

TEXTE

110/2023

Bewertung von Emissionsminderungspotenzial en zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen

Sachverständigengutachten

von:

Michel Allekotte, Christoph Heidt
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg
Christiane Schneider, Nicola Toenges-Schuller
AVISO GmbH, Aachen

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 110/2023

Projektnummer 170964

FB001206

Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen

Sachverständigengutachten

von

Michel Allekotte, Christoph Heidt
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH, Heidelberg

Christiane Schneider, Nicola Toenges-Schuller
AVISO GmbH, Aachen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

📄 [/umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

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

Durchführung der Studie:

Ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, AVISO GmbH
Wilckensstraße 3, Am Hasselholz 15
69120 Heidelberg, 52074 Aachen

Abschlussdatum:

Dezember 2022

Redaktion:

Fachgebiet II 4.1 – Grundsatzfragen der Luftreinhaltung
Johanna Appelhaus

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen

Zur Vorbereitung der Erstellung des aktuellen nationalen Luftreinhalteprogrammes wurde ein Projekt mit dem Titel „Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen“ durchgeführt. In diesem Rahmen wurden für den Sektor „Verkehr“ drei Szenarien entwickelt: Das Szenario „mit Maßnahmen“ (englisch: With Measures Scenario, WM), das alle bereits beschlossenen Luftreinhalte- und Klimaschutzmaßnahmen enthält, das Szenario „mit zusätzlichen Maßnahmen“ (With Additional Measures Scenario, WAM), das zusätzliche Maßnahmen umfasst, mit deren Hilfe die Emissionsreduktionsverpflichtungen der neuen NEC-Richtlinie eingehalten werden sollen, sowie das „optionale Szenario“, das mögliche weitere Minderungspotenziale aufzeigen soll.

Das WM-Szenario wurde aufbauend auf dem TREMOD Trend Szenario (Version 6.21) entwickelt. Im Rahmen des Projekts wurden die Emissionsfaktoren des aktuellen HBEFA 4.2 implementiert. Das WM-Szenario enthält die aktuelle Abgasgesetzgebung für Straßenfahrzeuge, Bahn, Binnenschiffe und Luftfahrt, Maßnahmen aus dem nationalen Klimaschutzprogramm sowie eigene Annahmen zur Entwicklung bis 2040. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden über das WM-Szenario hinausgehende Maßnahmen zur Emissionsminderung recherchiert, auf dieser Basis wurden das WAM-Szenario (WM plus „Einführung Euro 7“, „Förderung Elektromobilität“ und „Anpassung Lkw-Maut“) und das optionale Szenario (WAM plus Geschwindigkeitsbeschränkungen, Stärkung Umweltverbund, City-Logistik, ökonomische Instrumente sowie Maßnahmen im Bereich Binnenschifffahrt, Flug- und Schienenverkehr) definiert.

Für alle drei Szenarien wurden für den Verkehr Emissionen der Luftschadstoffe NO_x, SO₂, NMVOC, NH₃ und PM_{2.5} in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040 berechnet.

Abstract: Assessment of emission reduction potentials of additional measures in the transport sector

In preparation for the drafting of the current national air pollution control programme, a project entitled "Assessment of emission reduction potentials of additional measures in the transport sector" was carried out. Within this framework, three scenarios were developed for the transport sector: The "With Measures Scenario" (WM), which includes all air pollution control and climate protection measures already adopted, the "With Additional Measures Scenario" (WAM), which includes additional measures to help meet the emission reduction obligations of the new NEC Directive, and the "Optional Scenario", which aims to identify possible further reduction potential.

The WM scenario was developed based on the TREMOD Trend Scenario (version 6.21). Within the project, the emission factors of the current HBEFA 4.2 were implemented. The WM scenario contains the current exhaust gas legislation for road vehicles, railways, inland waterway vessels and aviation, measures from the national climate protection programme as well as own assumptions on the development until 2040. Within the scope of a literature research, measures for emission reduction that go beyond the WM scenario were researched; on this basis, the WAM scenario (WM plus "introduction of Euro 7", "promotion of electromobility" and "adjustment of HGV toll") and the optional scenario (WAM plus speed limits, strengthening of environmental alliances, city logistics, economic instruments as well as measures in the area of inland navigation, air and rail transport) were defined.

For all three scenarios, emissions of the air pollutants NO_x, SO₂, NMVOC, NH₃ and PM_{2.5} were calculated for transport in the years 2025, 2030, 2035 and 2040.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung.....	12
Summary	20
1 Reduktion der nationalen Luftschadstoffemissionen (NEC-Richtlinie)	28
2 Aktualisierung des WM-Szenarios.....	29
3 Auswahl weiterer Maßnahmen für das nationale Luftreinhalteprogramm.....	34
3.1 Sichtung und Auswahl möglicher Maßnahmen	34
3.2 Datenbasis, Annahmen und Einzelpotenziale der Maßnahmen.....	36
3.2.1 Einführung Euro 7	37
3.2.2 Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen und Außerortsstraßen.....	40
3.2.3 Förderung Elektromobilität	42
3.2.4 Anpassung Lkw-Maut.....	47
3.2.5 Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen	49
3.2.6 Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds.....	51
3.2.7 City-Logistik.....	52
3.2.8 Flugverkehr	54
3.2.9 Schienenverkehr	58
3.2.10 Ökonomische Instrumente	62
3.3 Erstellung der Szenarien (Bündelung der Maßnahmen).....	67
3.3.1 WAM-Szenario	67
3.3.2 Optionales Szenario	68
4 Vermeidungspotenziale Gesamtübersicht	70
5 Fazit	79
6 Quellenverzeichnis	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	NO _x -Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario.....	15
Abbildung 2:	SO ₂ -Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario.....	16
Abbildung 3:	PM _{2,5} -Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario.....	17
Abbildung 4:	NMVOC-Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario.....	18
Abbildung 5:	NH ₃ -Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario.....	19
Abbildung 6:	NO _x -Emissionen im WM-Szenario	31
Abbildung 7:	SO ₂ -Emissionen im WM-Szenario.....	31
Abbildung 8:	NMVOC-Emissionen im WM-Szenario.....	32
Abbildung 9:	NH ₃ -Emissionen im WM-Szenario	32
Abbildung 10:	PM _{2,5} -Emissionen im WM-Szenario.....	33
Abbildung 11:	Herangehensweise zur Auswahl geeigneter Minderungsmaßnahmen	34
Abbildung 12:	Neuzulassungsanteile von Pkw mit elektrischem Antrieb	44
Abbildung 13:	Neuzulassungsanteile von SNF und LNF mit elektrischem Antrieb.....	45
Abbildung 14:	Neuzulassungsanteile von mobilen Zweirädern (MZR) und Bussen mit elektrischem Antrieb	45
Abbildung 15:	Anteile elektrischer Traktion im Schienenverkehr im WM-Szenario und bei umgesetzter Maßnahme	59
Abbildung 16:	Absolute NO _x -Emissionen des Verkehrs in den Szenarien	71
Abbildung 17:	Absolute SO ₂ -Emissionen des Verkehrs in den Szenarien.....	71
Abbildung 18:	Absolute NMVOC-Emissionen des Verkehrs in den Szenarien.....	72
Abbildung 19:	Absolute NH ₃ -Emissionen des Verkehrs in den Szenarien	72
Abbildung 20:	Absolute PM _{2,5} -Emissionen des Verkehrs in den Szenarien	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	NO _x -Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres	15
Tabelle 2:	SO ₂ -Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres	16
Tabelle 3:	PM _{2,5} -Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres	17
Tabelle 4:	NMVOC-Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres	18

Tabelle 5:	NH ₃ -Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres	19
Tabelle 6:	Reduktionsverpflichtungen der nationalen Emissionen	28
Tabelle 7:	Verkehrsleistungen im WM-Szenario	30
Tabelle 8:	Angenommene Emissionsfaktoren Euro 7 und Änderung zu Euro 6-d/VI C-E im Jahr 2030.....	38
Tabelle 9:	Annahmen und Berechnung – Einführung Euro 7.....	38
Tabelle 10:	Annahmen und Berechnung – Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen und Außerortsstraßen	41
Tabelle 11:	Annahmen und Berechnung – Förderung Elektromobilität	43
Tabelle 12:	Bestand von Elektrofahrzeugen	46
Tabelle 13:	Elektrische Fahrleistung	46
Tabelle 14:	Änderungen an den Transporten durch die Maßnahme „Anpassung Lkw-Maut“	48
Tabelle 15:	Annahmen und Berechnung – Anpassung Lkw-Maut	49
Tabelle 16:	Annahmen und Berechnung – Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen	50
Tabelle 17:	Annahmen und Berechnung – Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds	52
Tabelle 18:	Annahmen und Berechnung – City-Logistik	53
Tabelle 19:	Änderungen an den Preisen und Verkehrsmengen durch die Maßnahme „Erhöhung der Luftverkehrssteuer“	54
Tabelle 20:	Annahmen und Berechnung – Erhöhung der Luftverkehrssteuer	55
Tabelle 21:	Änderungen an den Preisen und Verkehrsmengen durch die Maßnahme „Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt“	56
Tabelle 22:	Annahmen und Berechnung – Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt	57
Tabelle 23:	Annahmen und Berechnung – Elektrifizierung Schienenverkehr	58
Tabelle 24:	Änderungen an den Verkehrsmengen durch die Maßnahme „Stärkung SPFV: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung“	60
Tabelle 25:	Annahmen und Berechnung – Stärkung SPFV: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung	61
Tabelle 26:	Annahmen und Berechnung – Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel	63
Tabelle 27:	Annahmen und Berechnung – Abschaffung der Entfernungspauschale	64

Tabelle 28:	Annahmen und Berechnung – Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen	65
Tabelle 29:	Annahmen und Berechnung – Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut.....	66
Tabelle 30:	Fahrleistungen nach Antriebstechnologie und Abgasnorm	68
Tabelle 31:	NO _x -Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel	74
Tabelle 32:	SO ₂ -Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel	75
Tabelle 33:	NMVOC-Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel.....	76
Tabelle 34:	NH ₃ -Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel	77
Tabelle 35:	PM _{2,5} -Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel.....	78
Tabelle 36:	Minderungspotenziale des WAM-Szenarios	80
Tabelle 37:	THG-Emissionen im Jahr 2030 in den Szenarios.....	81

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
ASC	Ammonia Slip Catalyst (dt. Ammoniakschlupf-Katalysator)
BAB	Bundesautobahn
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Battery Electric Vehicle (dt. Batterieelektrisches Fahrzeug)
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DOC	Diesel-Oxidations-Katalysator
DPF	Diesel-Partikelfilter
EMMa	Emissionsminderungsmaßnahmenbank
EV	Electric Vehicle (dt. Fahrzeug mit elektrischer Traktion)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (dt. Brennstoffzellenfahrzeug)
FKZ	Forschungskennzahl
FL	Fahrleistung
GG	Grundgesetz
HGV	Heavy goods vehicle (dt. schweres Nutzfahrzeug)
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
KSG	Klimaschutzgesetz
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
LTO	Landing and Take-Off (dt. Start und Landung)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MZR	Mobiles Zweirad
NEC	National Emission Ceilings (dt. Emissionshöchstmengen)
NLRP	Nationales Luftreinhalteprogramm
NH₃	Ammoniak
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds (dt. flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)
NO_x	Stickstoffoxide
OPF	Otto-Partikelfilter
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (dt. Hybrid-Fahrzeug mit externer Lademöglichkeit)
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter (dt. Feinstaub)
PM_{2,5}	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser <2,5 Mikrometern
PM₁₀	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser <10 Mikrometern
PtL	Power to Liquid (dt. Synthetischer flüssiger Kraftstoff aus Strom)

RED	Renewable Energy Directive (dt. Erneuerbare-Energien-Richtlinie)
RDE	Real Driving Emissions (dt. Emissionen im praktischen Fahrbetrieb)
SCR	Selective Catalytic Reduction (dt. Selektive katalytische Reduktion)
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SO₂	Schwefeldioxid
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
THG	Treibhausgase
tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transport Emission Model (dt. Transportemissionenmodell)
UBA	Umweltbundesamt
VL	Verkehrsleistung
WAM-Szenario	With Additional Measures Scenario (dt. Szenario „mit zusätzlichen Maßnahmen“)
WM-Szenario	With Measures Scenario (dt. Szenario „mit Maßnahmen“)

Zusammenfassung

Die Richtlinie (EU) 2016/2284 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe legt für alle EU-Mitgliedstaaten nationale Emissionsreduktionsverpflichtungen für Stickstoffoxide (NO_x), Schwefelverbindungen (dargestellt als SO₂), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC), Ammoniak (NH₃) und Feinstaub (PM_{2.5}) fest, die ab dem Jahr 2020 bzw. 2030 gegenüber dem Jahr 2005 einzuhalten sind. Darüber hinaus sieht die Richtlinie die Erarbeitung nationaler Luftreinhalteprogramme vor, die mindestens alle vier Jahre zu aktualisieren sind (Artikel 6 und 10 der Richtlinie). Diese Luftreinhalteprogramme enthalten Maßnahmen(pakete), die dazu geeignet sind, die festgelegten Emissionsreduktionsverpflichtungen in Zukunft einzuhalten.

