	0,36	19,8
	Euro 5	9,68	0,20	0,03	5,14	2,82	0,36	18,21
Kraftrad (Benzin, 2T)	Euro 0	7,81	1,62	0,01	4,68	2,09	0,12	16,33
	Euro 1	8,13	0,80	0,01	4,68	2,18	0,12	15,92
	Euro 2	6,41	0,47	0,01	4,68	1,72	0,12	13,4
	Euro 3	5,23	0,35	0,01	4,68	1,40	0,12	11,79
Kraftrad (Benzin, 4T)	Euro 0	7,33	0,90	0,01	6,35	2,65	0,16	17,39
	Euro 1	6,93	0,72	0,01	6,35	2,50	0,16	16,68
	Euro 2	6,41	0,62	0,01	6,35	2,32	0,16	15,87
	Euro 3	6,64	0,36	0,01	6,35	2,40	0,16	15,93
Leichtes Nutzfahrzeug (Benzin)	Euro 0	15,57	4,46	0,03	4,10	4,57	0,38	29,09
	Euro 1	13,8	2,96	0,03	4,10	4,05	0,38	25,31

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro 2	12,28	1,43	0,03	4,10	3,60	0,38	21,81
	Euro 3	12,31	0,33	0,03	4,10	3,61	0,38	20,76
	Euro 4	10,67	0,26	0,03	4,10	3,13	0,38	18,57
	Euro 5	9,52	0,19	0,03	4,10	2,79	0,38	17,00
	Euro 6	8,5	0,18	0,03	4,10	2,49	0,38	15,67
Leichtes Nutzfahrzeug (Diesel)	Euro 0	19,16	5,11	0,03	4,42	5,35	0,38	34,45
	Euro 1	17,58	4,20	0,03	4,42	4,91	0,38	31,51
	Euro 2	15,75	3,47	0,03	4,42	4,40	0,38	28,44
	Euro 3	12,95	2,77	0,03	4,42	3,61	0,38	24,15
	Euro 4	12,28	2,07	0,03	4,42	3,43	0,38	22,6
	Euro 5	11,4	1,77	0,03	4,42	3,18	0,38	21,18
	Euro 6	10,59	0,61	0,03	4,42	2,96	0,38	18,98
Linienbus	Euro 0	71,38	36,41	0,16	12,84	17,15	0,85	138,78
	Euro 1	61,89	22,36	0,16	12,84	14,87	0,85	112,97
	Euro 2	62,43	22,51	0,16	12,84	15,00	0,85	113,79
	Euro 3	68,78	19,56	0,16	12,84	16,53	0,85	118,71
	Euro 4	71,69	13,07	0,16	12,84	17,22	0,85	115,83
	Euro 5	73,85	9,59	0,16	12,84	17,74	0,85	115,02
	Euro 6	72,69	0,76	0,16	12,84	17,46	0,85	104,75
Reisebus	Euro 0	50,10	23,12	0,09	15,87	13,50	0,85	103,54
	Euro 1	46,43	17,31	0,09	15,87	12,52	0,85	93,07
	Euro 2	44,17	16,94	0,09	15,87	11,91	0,85	89,83
	Euro 3	46,92	13,49	0,09	15,87	12,65	0,85	89,87
	Euro 4	47,06	8,50	0,09	15,87	12,68	0,85	85,06
	Euro 5	49,08	6,25	0,09	15,87	13,23	0,85	85,38
	Euro 6	49,66	0,80	0,09	15,87	13,39	0,85	80,67
Lastwagen (<= 7,5t)	80ties	24,48	10,91	0,07	8,82	7,33	0,78	52,40

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro I	21,17	7,47	0,07	8,82	6,34	0,78	44,65
	Euro II	20,51	7,41	0,07	8,82	6,14	0,78	43,74
	Euro III	21,58	5,28	0,07	8,82	6,46	0,78	42,99
	Euro IV EGR	21,93	3,57	0,07	8,82	6,57	0,78	41,75
	Euro IV SCR	21,21	2,73	0,07	8,82	6,35	0,78	39,97
	Euro V EGR	22,21	2,63	0,07	8,82	6,65	0,78	41,18
	Euro V SCR	21,22	1,65	0,07	8,82	6,35	0,78	38,90
	Euro VI	21,51	0,24	0,07	8,82	6,44	0,78	37,88
Lastwagen (>7,5t-12t)	80ties	32,83	17,48	0,07	8,82	9,22	0,78	69,21
	Euro I	29,16	10,45	0,07	8,82	8,19	0,78	57,48
	Euro II	28,29	10,46	0,07	8,82	7,95	0,78	56,37
	Euro III	29,75	7,55	0,07	8,82	8,36	0,78	55,33
	Euro IV EGR	29,96	5,02	0,07	8,82	8,42	0,78	53,08
	Euro IV SCR	28,97	3,96	0,07	8,82	8,14	0,78	50,74
	Euro V EGR	30,34	3,76	0,07	8,82	8,52	0,78	52,31
	Euro V SCR	28,96	2,61	0,07	8,82	8,14	0,78	49,39
	Euro VI	29,47	0,41	0,07	8,82	8,28	0,78	47,84
Lastwagen (>12t-14t)	80ties	34,66	18,48	0,07	8,82	9,74	0,78	72,55
	Euro I	30,71	11,15	0,07	8,82	8,63	0,78	60,17
	Euro II	29,84	11,18	0,07	8,82	8,38	0,78	59,09
	Euro III	31,21	8,19	0,07	8,82	8,77	0,78	57,85
	Euro IV EGR	31,29	5,42	0,07	8,82	8,79	0,78	55,18

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro IV SCR	30,22	4,11	0,07	8,82	8,49	0,78	52,50
	Euro V EGR	31,89	4,04	0,07	8,82	8,96	0,78	54,56
	Euro V SCR	30,39	2,75	0,07	8,82	8,54	0,78	51,36
	Euro VI	30,92	0,46	0,07	8,82	8,69	0,78	49,75
Lastwagen (>14t-20t)	80ties	42,00	22,11	0,07	11,97	11,61	0,86	88,62
	Euro I	35,64	13,28	0,07	11,97	9,85	0,86	71,67
	Euro II	34,61	13,47	0,07	11,97	9,57	0,86	70,55
	Euro III	36,23	9,91	0,07	11,97	10,02	0,86	69,06
	Euro IV EGR	35,8	6,61	0,07	11,97	9,90	0,86	65,22
	Euro IV SCR	34,40	5,28	0,07	11,97	9,51	0,86	62,09
	Euro V EGR	36,41	5,06	0,07	11,97	10,07	0,86	64,45
	Euro V SCR	34,59	3,69	0,07	11,97	9,56	0,86	60,74
	Euro VI	35,45	0,63	0,07	11,97	9,80	0,86	58,78
Lastwagen (>20t-26t)	80ties	49,18	23,01	0,07	11,97	13,60	0,86	98,68
	Euro I	42,81	16,18	0,07	11,97	11,84	0,86	83,72
	Euro II	41,91	16,41	0,07	11,97	11,59	0,86	82,81
	Euro III	43,46	12,3	0,07	11,97	12,02	0,86	80,68
	Euro IV EGR	42,71	8,29	0,07	11,97	11,81	0,86	75,71
	Euro IV SCR	41,29	6,00	0,07	11,97	11,42	0,86	71,61
	Euro V EGR	43,53	6,25	0,07	11,97	12,03	0,86	74,71
	Euro V SCR	41,61	4,09	0,07	11,97	11,51	0,86	70,11