Deutschland hat im Mai 2019 das erste nationale Luftreinhalteprogramm an die EU-Kommission berichtet. Die Basis dieses Programms bildeten zwei unterschiedliche Emissionsszenarien: ein Szenario „mit Maßnahmen“ (englisch: With Measures Scenario, WM), das alle bereits beschlossenen Luftreinhalte- und Klimaschutzmaßnahmen enthält, und ein Szenario „mit zusätzlichen Maßnahmen“ (With Additional Measures Scenario, WAM), das zusätzliche Maßnahmen umfasst, mit deren Hilfe die Emissionsreduktionsverpflichtungen der NEC-Richtlinie eingehalten werden können.

In 2023 muss Deutschland ein aktualisiertes nationales Luftreinhalteprogramm vorlegen. Das aktualisierte Programm wird ebenfalls ein WM- und ein WAM-Szenario enthalten. Der Verkehr ist eine der wichtigsten Quellgruppen für Luftschadstoffe, insbesondere für die Stickstoffoxide. Daher ist es notwendig, Maßnahmen im Verkehrsbereich für ein WAM-Szenario abzustimmen und die Minderungspotenziale dieser Maßnahmen auf Basis eines aktualisierten Verkehrsszenarios neu zu bewerten.

Zur Vorbereitung der Erstellung des aktuellen nationalen Luftreinhalteprogrammes wurde ein Projekt mit dem Titel „Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen“ durchgeführt. Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse dieses Projekts.

Im ersten Schritt des Projekts wurde zunächst das **WM-Szenario** aktualisiert. Im nächsten Schritt wurde eine Liste von **Minderungsmaßnahmen** zusammengestellt, auf deren Basis zwei weitere Emissionsprognosen entwickelt wurden: ein aktualisiertes **WAM-Szenario**¹, das Maßnahmen enthält, bei deren Umsetzung die Minderungsverpflichtungen der Emissionen erreicht werden, sowie ein **optionales Szenario**, das zusätzliche Maßnahmen enthält und damit über das WAM-Szenario hinausgeht.

WM-Szenario

Basis für die Berechnung der Emissionen des Verkehrs ist TREMOD (Transport Emission Model, hier: Version 6.21). TREMOD enthält neben den Emissionen der Realjahre bis 2021 (in der aktuellen Version) auch Prognosen bis 2050 (Trendszenario).

Im Rahmen dieses Projekts wurde aufbauend auf dem TREMOD Trend Szenario das WM-Szenario für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040 entwickelt. Dieses beinhaltet die aktuelle Abgasgesetzgebung für Straßenfahrzeuge, d. h. insbesondere Euro 6 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie Euro VI für schwere Nutzfahrzeuge, und entsprechende Entwicklungen für die Verkehrsträger Bahn, Binnenschiff und Luftfahrt. Weiterhin wurden bis zum Jahr 2030 alle

¹ Das hier vorliegende WAM-Szenario dient als eine Arbeitsgrundlage des UBA für die Erstellung des Entwurfs des nationalen Luftreinhalteprogramms. Es kann sich vom WAM-Szenario im Entwurf des Bundesumweltministeriums (BMUV) sowie des nationalen Luftreinhalteprogramms der Bundesregierung unterscheiden.

Maßnahmen aus dem nationalen Klimaschutzprogramm „KSP (Jan 2020)“ (Öko-Institut et al., 2020) berücksichtigt, welche sich größtenteils auch im Projektionsbericht 2021 (Repenning, 2021) wiederfinden. Für den Zeitraum nach 2030 wurden eigene Annahmen getroffen, beispielsweise zur Fortschreibung der Bestände und Verkehrsleistungen anhand sozioökonomischer Daten und Prognosen.

Zusätzlich erfolgte im Rahmen dieses Projektes eine Aktualisierung des Trendszenarios auf die Werte aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) Version 4.2 (Notter et al., 2022), das im Januar 2022 veröffentlicht wurde.

Minderungsmaßnahmen

Auf Basis einer Literaturrecherche wurden Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen im Verkehrsbereich identifiziert. Maßnahmen, die ganz oder teilweise bereits im WM-Szenario enthalten sind, wurden nicht betrachtet, bzw. nur in dem Maße, in dem sie über das WM-Szenario hinausgehen. Ein Beispiel dafür sind CO₂-Standards für Pkw, welche die bereits im WM-Szenario angesetzten Standards bis 2030 weiter verschärfen und zusätzliche Vorgaben bis 2035 beinhalten.

Maßnahmen, die stark voneinander abhängen, Synergien schaffen oder bezüglich ihrer Auswirkungen nicht voneinander trennbar sind, wurden zu Maßnahmenbündeln zusammengefasst. Überwiegend unabhängige Maßnahmen blieben als Einzelmaßnahmen in der Betrachtung. In Absprache mit dem Umweltbundesamt (UBA) wurden folgende Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel hinsichtlich ihrer Minderungswirkung betrachtet:

- ▶ Einführung von Euro 7
- ▶ Geschwindigkeitsbeschränkungen: 130 km/h auf Autobahnen und 80 km/h auf sonstigen Außerortsstraßen
- ▶ Förderung der Elektromobilität
- ▶ Anpassung der Lkw-Maut
- ▶ Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen
- ▶ Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds (zwei Ambitionsniveaus)
- ▶ City-Logistik
- ▶ Flugverkehr
 - Erhöhung der Luftverkehrssteuer
 - Förderung zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt
- ▶ Schienenverkehr
 - Elektrifizierung Schienenverkehr
 - Stärkung Schienenpersonenfernverkehr: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung
- ▶ Ökonomische Instrumente
 - Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut

- Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel
- Abschaffung der Entfernungspauschale
- Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen: Reform des Dienstwagenprivilegs

WAM-Szenario

In Absprache mit dem UBA wurde das WAM-Szenario wie folgt definiert: Aufbauend auf dem WM-Szenario enthält es zusätzlich die Maßnahmen „Einführung Euro 7“, „Förderung Elektromobilität“ und „Anpassung Lkw-Maut“.

Das WAM-Szenario betrifft damit insbesondere den Straßenverkehr; die Maßnahme „Anpassung Lkw-Maut“ führt aber auch zu (leichten) Verlagerungen auf Schiene und Binnengewässer. Beim Flugverkehr gibt es keine Änderungen gegenüber dem WM-Szenario.

Optionales Szenario

Das optionale Szenario baut auf dem WAM-Szenario auf und enthält, mit Ausnahme der Pkw-Maut (deren Umsetzung zumindest bis 2030 extrem unrealistisch erscheint), alle weiteren betrachteten Maßnahmen. Bei unterschiedlichen Ausprägungen wurde jeweils die stärker wirkende Variante gewählt. Es stellt somit das Maximalpotenzial aller analysierten Maßnahmen (abseits der Pkw-Maut) dar.

Übersicht Vermeidungspotenziale

Sowohl für die betrachteten Maßnahmen wie auch für die Szenarien wurden jeweils für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040 Emissionen der Luftschadstoffe NO_x, SO₂, PM_{2.5}, NMVOC und NH₃ berechnet. Weil die in den Szenarien kombinierten Maßnahmen nicht unabhängig wirken, sind die in den Szenarien erzielbaren Gesamtminderungen jeweils geringer als die Summen der Minderungen der enthaltenen Einzelmaßnahmen.

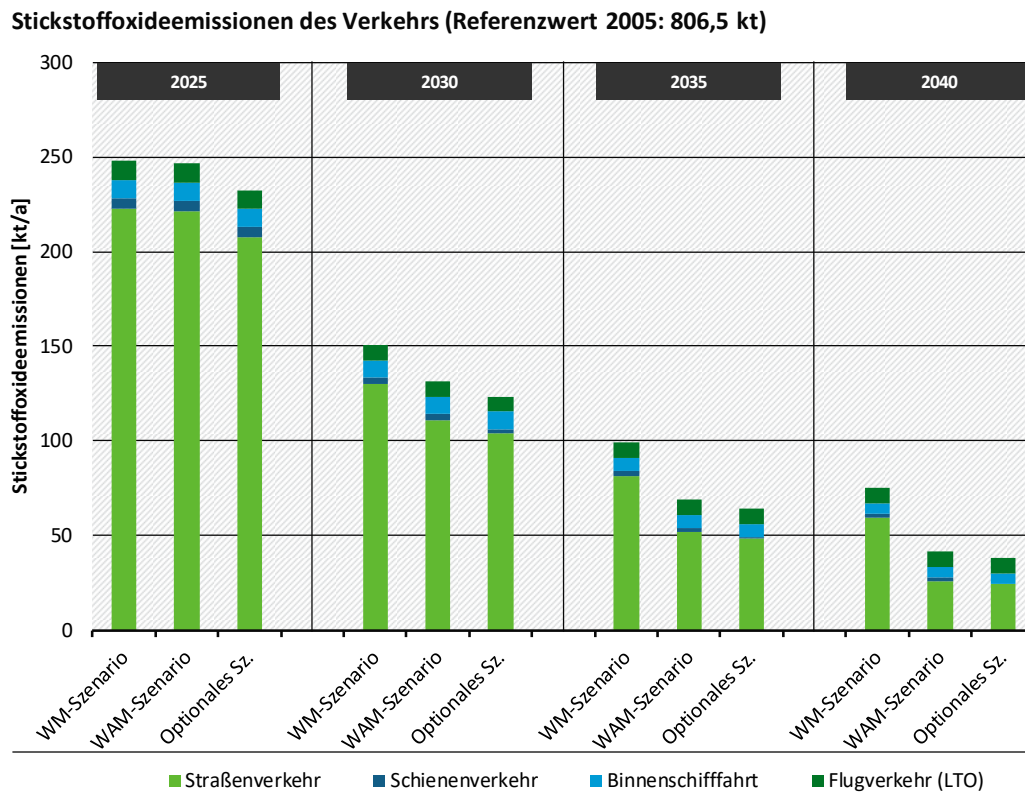
Die Zusammenfassung beschränkt sich auf die Szenarien, die Werte für die Einzelmaßnahmen sind im Bericht nachzulesen.

Im Folgenden werden für jeden betrachteten Luftschadstoff jeweils die Emissionen des WM-Szenarios, des WAM-Szenarios und des Optionalen Szenarios für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040 differenziert nach Quellkategorien grafisch dargestellt.

Zusätzlich ist oben in den Abbildungen als Referenz der entsprechende Zahlenwert des Jahres 2005 angegeben. Die Emissionen des Jahres 2005 sind die Referenzwerte, für die die Minderungsziele der NEC-Richtlinie gelten. Zu beachten ist jedoch, dass diese Minderungsziele sektorenübergreifend definiert sind, sodass keine absoluten Zielwerte für die Szenarijahren im Verkehr definiert sind.

Nach jeder Abbildung werden pro Schadstoff für die Verkehrsträger in Summe tabellarisch die Minderungspotenziale des WAM-Szenarios und des optionalen Szenarios jeweils gegenüber dem WM-Szenario des gleichen Jahres ausgewiesen.

Abbildung 1: NO_x-Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario



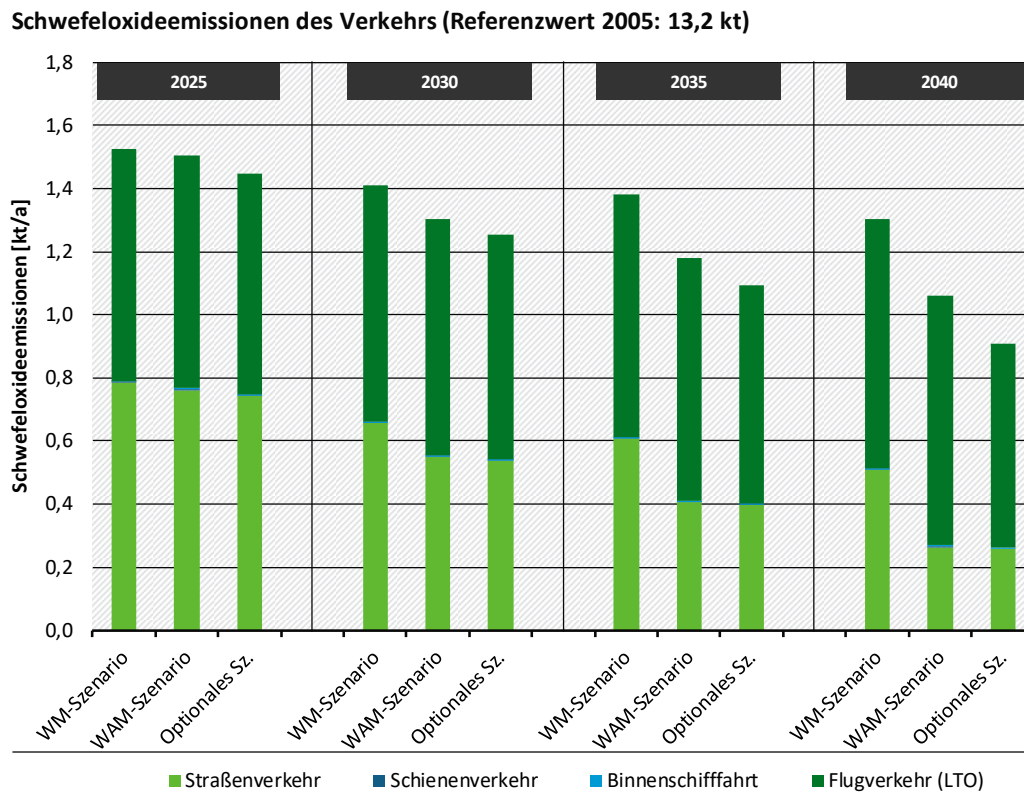
Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 1: NO_x-Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres

Minderung NO _x in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM-Szenario	1,59	18,91	29,83	33,76
Optionales Szenario	24,90	34,46	39,99	41,26

Im für die Minderungsverpflichtungen entsprechend der NEC-Richtlinie relevanten Jahr 2030 ergeben sich im WAM-Szenario ggü. dem WM-Szenario Minderungen der NO_x-Emissionen von knapp 19 kt. Das im optionalen Szenario abgeschätzte maximale Minderungspotenzial für die NO_x-Emissionen im Jahr 2030 liegt bei ca. 34 kt.

Abbildung 2: SO₂-Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario



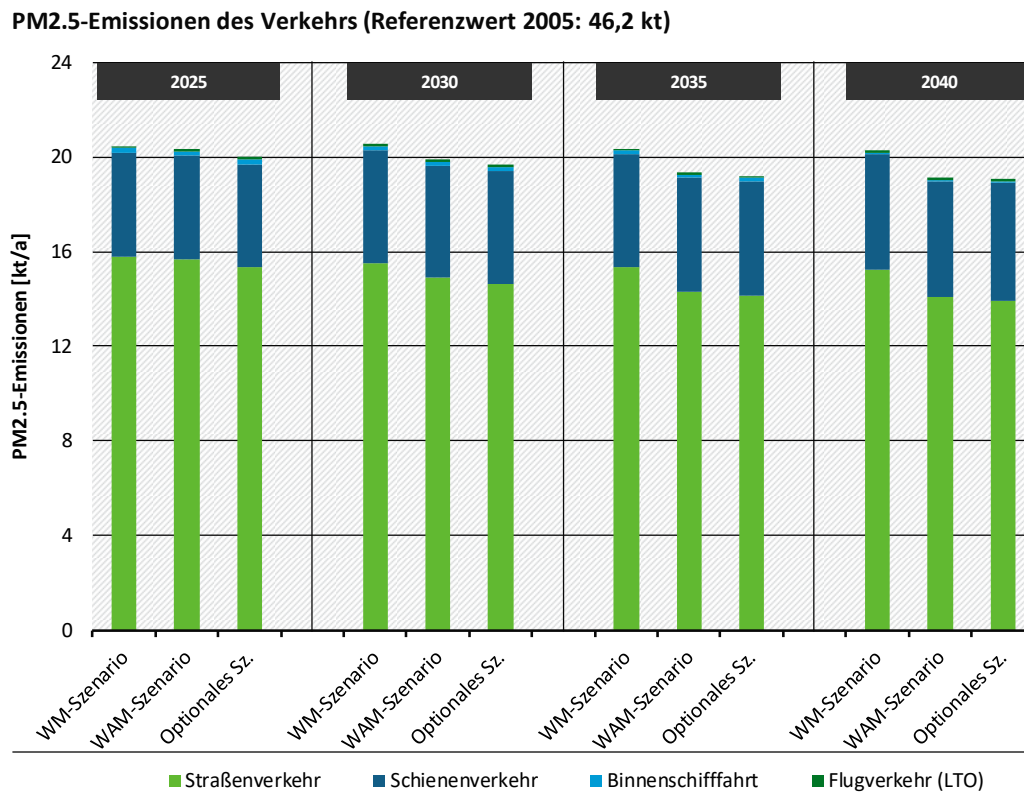
Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 2: SO₂-Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres

Minderung SO ₂ in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM-Szenario	0,023	0,108	0,201	0,245
Optionales Szenario	0,104	0,191	0,321	0,425

Im für die Minderungsverpflichtungen entsprechend der NEC-Richtlinie relevanten Jahr 2030 ergeben sich im WAM-Szenario ggü. dem WM-Szenario Minderungen der SO₂-Emissionen von ca. 0,1 kt. Das im optionalen Szenario abgeschätzte maximale Minderungspotenzial für die SO₂-Emissionen im Jahr 2030 liegt bei knapp 0,2 kt.

Abbildung 3: PM_{2,5}-Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario



Quelle: Eigene Darstellung.

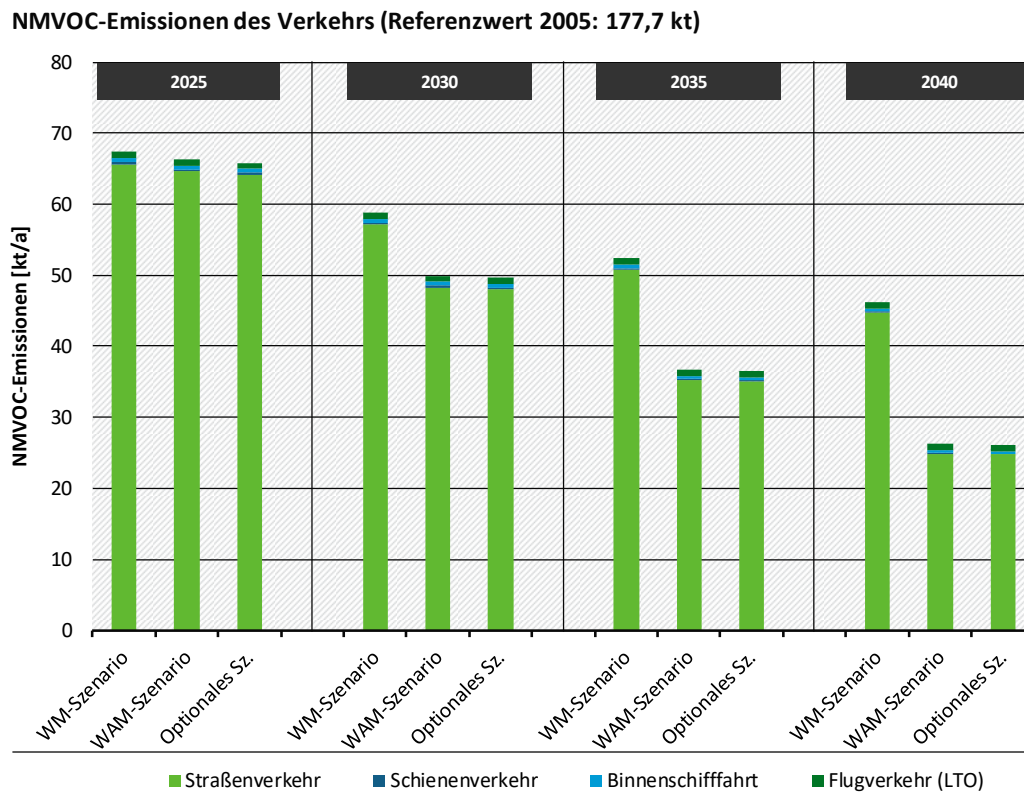
Tabelle 3: PM_{2,5}-Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres

Minderung PM _{2,5} in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM-Szenario	0,12	0,64	1,02	1,15
Optionales Szenario	0,93	1,61	2,22	2,53

Anmerkung: Inklusive Abriebemissionen. Änderungen des Abriebs aufgrund der Geschwindigkeitsänderung werden nicht berücksichtigt.

Im für die Minderungsverpflichtungen entsprechend der NEC-Richtlinie relevanten Jahr 2030 ergeben sich im WAM-Szenario ggü. dem WM-Szenario Minderungen der PM_{2,5}-Emissionen von ca. 0,6 kt. Das im optionalen Szenario abgeschätzte maximale Minderungspotenzial für die PM_{2,5}-Emissionen im Jahr 2030 liegt bei ca. 1,6 kt.

Abbildung 4: NMVOC-Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario



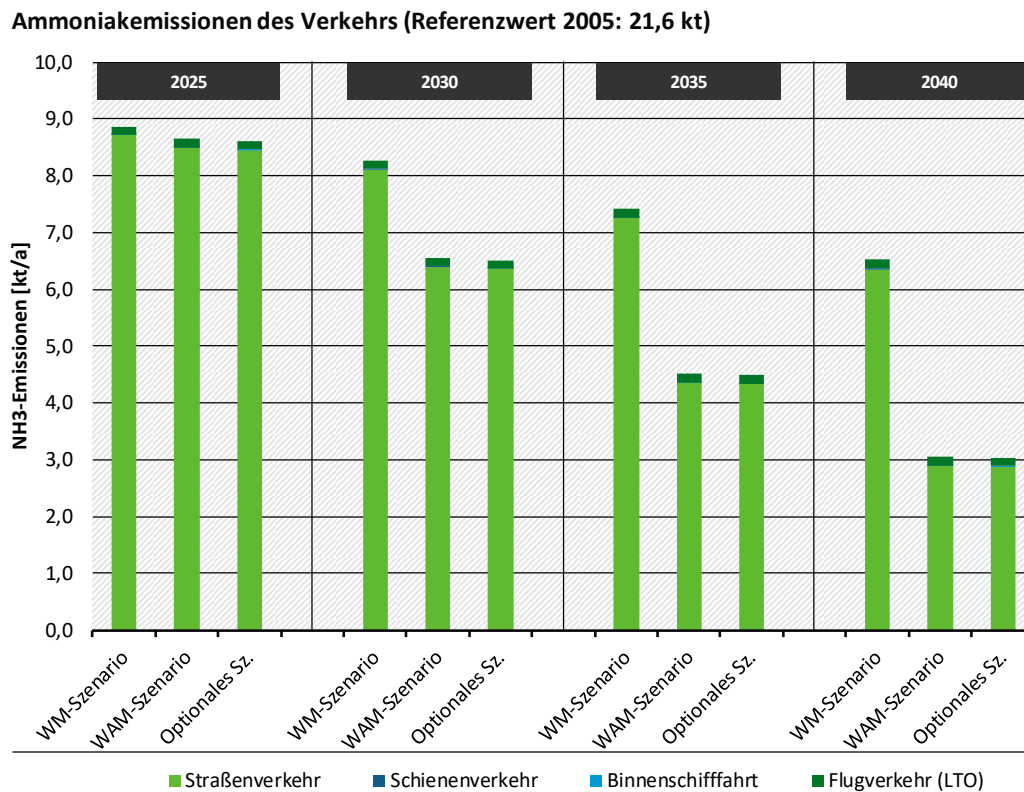
Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4: NMVOC-Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres

Minderung NMVOC in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM-Szenario	1,05	8,86	15,63	19,94
Optionales Szenario	3,50	12,02	18,72	22,56

Im für die Minderungsverpflichtungen entsprechend der NEC-Richtlinie relevanten Jahr 2030 ergeben sich im WAM-Szenario ggü. dem WM-Szenario Minderungen der NMVOC-Emissionen von knapp 9 kt. Das im optionalen Szenario abgeschätzte maximale Minderungspotenzial für die NMVOC-Emissionen im Jahr 2030 liegt bei ca. 12 kt.

Abbildung 5: NH₃-Emissionen nach Quellkategorien im WM-, WAM- und optionalen Szenario



Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5: NH₃-Minderungspotenziale der betrachteten Szenarien jeweils ggü. dem WM-Szenario des gleichen Jahres

Minderung NH ₃ in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM-Szenario	0,22	1,72	2,89	3,46
Optionales Szenario	0,50	2,15	3,36	3,85

Im für die Minderungsverpflichtungen entsprechend der NEC-Richtlinie relevanten Jahr 2030 ergeben sich im WAM-Szenario ggü. dem WM-Szenario Minderungen der NH₃-Emissionen von ca. 1,7 kt. Das im optionalen Szenario abgeschätzte maximale Minderungspotenzial für die NH₃-Emissionen im Jahr 2030 liegt bei ca. 2,2 kt.

Summary

Directive (EU) 2016/2284 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants sets national emission reduction obligations for nitrogen oxides (NO_x), sulphur dioxide (represented as SO₂), non-methane volatile organic compounds (NMVOC), ammonia (NH₃) and fine particulate matter (PM_{2.5}) for all EU Member States, to be met from 2020 and 2030 respectively compared to 2005. In addition, the Directive requires the development of national air pollution control programmes to be updated at least every four years (Articles 6 and 10 of the Directive). These national air pollution control programmes contain (packages of) measures that are suitable for meeting the specified emission reduction obligations in the future.

Germany reported the first national air pollution control programme to the EU Commission in May 2019. This programme was based on two different emission scenarios: a With Measures Scenario (WM), which contains all the air pollution control and climate protection measures already adopted, and a With Additional Measures Scenario (WAM), which includes additional measures that can be used to meet the emission reduction obligations of the NEC Directive.

In 2023, Germany must submit an updated national air pollution control programme. The updated programme will also include a WM and a WAM scenario. Transport is one of the most important source groups for air pollutants, especially for nitrogen oxides. Therefore, it is necessary to coordinate measures in the transport sector for a WAM scenario and to reassess the reduction potentials of these measures on the basis of an updated transport scenario.

In preparation of the current national air pollution control programme, a project entitled "Assessment of Emission Reduction Potentials of Additional Transport Measures" was carried out. This report documents the results of this project.

In the first step of the project, the **WM scenario** was updated. The next step was to compile a list of **mitigation measures**, which were incorporated into two additional scenarios: an updated **WAM scenario**², which contains measures that, if implemented, would achieve the emission reduction commitments, and an **optional scenario**, which contains additional measures and thus goes beyond the WAM scenario.

WM scenario

The basis for the calculation of transport emissions is TREMOD (Transport Emission Model, here: version 6.21). In addition to the emissions of the historic years until 2021 (in the current version), TREMOD also contains forecasts until 2050 (trend scenario).