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro VI	42,33	0,66	0,07	11,97	11,7	0,86	67,60
Lastwagen (>26t-28t)	Euro I	44,65	16,90	0,07	11,97	12,35	0,86	86,80
	Euro II	44,62	16,74	0,07	11,97	12,34	0,86	86,61
	Euro III	46,03	12,65	0,07	11,97	12,73	0,86	84,31
	Euro IV EGR	45,41	8,52	0,07	11,97	12,56	0,86	79,39
	Euro IV SCR	43,89	6,21	0,07	11,97	12,13	0,86	75,14
	Euro V EGR	46,14	6,37	0,07	11,97	12,76	0,86	78,18
	Euro V SCR	44,03	4,22	0,07	11,97	12,17	0,86	73,32
	Euro VI	44,83	0,69	0,07	11,97	12,39	0,86	70,81
Lastwagen (>28t-32t)	Euro I	52,02	19,51	0,07	11,97	13,78	0,86	98,22
	Euro II	51,54	19,32	0,07	11,97	13,66	0,86	97,42
	Euro III	53,12	14,38	0,07	11,97	14,08	0,86	94,47
	Euro IV EGR	53,05	9,63	0,07	11,97	14,06	0,86	89,64
	Euro IV SCR	51,35	6,99	0,07	11,97	13,61	0,86	84,85
	Euro V EGR	54,08	7,16	0,07	11,97	14,33	0,86	88,48
	Euro V SCR	51,63	4,65	0,07	11,97	13,68	0,86	82,87
	Euro VI	52,61	0,74	0,07	11,97	13,94	0,86	80,20
Lastwagen (>32t)	Euro I	51,29	19,43	0,07	11,97	13,59	0,86	97,21
	Euro II	50,47	19,57	0,07	11,97	13,37	0,86	96,31
	Euro III	51,98	14,75	0,07	11,97	13,77	0,86	93,41
	Euro IV EGR	51,52	9,90	0,07	11,97	13,65	0,86	87,98

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro IV SCR	49,99	6,81	0,07	11,97	13,25	0,86	82,95
	Euro V EGR	52,61	7,36	0,07	11,97	13,94	0,86	86,82
	Euro V SCR	50,40	4,55	0,07	11,97	13,36	0,86	81,22
	Euro VI	51,11	0,73	0,07	11,97	13,54	0,86	78,29
Lastzüge/Sattel- schlepper (>20- 28t)	80ties	48,63	22,71	0,07	11,97	12,89	0,86	97,13
	Euro I	43,21	16,08	0,07	11,97	11,45	0,86	83,64
	Euro II	42,03	15,88	0,07	11,97	11,14	0,86	81,95
	Euro III	43,59	11,86	0,07	11,97	11,55	0,86	79,90
	Euro IV EGR	43,44	7,98	0,07	11,97	11,51	0,86	75,84
	Euro IV SCR	41,93	6,02	0,07	11,97	11,11	0,86	71,96
	Euro V EGR	44,18	5,98	0,07	11,97	11,71	0,86	74,76
	Euro V SCR	42,14	4,02	0,07	11,97	11,17	0,86	70,23
	Euro VI	42,95	0,62	0,07	11,97	11,38	0,86	67,86
Lastzüge/Sattel- schlepper (>28- 34t)	80ties	50,97	23,92	0,07	11,97	13,51	0,86	101,30
	Euro I	45,45	16,87	0,07	11,97	12,04	0,86	87,27
	Euro II	44,37	16,62	0,07	11,97	11,76	0,86	85,65
	Euro III	45,93	12,44	0,07	11,97	12,17	0,86	83,45
	Euro IV EGR	45,79	8,30	0,07	11,97	12,13	0,86	79,12
	Euro IV SCR	44,36	6,12	0,07	11,97	11,76	0,86	75,14
	Euro V EGR	46,71	6,15	0,07	11,97	12,38	0,86	78,15