Within the framework of this project, the WM scenario for the years 2025, 2030, 2035 and 2040 was developed based on the TREMOD Trend Scenario. This includes the current exhaust emission legislation for road vehicles, i.e. in particular Euro 6 for passenger cars and light commercial vehicles and Euro VI for heavy commercial vehicles, and corresponding developments for the transport modes rail, inland waterways and aviation, were taken into account. Furthermore, all measures from the national climate protection programme "KSPr (Jan 2020)" (Öko-Institut et al., 2020) were taken into account up to 2030, which are also largely reflected in the 2021 projection report (Repenning, 2021). For the period after 2030, own assumptions were made, e.g. to update the stock and transport performance based on socio-economic data and forecasts.

² 'WAM scenario' within the scope of this report means a proposed WAM scenario, that could differ from the WAM scenario of the draft national air pollution control programme as well as from the final WAM scenario of the German national air pollution control programme (expected to be updated in 2023). Therefore, measures and assumptions can differ from WAM scenarios outside the scope of this report.

Additionally, within this project an update of the trend scenario to the values from the Handbook for Emission Factors of Road Traffic (HBEFA) version 4.2 (Notter et al., 2022) published in January 2022 took place.

Mitigation measures

Based on a literature review, measures to reduce pollutant emissions in the transport sector were identified. Measures that are already fully or partially included in the WM scenario were not considered, or only to the extent that they go beyond the WM scenario. An example of this are CO₂ standards for passenger cars, which further tighten the standards already set in the WM scenario until 2030 and provide additional standards until 2035.

Measures that are highly interdependent, create synergies or are inseparable in terms of their impacts were combined into bundles of measures. Predominantly independent measures remained in the analysis as individual measures. In consultation with the German Environment Agency (UBA), the following measures/bundles were considered with regard to their reduction effect:

- ▶ Introduction of Euro 7
- ▶ Speed limits: 130 km/h on motorways and 80 km/h on other nonurban roads
- ▶ Promotion of electromobility
- ▶ Adjustment of truck tolls
- ▶ Inland navigation: use of shore-side electricity in ports
- ▶ Strengthening and expanding ecological forms of mobility (considering two ambition levels)
- ▶ City logistics
- ▶ Air traffic
 - Increase air traffic tax
 - Promoting the development of electricity-based fuels and advanced biofuels for aviation
- ▶ Rail transport
 - Electrification of rail transport
 - Strengthening of long-distance passenger rail transport: introduction of the "Deutschlandtakt" with expansion of infrastructure and digitalisation
- ▶ Economic instruments
 - Introduction of a mileage-based car toll
 - Alignment of tax rates on petrol and diesel
 - Abolition of the commuting allowance
 - Taxation of company cars: reform of the company car privilege

WAM scenario

In consultation with UBA, the WAM scenario was defined as follows: Building on the WM scenario, it additionally contains the measures "Introduction of Euro 7", "Promotion of electromobility" and "Adjustment of HGV toll".

The WAM scenario thus affects road transport in particular; however, the measure "Adjustment of HGV toll" also leads to (slight) shifts to rail and inland waterways. There are no changes in air traffic compared to the WAM scenario.

Optional scenario

The optional scenario builds on the WAM scenario and additionally contains all the other measures except for the car toll (whose implementation seems extremely unrealistic at least until 2030); in the case of different characteristics, the more effective variant was chosen in each case. It thus represents the maximum potential of all the measures analysed (apart from the car toll).

Overview of avoidance potentials

Emissions of the air pollutants NO_x , SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, NMVOC and NH_3 were calculated for the years 2025, 2030, 2035 and 2040 for the measures considered as well as for the scenarios. Since the effect of the measures in combination is not independent of each other, the total reductions achievable in the scenarios are in each case lower than the sums of the reductions of the individual measures.

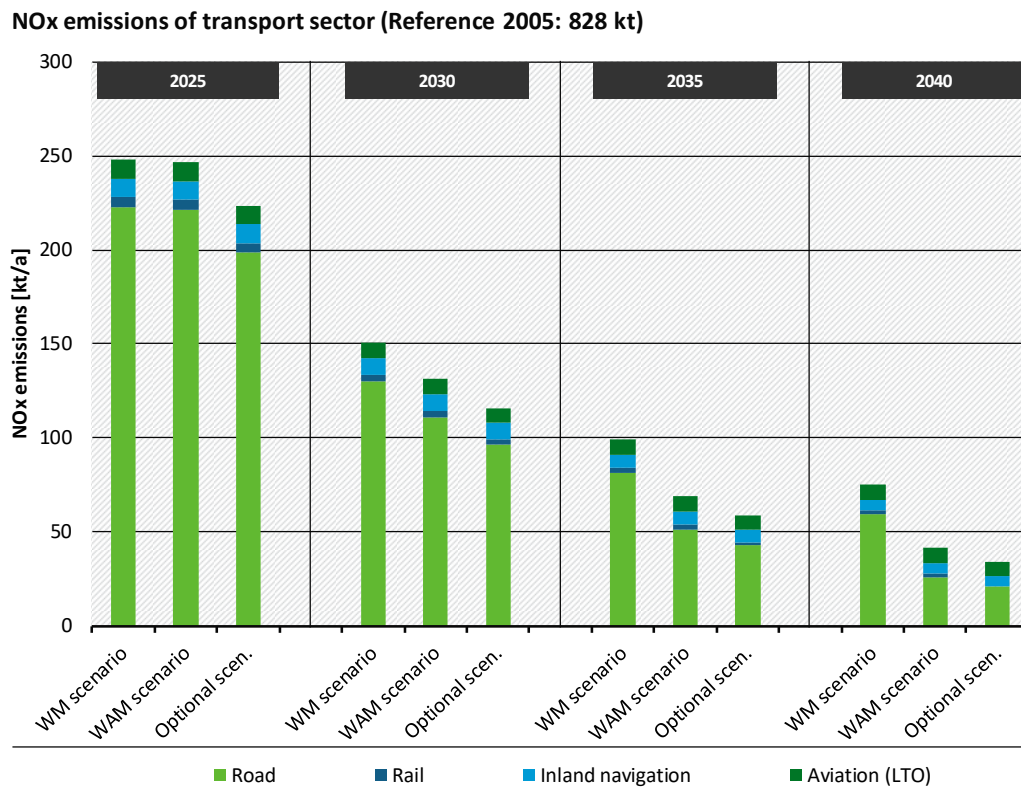
The summary is limited to the scenarios; the results for the individual measures can be found in the report.

In the following, the emissions of the WM scenario, the WAM scenario and the optional scenario for the years 2025, 2030, 2035 and 2040 are shown graphically for each air pollutant considered, differentiated by source category.

In addition, the corresponding numerical value of the year 2005 is given at the top of the figures as a reference. The 2005 emissions are the reference values to which the reduction targets of the NEC Directive apply. It should be noted, however, that these reduction targets are defined across sectors, so that no absolute target values are defined for the scenario years in transport.

After each figure, the reduction potentials of the WAM scenario and the optional scenario are shown in total for each pollutant for the modes of transport, each compared to the WM scenario of the same year.

Figure 1: NO_x emissions by source in the WM, WAM and optional scenario



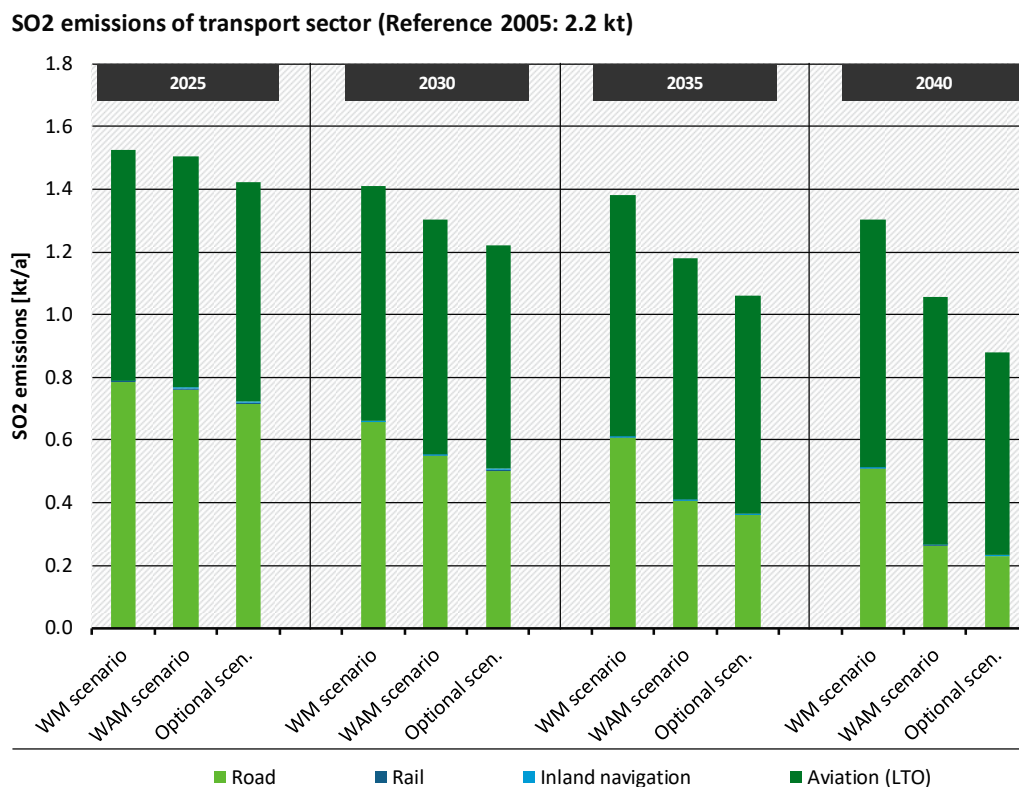
Source: Own figure.

Table 1: NO_x mitigation in the WAM and optional scenario compared to the WM scenario

Mitigation NO _x in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM scenario	1.59	18.91	29.83	33.76
Optional scenario	24.90	34.46	39.99	41.26

In the year 2030, which is relevant for the reduction obligations according to the NEC Directive, the WAM scenario results in reductions of NO_x emissions of just under 19 kt compared to the WM scenario. The maximum reduction potential for NO_x emissions estimated in the optional scenario in 2030 is approx. 34 kt.

Figure 2: SO₂ emissions by source in the WM, WAM and optional scenario



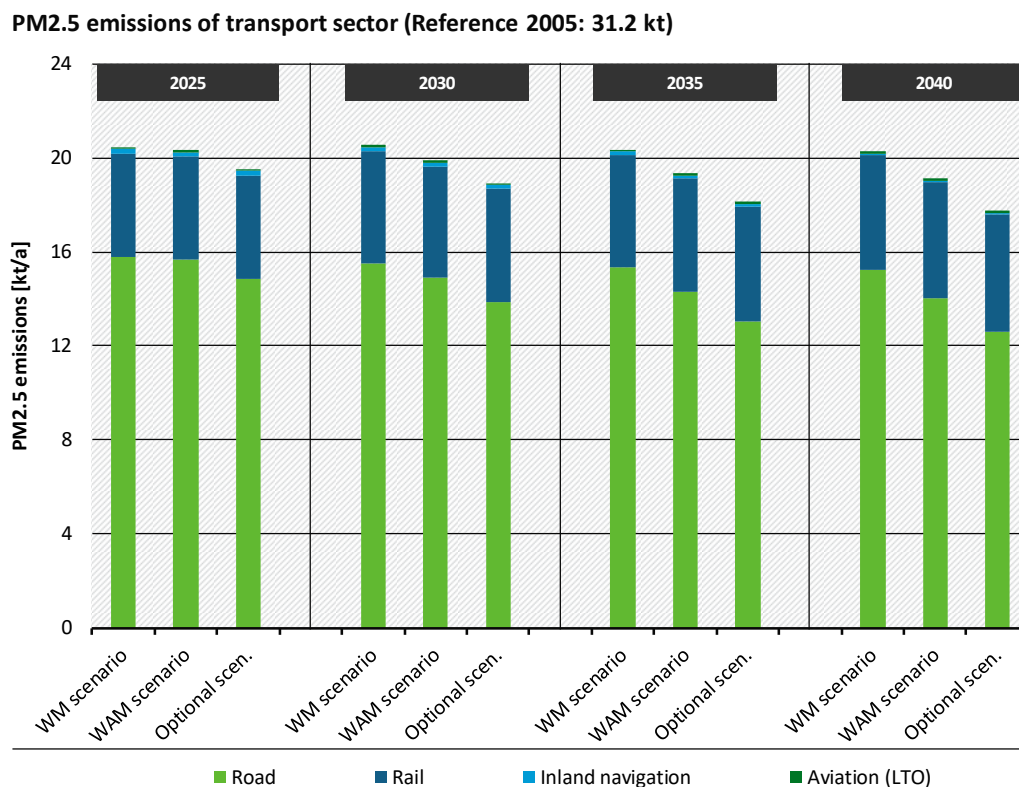
Source: Own figure.

Table 2: SO₂ mitigation in the WAM and optional scenario compared to the WM scenario

Mitigation SO ₂ in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM scenario	0.023	0.108	0.201	0.245
Optional scenario	0.104	0.191	0.321	0.425

In the year 2030, which is relevant for the reduction obligations according to the NEC Directive, the WAM scenario results in reductions of SO₂ emissions of approx. 0.1 kt compared to the WM scenario. The maximum reduction potential for SO₂ emissions estimated in the optional scenario in 2030 is just under 0.2 kt in this year.

Figure 3: PM_{2.5} emissions by source in the WM, WAM and optional scenario



Source: Own figure.

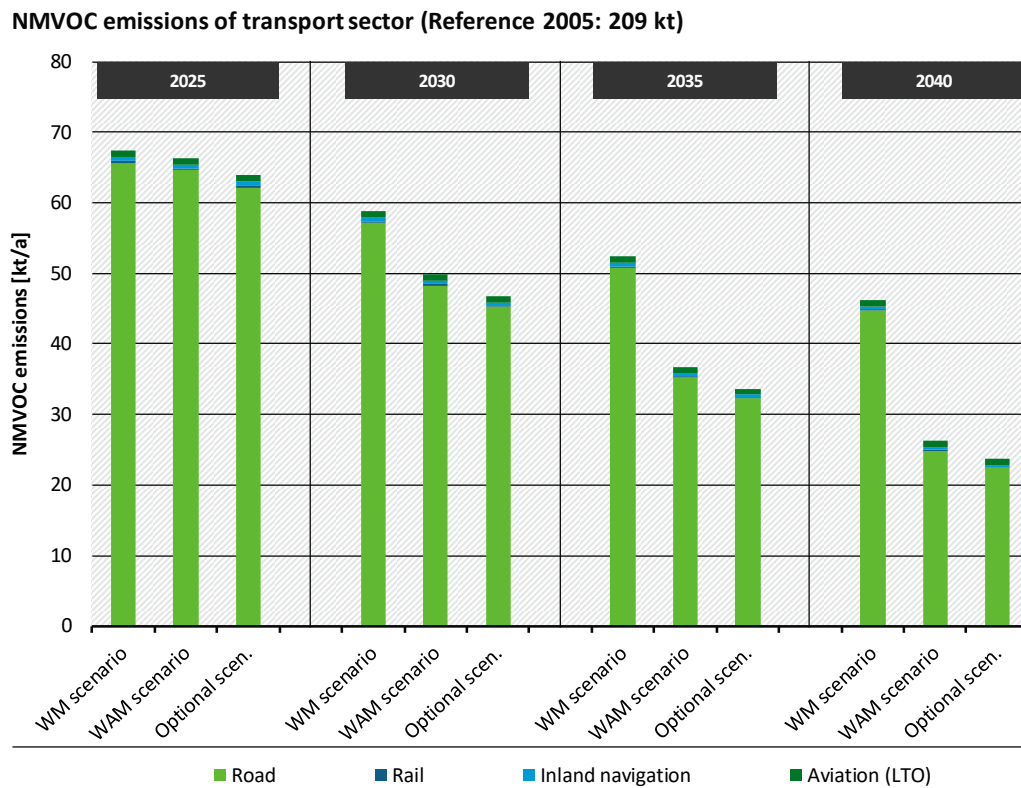
Table 3: PM_{2.5} mitigation in the WAM and optional scenario compared to the WM scenario

Mitigation PM _{2.5} in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM scenario	0.12	0.64	1.02	1.15
Optional scenario	0.93	1.61	2.22	2.53

Note: Including abrasion emissions. Changes in abrasion due to speed change are not taken into account.

In the year 2030, which is relevant for the reduction obligations according to the NEC Directive, the WAM scenario results in reductions of PM_{2.5} emissions of approx. 0.6 kt compared to the WM scenario. The maximum reduction potential for PM_{2.5} emissions estimated in the optional scenario in 2030 is approx. 1.6 kt.

Figure 4: NMVOC emissions by source in the WM, WAM and optional scenario



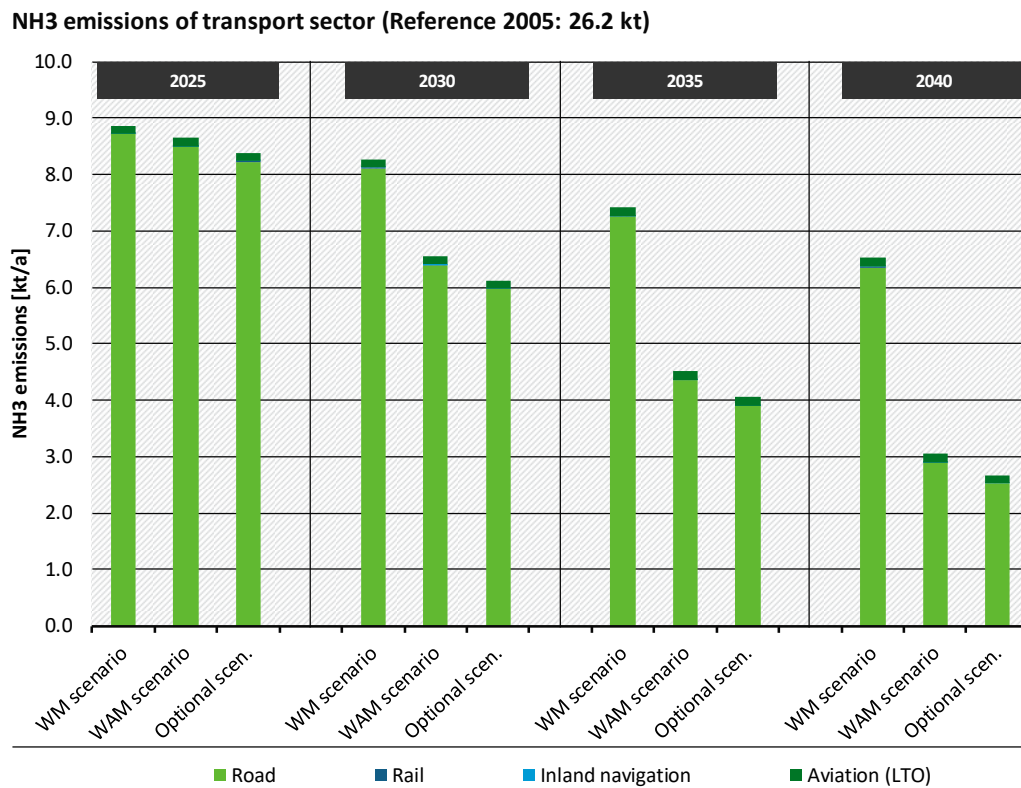
Source: Own figure.

Table 4: NMVOC mitigation in the WAM and optional scenario compared to the WM scenario

Mitigation NMVOC in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM scenario	1.05	8.86	15.63	19.94
Optional scenario	3.50	12.02	18.72	22.56

In the year 2030, which is relevant for the reduction obligations according to the NEC Directive, the WAM scenario results in reductions of NMVOC emissions of just under 9 kt compared to the WM scenario. The maximum reduction potential for NMVOC emissions estimated in the optional scenario in 2030 is approx. 12 kt.

Figure 5: NH₃ emissions by source in the WM, WAM and optional scenario



Source: Own figure.

Table 5: NH₃ mitigation in the WAM and optional scenario compared to the WM scenario

Mitigation NH ₃ in kt/a	2025	2030	2035	2040
WAM scenario	0.22	1.72	2.89	3.46
Optional scenario	0.50	2.15	3.36	3.85

In the year 2030, which is relevant for the reduction obligations according to the NEC Directive, the WAM scenario results in reductions of NH₃ emissions of approx. 1.7 kt compared to the WM scenario. The maximum reduction potential for NH₃ emissions estimated in the optional scenario in 2030 is approx. 2.2 kt in this year.

1 Reduktion der nationalen Luftschadstoffemissionen (NEC-Richtlinie)

Die Richtlinie (EU) 2016/2284 legt für alle EU-Mitgliedstaaten die nationalen Emissionsreduktionsverpflichtungen für Stickoxide (NO_x), Schwefelverbindungen (dargestellt als SO₂), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (Non-Methane Volatile Organic Compounds: NMVOC), Ammoniak (NH₃) und Feinstaub (PM_{2.5}) fest. Die Minderungen sind in der NEC-Richtlinie für die Zeiträume 2020-2029 und ab 2030 definiert und gelten jeweils für jedes Jahr. Die NEC-Richtlinie wurde durch die Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion bestimmter Luftschadstoffe (43. BImSchV) in nationales Recht umgesetzt. Die für Deutschland geltenden Reduktionsverpflichtungen sind in Tabelle 6 angegeben. Die relativen Reduktionsverpflichtungen beziehen sich hierbei auf die Emissionen im Jahr 2005.

Tabelle 6: Reduktionsverpflichtungen der nationalen Emissionen

Verpflichtungen bezogen auf Emissionen im Jahr 2005, gültig für alle Jahre der angegebenen Zeiträume

Richtlinie 2016/2284	NO _x	SO ₂	NMVOC	NH ₃	PM _{2.5}
Reduktion ab 2020	39%	21%	13%	5%	26%
Reduktion ab 2030	65%	58%	28%	29%	43%

Quelle: (EU 2016)

Die NEC-Richtlinie sieht u. a. vor, dass mindestens alle vier Jahre nationale Luftreinhalteprogramme (NLRP) zu erarbeiten bzw. zu aktualisieren sind (Artikel 6, 10). Diese Luftreinhalteprogramme enthalten Maßnahmen, die zum Einhalten der festgelegten Emissionsreduktionsverpflichtungen in Zukunft beitragen sollen.

Die Bundesrepublik Deutschland hat im Mai 2019 das erste nationale Luftreinhalteprogramm an die EU-Kommission berichtet. Dieses Programm enthält zwei unterschiedliche Emissionsszenarien: ein Szenario „mit Maßnahmen“ (With Measures Scenario: WM), das alle bereits beschlossenen Luftreinhalte- und Klimaschutzmaßnahmen enthält, und ein Szenario „mit zusätzlichen Maßnahmen“ (With Additional Measures Scenario: WAM), das zusätzliche Maßnahmen beinhaltet, mit deren Hilfe die Emissionsreduktionsverpflichtungen der NEC-Richtlinie eingehalten werden können.

Im Jahr 2023 ist von der Bundesrepublik Deutschland ein aktualisiertes NLRP vorzulegen. Das aktualisierte Programm soll ebenfalls ein WM- und ein WAM-Szenario enthalten. Der Verkehr ist eine der wichtigsten Quellgruppen für Luftschadstoffe (insbesondere für NO_x). Gegenstand des vorliegenden Projekts ist die Überprüfung von Maßnahmen im Verkehrsbereich, die Aktualisierung des WM-Szenarios und die Erstellung des WAM-Szenarios sowie die Bewertung der Minderungspotenziale dieser Maßnahmen. Grundlage für die Szenarien stellt das Verkehrsmodell TREMOD dar.

2 Aktualisierung des WM-Szenarios

Basis für die Berechnung der Emissionen des Verkehrs ist das TREMOD-Modell (Transport Emission Model). TREMOD enthält neben den Emissionen der Realjahre bis aktuell 2021 auch die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen des Verkehrs für die Szenarienjahre bis 2050 (Trendszenario). Seit der letzten Erstellung des NLRP im Jahr 2019 gab es umfassende Anpassungen des Modells. Ziel des Projekts ist es, zunächst auf Basis des TREMOD-Trendszenarios, das WM-Szenario des NLRP zu definieren. Das WM-Szenario umfasst die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040. Im Rahmen des Projekts wurde die TREMOD-Version 6.21 verwendet, die u. a. die Grundlage für das Nationale Emissionsinventar für das Jahr 2020 bildet (Allekotte et al., 2021a). Angepasst wurden jedoch die Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr durch das im Januar 2022 veröffentlichte Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) in der Version 4.2 (Notter et al., 2022).

Das Trendszenario wurde seit dem NLRP 2019 vollständig überarbeitet. Das Szenario baut seit der TREMOD-Version 6.16 auf den Annahmen des nationalen Klimaschutzprogramms „KSPr (Jan 2020)“ (Öko-Institut et al., 2020) auf, welche sich größtenteils auch im Projektionsbericht 2021 (Repenning, 2021) wiederfinden. Für den Zeitraum nach 2030 wurden eigene Annahmen getroffen, beispielsweise zur Fortschreibung der Bestände und Verkehrsleistungen anhand sozioökonomischer Daten und Prognosen.

Das Szenario berücksichtigt bis 2030 alle Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030, z. B.:

- ▶ CO₂-Grenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030
- ▶ CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030
- ▶ die Erneuerbare-Energien-Richtlinie bis 2030
- ▶ das Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote

Zusätzlich werden die aktuelle Abgasgesetzgebung für Straßenfahrzeuge, d.h. insbesondere Euro 6 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie Euro VI für schwere Nutzfahrzeuge, und entsprechende Entwicklungen für die Verkehrsträger Bahn, Binnenschiff und Luftfahrt berücksichtigt. Detailliertere Informationen zu den Annahmen des Trendszenarios sind in (Allekotte et al., 2021a) zu finden.

Die Übergabe der Aktivitätsraten (Kraftstoffabsatz) und der Emissionsfaktoren der Stützjahre erfolgt in die Datenbank EMMA des Umweltbundesamts (weitere Informationen siehe Infobox).

Neben dem WM-Szenario ist zudem das WAM-Szenario zu erstellen. Dieses ergibt sich nicht unmittelbar aus TREMOD. Hierfür sind weitergehende Recherchen und Quantifizierungen notwendig. Das Vorgehen wird im folgenden Kapitel erläutert.