Fahrzeug- kategorie	EURO- Norm	Betrieb			Vorprozesse		Flächenver- brauch und Zerschneid- ung	Gesamt
		Treib- haus- gase	Luft- schad- stoffe Aus- puff	Luft- schad- stoffe Abrieb	Infra- struktur und Fahr- zeuge	Energie- bereit- stellung		
	Euro V SCR	44,8	4,02	0,07	11,97	11,87	0,86	73,59
	Euro VI	45,46	0,60	0,07	11,97	12,05	0,86	71,01
Lastzüge/Sattel- schlepper (>34- 40t)	80ties	57,98	27,12	0,07	16,89	15,36	1,07	118,5
	Euro I	50,84	19,14	0,07	16,89	13,47	1,07	101,49
	Euro II	50,19	19,17	0,07	16,89	13,30	1,07	100,69
	Euro III	51,55	14,53	0,07	16,89	13,66	1,07	97,79
	Euro IV EGR	51,23	9,66	0,07	16,89	13,57	1,07	92,49
	Euro IV SCR	49,70	7,01	0,07	16,89	13,17	1,07	87,93
	Euro V EGR	52,41	7,23	0,07	16,89	13,89	1,07	91,57
	Euro V SCR	50,18	4,66	0,07	16,89	13,30	1,07	86,18
	Euro VI	50,89	0,68	0,07	16,89	13,49	1,07	83,09

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.

9 Quellenverzeichnis

- Anthoff, D. (2007): Report on marginal external damage costs inventory of greenhouse gas emissions. Hamburg, Hamburg University: 47.
- ART (2012), Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ökobilanz von Rind-, Schweine- und Geflügelfleisch, 2012.
- 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.
- Bieler, C. /Sutter D. (2019): Umweltkosten durch Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, Oktober 2019.
- Bijleveld, M./de Bruyn; S. /Sutter, D. (2019) Umweltkosten von Baustoffen, , Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, Oktober 2019.
- Bystricky M. et al. (2015), Ökobilanz ausgewählter Schweizer Landwirtschaftsprodukte im Vergleich zum Import, Agroscope Science Nr. 2 | April 2014 (revidiert Mai 2015).
- Compton, J.E., Harrison, J.A., Dennis, R.L., Greaver, T.L., Hill, B.H., Jordan, S.J., Walker, H. and Campbell, H.V. (2011) Ecosystem services altered by human changes in the nitrogen cycle: a new perspective for US decision making. Ecology Letters 14, 804-815.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S., Turner, R.K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change 26, 152–158.
- Destatis (2017a), Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, Fachserie 3 Reihe 5.1 – 2016.
- Destatis (2017b), Land- und Forstwirtschaft, Fischerei – Wirtschaftsdünger, Fachserie 3, Reihe 2.2.2 - 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.
- Destatis (2019), Statistisches Jahrbuch 2019, https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/statistisches-jahrbuch-2019-dl.pdf?__blob=publicationFile
- Doll, C., Sutter, D. (2018): Umweltkosten durch Lärm, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, September 2018.
- ecoinvent Centre (2019), ecoinvent Data - The Life Cycle Inventory Data V3.5. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. Internet: <http://www.ecoinvent.org>; Zuletzt abgerufen: 29.04.2019.
- 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.

Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau, Sachsen-Anhalt (2018), Hinweise zur Phosphor-Düngebedarfsermittlung, Stand 11/2018.

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.

Ravishankara, A.R., Daniel, J.S., Portmann, R.W. (2009). Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. Science, 326(5949), 123-125.

Schäppi, B., Weber, F., Sutter, D., Sartorius, C. (2019): Ermittlung von Umweltkosten durch den Eintrag von Stickstoff und Phosphor, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, Oktober 2019.

UBA (2019a), Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017.

UBA (2019b), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten –Kostensätze, Dessau-Roßlau.

UBA (2020), Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010 - 2014 (Projekt DESTINO, Teilbericht 2).

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.

Van Grinsven, H. J. M., Rabl, A., de Kok, T. M., Grizzetti, B. (2010) Estimation of incidence and social cost of colon cancer due to nitrate in drinking water in the EU: a tentative cost–benefit assessment. Environmental Health, 9:58.

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.