Innerhalb der Projektlaufzeit wurde die TREMOD-Version 6.41 auf Basis von TREMOD 6.21 mit den Emissionsfaktoren aus HBEFA 4.2 erstellt, welche Daten für den Nationalen Emissionsinventarbericht für das Jahr 2021 beinhaltet. Diese Version wird schlussendlich auch für die Jahre bis 2021 im NLRP verwendet.

EMMa

EMMa (Emissionsminderungsmaßnahmenbank) ist eine Ergänzung zur Inventardatenbank des Umweltbundesamtes (ZSE) und dient dazu, die Zeitreihen der Emissionsberichterstattung unter Berücksichtigung der potenziellen Wirkungen von Strategien und Maßnahmen in die Zukunft zu projizieren. Zur Prognose der Emissionen werden separate Zeitreihen für Aktivitätsraten (z.B. Kraftstoffeinsatz) und Emissionsfaktoren (z. B. Masse Schadstoff pro Energieeinheit Kraftstoff) erstellt, die Zeitreihe der Emissionen ergibt sich für jedes Stützjahr als Produkt aus Aktivitätsrate und Emissionsfaktor. Zwischen den Stützjahren kann interpoliert werden.

Der Detaillierungsgrad von EMMa entspricht dem des ZSE. Im Straßenverkehr z.B. wird differenziert nach Fahrzeugart (Pkw, Moped, Motorrad, leichtes bzw. schweres Nutzfahrzeug, Bus), Betriebsstätte (Innerortsstraße, Bundesautobahn, sonstige Außerortsstraße), Art (Antrieb, Abtrieb, Verdunstung), Kraftstofftyp, Euronormstufe und Schadstoff. In dieser Differenzierung werden jeweils Zeitreihen für Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren angelegt.

Maßnahmenszenarien werden in Form von Hypothesen für Zeitreihen formuliert. Eine Hypothese kann Veränderungen von Aktivitätsraten und/oder Emissionsfaktoren beinhalten.

Für die Emissionsdarstellung im Rahmen von EMMa werden die Emissionen nach dem Energiebilanzprinzip benötigt, für die Simulation von Luftschadstoffkonzentrationen ist es hingegen wichtig, die Emissionen bilanziert nach dem Inlandsprinzip als Eingangsdaten zu verwenden und räumlich zu verteilen. Dies betrifft insbesondere die Emissionen aus dem Verkehrssektor. Anhand des Sektors Straßenverkehr wurde mittels Sensitivitätsanalysen untersucht, welche Auswirkung die jeweilige Bilanzierungsart hat: Die Gesamtsumme der Emissionen nach Energiebilanzprinzip kann um einige Prozent von der nach Inlandsprinzip abweichen. Die Abweichungen für Maßnahmenwirkungen liegen jedoch nur noch im Bereich von Zehntel-Prozenten. Die Maßnahmenwirkungen wurden daher nach dem Energiebilanzprinzip bestimmt, und es wurde im Projekt auf die Ableitung von Faktoren zur Übertragung der Maßnahmenwirkungen auf das Inlandsprinzip verzichtet.

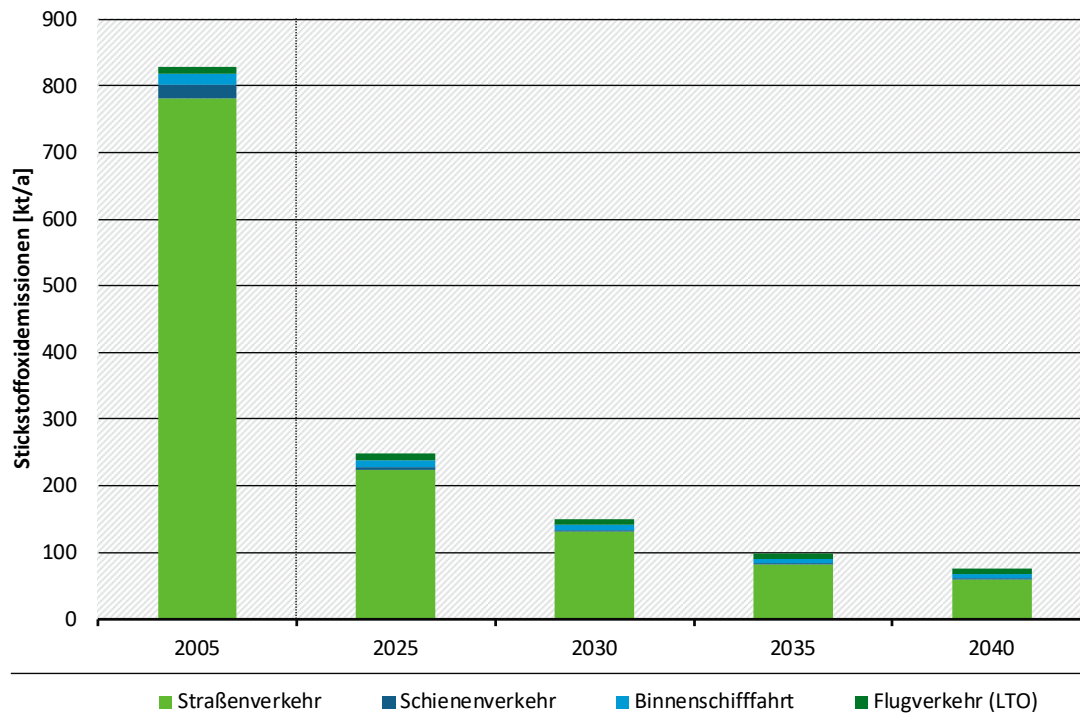
Die gesamten Emissionen des Verkehrs, die sich für das WM-Szenario ergeben, sind in Abbildung 6 bis Abbildung 10 dargestellt. Um die Emissionen in TREMOD berechnen zu können, sind neben den Emissionsfaktoren auch Verkehrsmengen definiert. Diese verkehrlichen Größen werden u. a. auch für die Quantifizierung von Maßnahmen benötigt (z. B. um Effekte von Verlagerungen zu berechnen) und sind daher essentiell für das weitere Vorgehen. Die Verkehrsleistungen werden in der folgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 7: Verkehrsleistungen im WM-Szenario

	2025	2030	2035	2040
Personenverkehr				
Straße	1.023 Mrd. Pkm	1.066 Mrd. Pkm	1.064 Mrd. Pkm	1.066 Mrd. Pkm
Bahn	118 Mrd. Pkm	120 Mrd. Pkm	122 Mrd. Pkm	123 Mrd. Pkm
Güterverkehr				
Straße	508 Mrd. tkm	530 Mrd. tkm	556 Mrd. tkm	586 Mrd. tkm
Bahn	151 Mrd. tkm	186 Mrd. tkm	190 Mrd. tkm	194 Mrd. tkm
Binnenschiff	55 Mrd. tkm	65 Mrd. tkm	65 Mrd. tkm	66 Mrd. tkm

Abbildung 6: NO_x-Emissionen im WM-Szenario

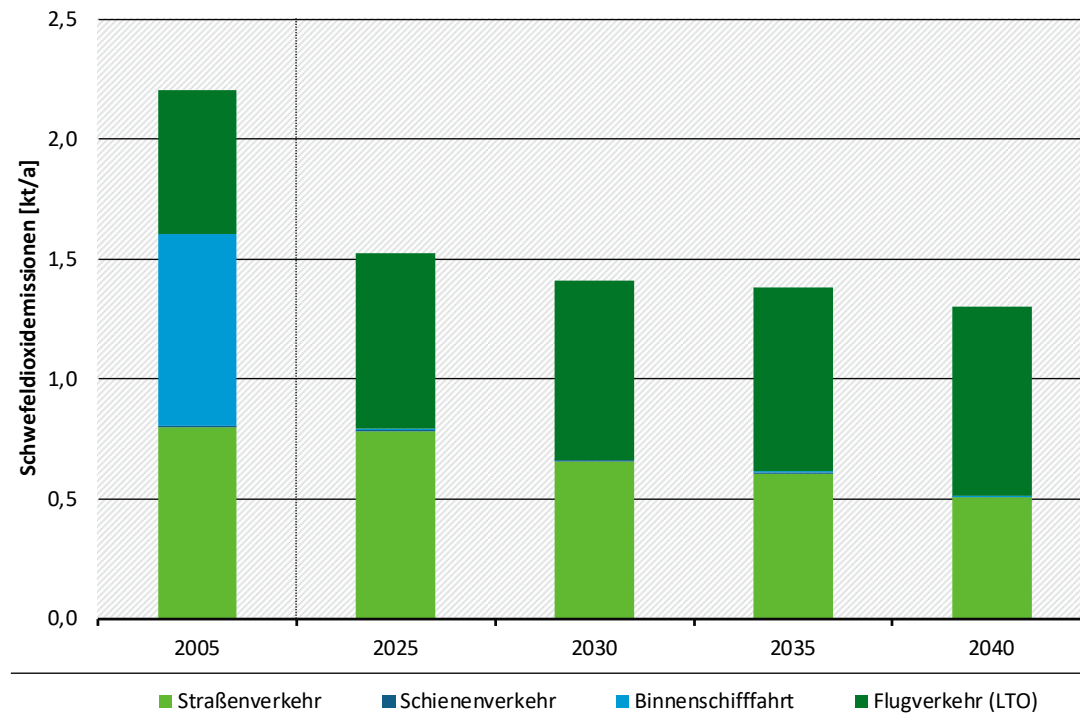
Stickstoffoxidemissionen des Verkehrs



Quelle: Eigene Darstellung. Daten: TREMOD.

Abbildung 7: SO₂-Emissionen im WM-Szenario

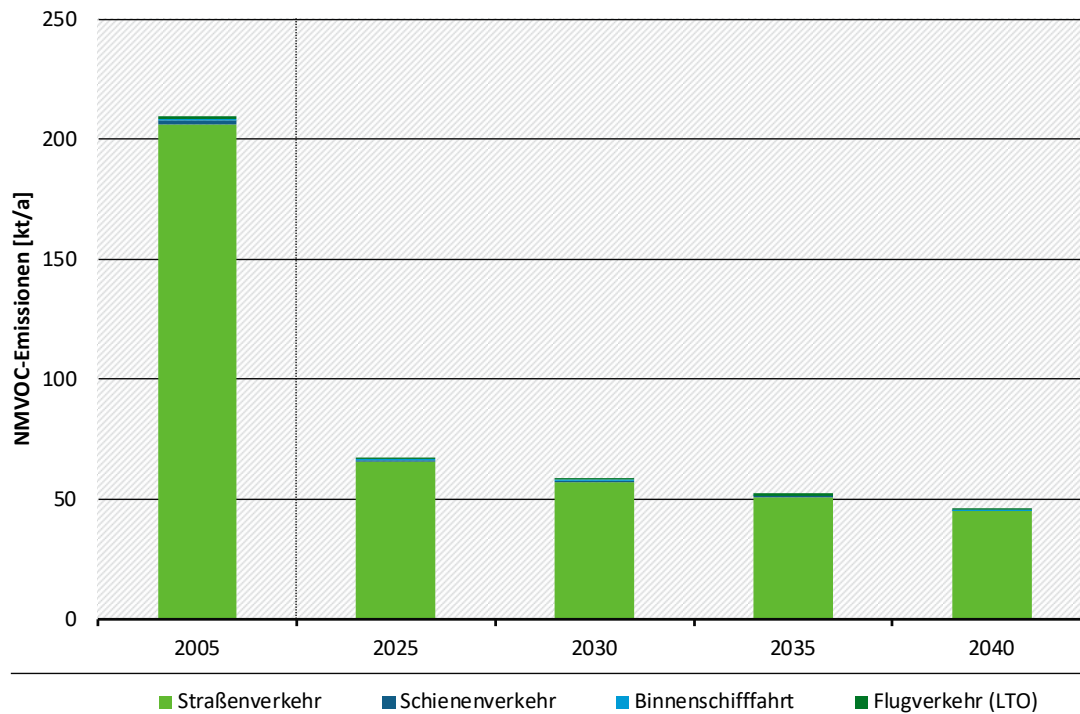
Schwefeldioxidemissionen des Verkehrs



Quelle: Eigene Darstellung. Daten: TREMOD.

Abbildung 8: NMVOC-Emissionen im WM-Szenario

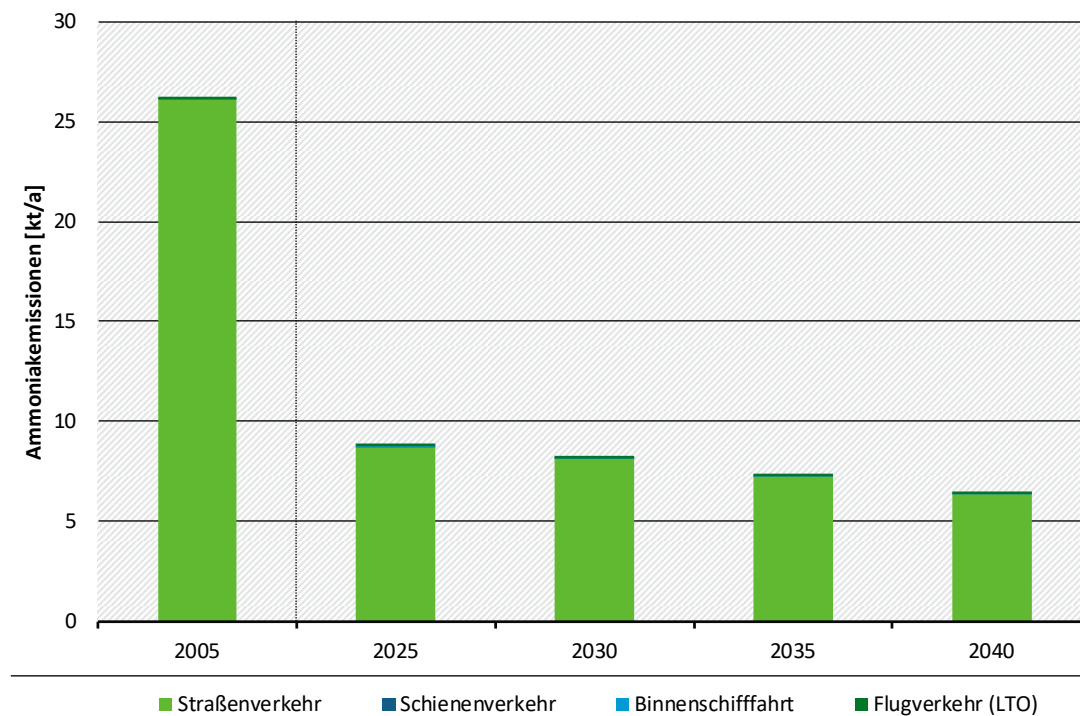
Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan des Verkehrs



Quelle: Eigene Darstellung. Daten: TREMOD.

Abbildung 9: NH₃-Emissionen im WM-Szenario

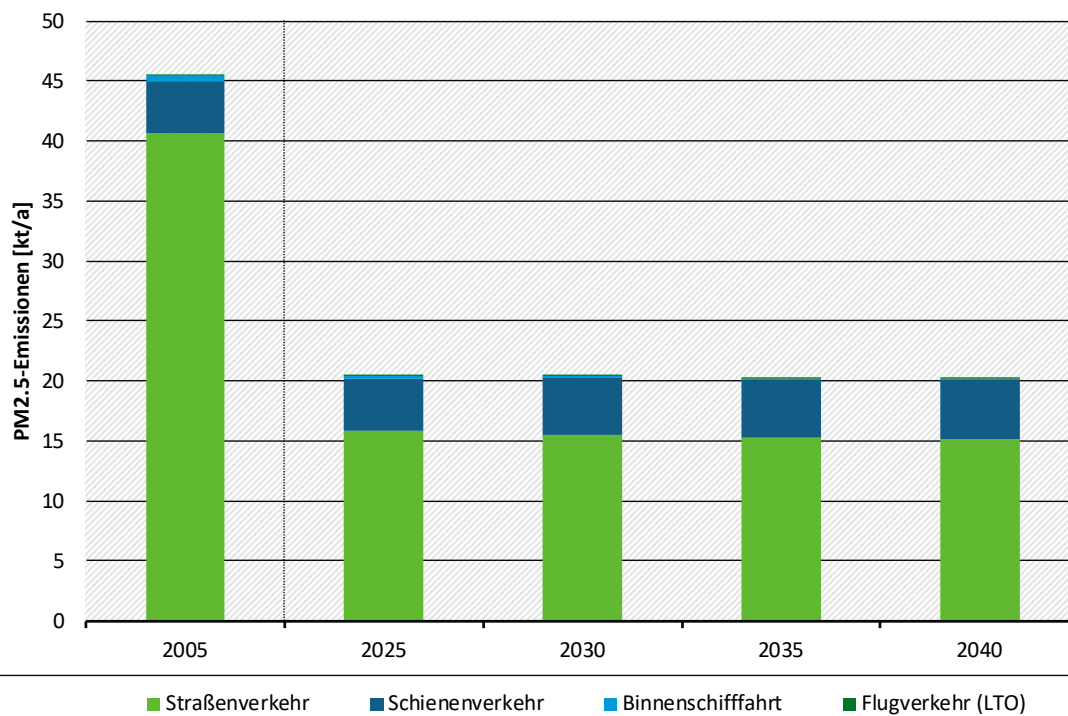
Ammoniakemissionen des Verkehrs



Quelle: Eigene Darstellung. Daten: TREMOD.

Abbildung 10: PM_{2.5}-Emissionen im WM-Szenario

Partikelemissionen des Verkehrs (<2,5 µm)



Quelle: Eigene Darstellung. Daten: TREMOD. Anmerkung: Inklusive Abriebemissionen.

3 Auswahl weiterer Maßnahmen für das nationale Luftreinhalteprogramm

3.1 Sichtung und Auswahl möglicher Maßnahmen

Neben dem WM-Szenario, das bereits beschlossene Maßnahmen enthält, wird ein WAM-Szenario definiert, das zusätzliche Maßnahmen enthält und somit höhere Schadstoffminderungen impliziert. Das konkrete Vorgehen für die Erstellung des WAM-Szenarios ist in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 11: Herangehensweise zur Auswahl geeigneter Minderungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung.

Im ersten Schritt ist zunächst zu identifizieren, welche Maßnahmen im Verkehrsbereich umgesetzt werden können, um Schadstoffemissionen zu reduzieren. Dies erfolgte auf Basis einer Literaturrecherche. Dabei waren im Rahmen der Leistungsbeschreibung die folgenden Quellen zur Sichtung geplant:

- ▶ Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung (Oehlmann et al., 2020)
- ▶ Projektionsbericht 2021 (Repenning, 2021)
- ▶ Mobilitätskonzepte für einen nachhaltigen Stadtverkehr 2050 (PwC, 2021)
- ▶ Interne Analysen des Umweltbundesamtes, z. B. zu Euro 7 im Rahmen der Revision der EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG (EU, 2008)

Im zweiten Schritt wurden Maßnahmen aussortiert, die bereits beschlossen wurden und somit über das WM-Szenario abgedeckt sind. Jedoch gibt es bei manchen der bereits berücksichtigten Maßnahmen (Gesetze, Verordnungen, etc.) Pläne, diese anzupassen. Hier sind beispielsweise die CO₂-Standards für Pkw zu nennen, die gegenüber den Annahmen verschärft werden könnten oder auch die Luftverkehrssteuer, die noch weiter angehoben werden könnte. Fortschreibungen oder Verschärfungen bereits im WM-Szenario berücksichtigter Maßnahmen werden daher nicht aussortiert.

Einige Maßnahmen sind stark voneinander abhängig und schaffen Synergien oder sind bezüglich der Auswirkungen nicht voneinander trennbar. Die Förderung der Elektromobilität stellt ein Beispiel hierfür dar. Mögliche Maßnahmen sind mannigfaltig und umfassen unter anderem die Verschärfung von CO₂-Standards für Pkw, Kaufprämien für Elektrofahrzeuge und die Förderung zum Aufbau der Ladeinfrastruktur. Es ist allerdings schwer zu beziffern, welchen Einfluss die Förderung der Ladeinfrastruktur hätte, sofern nicht zeitgleich eine Förderung bei der Beschaffung der Fahrzeuge erfolgen würde. Auch könnte die Kaufprämie lediglich einen Mitnahmeeffekt bewirken, sofern die Verschärfung der CO₂-Standards einem „Verbrennerverbot“ gleichkommen würde. Daher werden schwer trennbare und stark verknüpfte Maßnahmen zu Maßnahmen-Clustern gebündelt. Überwiegend unabhängige Maßnahmen bleiben als Einzelmaßnahmen in der Betrachtung.

Durch das Aussortieren bereits berücksichtigter Maßnahmen im WM-Szenario und die Bündelung einiger Einzelmaßnahmen erhält man eine Longlist von Maßnahmen(-bündeln), die für die weitere Betrachtung berücksichtigt wurde. Folgende 15 Maßnahmen(-bündel) wurden in die Longlist aufgenommen:

- ▶ Einführung Euro 7
- ▶ Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen und Außerortsstraßen
- ▶ Förderung Elektromobilität
- ▶ Anpassung Lkw-Maut
- ▶ Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen
- ▶ Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds (in zwei Ausprägungen)
- ▶ City-Logistik
- ▶ Flugverkehr

- Erhöhung der Luftverkehrsteuer
- Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt
- Schienenverkehr
 - Elektrifizierung Schienenverkehr
 - Stärkung Schienenpersonenfernverkehr: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung
- Ökonomische Instrumente
 - Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel
 - Abschaffung der Entfernungspauschale
 - Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen
 - Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut (in zwei Ausprägungen)

Für sämtliche Maßnahmen der Longlist wurden die Emissionsminderungspotenziale errechnet. Ausgangspunkt für die Berechnung der Potenziale war das WM-Szenario. Es wurden die Kennzahlen des Szenarios, das heißt die Emissionen und Verkehrsmengen, herangezogen und auf diese Größen die jeweiligen Wirkungen der Maßnahmen angewendet. So ist zum Beispiel die Fahrleistung von Lkw im WM-Szenario im Jahr 2030 mit ca. 63 Mrd. km gegeben und durch die Maßnahme „Anpassung Lkw-Maut“ sinkt diese Fahrleistung aufgrund der steigenden Transportkosten. Dies bewirkt eine Minderung der absoluten Emissionen auf der Straße.

Die Quantifizierung spiegelt den Nutzen einer Maßnahme wider und war ein wichtiger Baustein für den Entscheidungsprozess, welche Maßnahmen in das WAM-Szenario aufgenommen werden sollten. Neben dem Nutzen waren weitere Faktoren wie Umsetzungshemmnisse und Kosten zu berücksichtigen. Auf diese weiteren Faktoren wird in diesem Bericht nur am Rande eingegangen. Die Auswahl der Maßnahmen erfolgte in einem Abstimmungsprozess zwischen den Fachgebieten des UBA, dem BMUV und weiteren Ressorts.

Nach Festlegung der Maßnahmen für das WAM-Szenario wurde die Wirkungsberechnung der ausgewählten Maßnahmen im Verbund vorgenommen. Eine Addition der Wirkpotenziale der Einzelmaßnahmen ist nicht zulässig, da sich diese gegenseitig beeinflussen. So bewirkt beispielsweise die Einführung der Euro 7-Norm eine deutlich niedrigere Emissionsminderung, sofern auch von einem Anstieg von elektrisch betriebenen Fahrzeugen ausgegangen wird. Bei der zeitgleichen Betrachtung beider Maßnahmen ersetzen Elektro-Fahrzeuge anstatt eines Euro 6/VI-Fahrzeugs ein Euro 7-Fahrzeug, welches geringere Schadstoffemissionen aufweist. Daher sind auch hier die Einsparungen geringer. Folglich wurden im WAM-Szenario die Auswirkungen der ausgewählten Maßnahmen mitsamt ihrer Interdependenzen berechnet.

Zusätzlich zum WAM-Szenario wurde ein „Optionales Szenario“ berechnet. Dieses beinhaltet neben den für das WAM-Szenario ausgewählten Maßnahmen einen Großteil der anderen Maßnahmen aus der Longlist.

3.2 Datenbasis, Annahmen und Einzelpotenziale der Maßnahmen

Für die Maßnahmen aus der Longlist wurden die jeweiligen Minderungspotenziale ermittelt, um im nächsten Schritt eine Grundlage für die Auswahl für das WAM-Szenario schaffen zu können.

Im Folgenden werden die Annahmen erläutert, die für die Quantifizierung der Maßnahmen getroffen wurden. Zudem werden die sich hieraus ergebenden Minderungspotenziale der Maßnahmen für das Jahr 2030 angegeben. Diese waren ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl der Maßnahmen, die in das WAM-Szenario eingingen. Die Beschreibung der Maßnahmen erfolgt in der Struktur eines Steckbriefes. Sofern detailliertere Informationen zu den konkreten Berechnungen für das Verständnis nötig sein sollten, werden diese unterhalb des jeweiligen Steckbriefes gegeben.

3.2.1 Einführung Euro 7

Die Emissionsgrenzwerte für neue Straßenfahrzeuge wurden in den letzten Jahrzehnten sukzessive verschärft und somit die Emissionen des Straßenverkehrs stark reduziert. Die aktuell beschlossenen Normen reichen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis Euro 6-d und für Busse und schwere Nutzfahrzeuge bis Euro VI-E. Die europäische Kommission arbeitet jedoch derzeit intensiv an der Entwicklung der nächsten Abgasnorm Euro 7.

Bezug der Ergebnisse zum Entwurf der EU-Kommission für eine Euro 7-Abgasnorm vom 10. November 2022

Die Veröffentlichung des eigentlichen Euro-7 Entwurfs der EU-Kommission verzögerte sich mehrfach. Das Dokument erschien zwar am 10. November 2022, konnte jedoch aus Zeitgründen nicht mehr in die vorliegende Studie und die Ergebnisse einfließen. Die vorliegenden Ergebnisse stützen sich daher auf frühere Veröffentlichungen und eigene Annahmen.

Das von der EU-Kommission beauftragte Forschungskonsortium CLOVE stellte im Jahr 2021 verschiedene Szenarien³ innerhalb der europäischen AGVES (Advisory Group on Vehicle Emission Standards)-Gruppe vor. Im Rahmen des laufenden UBA-Forschungsvorhabens „Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen“ (FKZ 3719 51 102 0) wurden die Szenarien analysiert und eine mögliche Ausgestaltung der Euro 7 Norm in Anlehnung an Szenario 1 für Pkw und Szenario HD 2 für SNF angenommen, siehe (Samaras et al., 2021b) und (Hausberger et al., 2021). Wichtige Änderungen hierbei sind zum einen die Reduktion der Grenzwerte in den heute geltenden Prüfzyklen, sowie die Erweiterung der zulässigen Randbedingungen für RDE (real driving emissions)-Tests. Diese decken nahezu alle Fahrsituationen inklusive längerer Leerlaufphasen ab. Die Ermöglichung von unabhängigen Dritt-Parteimessungen verringert die Häufigkeit von Defekten oder Manipulationen.

Die Emissionsfaktoren für Euro 7 orientieren sich an Messdaten für moderne Euro 6/VI-Fahrzeuge bzw. Pilot- und Demonstrationsfahrzeuge und entsprechenden Technologieannahmen. Die Fahrzeuge verfügen über die für Euro 6/VI gängigen Technologien Abgasrückführung (AGR), Diesel-Oxidations-Katalysator (DOC), Diesel- und Otto-Partikelfilter (DPF/OPF), selektive katalytische Reduktion (SCR) und Ammoniak-Schlupfkatalysator (ASC). Dazu kommen zusätzlich eine motornahe SCR und eine Unterboden-SCR, optimierte Heizmaßnahmen zum Erreichen der nötigen Abgastemperatur, verbesserte Katalysatoren/Materialien zur Verringerung der Alterung, Optimierungen der Verbrennung für SNF und eine optimierte Temperaturkontrolle für die Partikelfilter-Regeneration zum Einsatz.

Dadurch sinken die Schadstoffemissionen neuer Verbrenner-Fahrzeuge in den meisten Fällen deutlich gegenüber der heute gültigen Norm Euro 6-d bzw. Euro VI E (siehe Tabelle 8). Die

³ Weitere Informationen zu den Szenarien sind für Pkw und LNF über (Samaras et al., 2021b) und für SNF und Busse über (Hausberger et al., 2021) gegeben.

Emissionsfaktoren für Euro 7 stammen aus Analysen eines parallel laufenden UBA-Projekts (Hausberger et al., 2022). Hierbei wurden auch Einflussfaktoren berücksichtigt, welche bisher nicht in TREMOD abgebildet werden, z. B. Defekte, Manipulationen der Abgasnachbehandlung und Kaltstartzuschläge bei schweren Nutzfahrzeugen. Die Werte sind damit nicht direkt vergleichbar und es kann bei einzelnen Schadstoffen für Euro 7 auch zu höheren Werten als bei Euro 6/VI nach TREMOD kommen. Dies wurde von den Autoren jedoch in Kauf genommen, um möglichst realistische Emissionsfaktoren für Euro 7 zu verwenden.

Tabelle 8: Angenommene Emissionsfaktoren Euro 7 und Änderung zu Euro 6-d/VI C-E im Jahr 2030

Fahrzeugkategorie* und Schadstoff	EF Euro 6-d/VI-E (mg/km) TREMOD	EF Euro 7 (mg/km) Annahme	Differenz
Pkw - Otto			
NH ₃	16,3	9,5	-42%
PM _{2,5} bzw. PM ₁₀	1,1	1,0	-14%
NMHC	110,6	40,5	-63%
NO _x	53,3	31,5	-41%
Pkw - Diesel			
NH ₃	7,5	8,0	7%**
PM _{2,5} bzw. PM ₁₀	0,8	0,8	6%**
NMHC	4,3	1,7	-60%
NO _x	151,2	31,1	-79%
SNF - Diesel			
NH ₃	13,1	4,4	-67%
PM _{2,5} bzw. PM ₁₀	3,6	4,1	12%**
NMHC	27,9	4,7	-83%
NO _x	431,5	16,2	-96%

Anmerkung: *Für Fahrzeugkategorien mit vernachlässigbaren Anteilen wie CNG- oder LPG-Fahrzeuge werden dieselben relativen Minderungen wie bei Otto-Pkw angenommen. Für Busse wurden dieselben Änderungsraten wie für SNF verwendet. **In einigen Fällen sind die Emissionsfaktoren für Euro 7 höher als für Euro 6/VI, da erstere im Gegensatz zu Euro 6/VI nicht aus TREMOD bzw. dem HBEFA vorlagen, sondern mit einer eigenen Methode bestimmt wurden.

Tabelle 9: Annahmen und Berechnung – Einführung Euro 7

Einführung Euro 7

Kurzbeschreibung:

Die zukünftige Abgasnorm Euro 7 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie schwere Nutzfahrzeuge und Busse soll die Grenzwerte für die Schadstoffemissionen von Neufahrzeugen weiter verschärfen. Dadurch

Einführung Euro 7

sinken die Schadstoffemissionen neuer Verbrenner-Fahrzeuge deutlich gegenüber der heute gültigen Norm Euro 6-d bzw. Euro VI E.

Annahmen und Berechnung:

Die Grenzwerte und Prüfbedingungen für Euro 7 orientieren sich an den vom CLOVE-Konsortium vorgelegten Szenarien: Pkw: Szenario 1, SNF: Szenario HD 2 und Analysen im Rahmen eines parallel laufenden UBA-Projekts (FKZ 3719 51 102 0), siehe (Samaras et al., 2021b) und (Hausberger et al., 2021). Im durchschnittlichen Fahrbetrieb sinken die NO_x-Emissionen bei Diesel-Pkw um mehr als 60 % und bei schweren Nutzfahrzeugen um mehr als 90 %.

Als Einführungszeitraum für alle Neufahrzeuge wird der 1.1.2027 angenommen. Ab diesem Jahr ersetzen neue Euro 7 Fahrzeuge neue Euro 6/VI Fahrzeuge.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	13,72 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,23 kt
NMVOC:	2,46 kt
NH ₃ :	0,62 kt
SO ₂ :	-*

Ansatz:

Die berechneten Wirkungen werden erreicht, indem die Euro 7 Gesetzgebung in der beschriebenen Form beschlossen und in nationales Recht umgesetzt wird. Die von den Autor*innen zugrunde gelegten Szenarien der EU bzw. des CLOVE-Konsortiums (siehe oben) sind als ambitioniert, aber realistisch einzustufen. Bei abweichenden Grenzwerten oder Prüfbedingungen können sich jedoch andere Wirkungen ergeben.

Stand der Umsetzung:

Die Euro 7 Gesetzgebung wird seit mehreren Jahren auf europäischer Ebene geplant und befindet sich kurz vor der Umsetzung. Lediglich die genaue Ausgestaltung wird noch untersucht.

Umsetzungshorizont: Anhand der typischen Zeiträume zwischen Beschluss und Inkrafttreten früherer Abgasgesetzgebungen gehen die Autor*innen von einem Beschluss im Jahr 2023 und einem Inkrafttreten im Jahr 2027 aus.

Synergien/Wechselwirkungen:

- o Die Verschärfung der Grenzwerte für Verbrennerfahrzeuge und damit steigende Kosten machen Elektrofahrzeuge wettbewerbsfähiger gegenüber Verbrennern.
- Die nötigen Maßnahmen für Verbrenner können zu einer Erhöhung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (z. B. durch aktives Heizen der Katalysatoren) und zum Verbrauch und zur Emission zusätzlicher Materialien (z. B. Edelmetalle) führen.
- o Die absolute Emissionsminderung durch Euro 7 sinkt, je höher der Anteil an Null-Emissionsfahrzeugen (z. B. Elektrofahrzeuge) ist. Bei Plug-In-Hybriden im Verbrennermodus führt Euro 7 jedoch zu Minderungen.
- o Im Rahmen von Euro 7 werden zusätzliche Aspekte, z. B. die Verminderung von nicht-auspuffbedingten Partikelemissionen aus Abrieben oder Standards für die Batterielebensdauer für Elektrofahrzeuge untersucht, deren Wirkungen hier nicht berücksichtigt werden.

Quellen:

(Samaras et al., 2021b), (Ricardo, 2020), (Samaras et al., 2021a), Interne Analysen im Rahmen des UBA-Projekts „Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen“ (FKZ 3719 51 102 0); Bisher unveröffentlicht.

Anmerkung: *Es ist davon auszugehen, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch wegen zusätzlicher Heizmaßnahmen um wenige Prozentpunkte steigen könnte und damit auch die SO₂-Emissionen. Dies wurde aber bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

3.2.2 Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen und Außerortsstraßen

Bisher gelten in Deutschland nur für einen Teil der Autobahnstrecken Geschwindigkeitsbeschränkungen. Auf Außerortsstraßen gilt in Deutschland eine Höchstgeschwindigkeit von bis zu 100 km/h. Laut Analysen des Umweltbundesamts würde eine Einführung eines allgemeinen Tempolimits auf Autobahnen und eine Absenkung der Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auf 80 km/h auf Außerortsstraßen einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten, die Verkehrssicherheit erhöhen und die Lärm- und Schadstoffemissionen reduzieren. Gleichzeitig wäre die Maßnahme kostengünstig und kurzfristig realisierbar (UBA, 2022a).

Die Wirkungsabschätzung für die vorliegende Studie erfolgt auf Grundlage von Zählraten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Daten des HBEFA 4.2 und eigenen Annahmen. Die grundlegende Vorgehensweise entspricht den zuvor genannten Analysen des Umweltbundesamts, welche noch auf Daten des HBEFA 4.1 aufsetzen. Es liegen folgende Annahmen zugrunde:

- ▶ Die allgemeinen Tempolimits werden bis zum Jahr 2025 flächendeckend umgesetzt.
- ▶ Die Verteilung der Fahrleistungen von Pkw und LNF nach den im HBEFA hinterlegten Verkehrssituationen⁴ werden wie folgt angepasst:
 - Autobahnabschnitte ohne Tempolimit (>130 km/h) werden Verkehrssituationen für Autobahnabschnitte mit einer Begrenzung auf max. 130 km/h zugeordnet.
 - Außerortsstraßenabschnitte mit Tempolimit 90 km/h oder höher werden Verkehrssituationen für Außerortsstraßen mit einer Begrenzung auf max. 80 km/h zugeordnet.
 - An den sonstigen Eigenschaften der Verkehrssituationen, d.h. Anteil nach Straßentypen, Verkehrsfluss (Level of Service), Längsneigung ändert sich nichts.
- ▶ Die Emissionsfaktoren nach Fahrzeugschicht und Verkehrssituation werden aus dem HBEFA 4.2. übernommen.
- ▶ Die Aktivitätsraten und Emissionen insgesamt werden anschließend mit der neuen Zusammensetzung der Verkehrssituationen bzw. Geschwindigkeitsbegrenzungen neu berechnet.
- ▶ Die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit führt im Ergebnis zur Reduktion des Energieverbrauches und der Emissionen bei Pkw und LNF. Die direkten Einflüsse der Geschwindigkeitsänderung auf Abriebemissionen sowie motorisierte Zweiräder⁵ werden vernachlässigt. Ebenfalls werden mögliche indirekte Wirkungen auf den Verkehrsfluss, z.B. Anteile fließender oder gesättigter Verkehr, hier nicht betrachtet.

⁴ Dabei wird berücksichtigt, dass sich nicht alle an das vorgegebene Tempolimit halten. Beispielsweise beinhalten die hinterlegten Fahrzyklen des HBEFA 4.2 für Autobahnabschnitte mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von max. 130 km/h auch Geschwindigkeiten bis ca. 140 km/h.

⁵ Motorräder weisen bspw. einen Anteil an den NO_x-Emissionen auf der Straße von <0,5 % auf.

Tabelle 10: Annahmen und Berechnung – Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen und Außerortsstraßen

Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen und Außerortsstraßen

Kurzbeschreibung:

Die Maßnahme beinhaltet die Einführung eines allgemeinen Tempolimits von max. 130 km/h auf Autobahnen und max. 80 km/h auf Außerortsstraßen ab dem Jahr 2025. Betroffen hiervon sind in erster Linie Pkw und leichte Nutzfahrzeuge.

Annahmen und Berechnung:

Die allgemeinen Tempolimits werden ab dem Jahr 2025 flächendeckend umgesetzt. Die Wirkungsabschätzung erfolgt auf Grundlage der Daten des Handbuchs Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (Version HBEFA 4.2) und eigenen Annahmen. Die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit wird hierbei über die Änderung der Fahrleistungsanteile pro Verkehrssituationen gemäß dem HBEFA umgesetzt. Dies führt zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Emissionen von Pkw und LNF.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	7,78 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,46 kt
NM VOC:	0,18 kt
NH ₃ :	0,03 kt
SO ₂ :	0,02 kt

Ansatz:

Die Ausweitung bzw. Anpassung der Tempolimits muss beschlossen und deutschlandweit auf allen Außerortsstraßen und Autobahnen umgesetzt werden. Das durchschnittliche Fahrverhalten und damit die Einhaltung der Tempolimits muss mindestens in dem Rahmen erfolgen wie heute auf Autobahnabschnitten mit einer Begrenzung auf max. 130 km/h bzw. Außerortsstraßen mit max. 80 km/h. Die nötigen Mittel zur Information der Autofahrer*innen (z. B. Beschilderung) sowie zur Überwachung ist bis dahin von den zuständigen Behörden bereitzustellen.

Stand der Umsetzung:

Allgemeine Geschwindigkeitsbeschränkungen, wie in der Maßnahme angenommen, existieren bereits in fast allen EU-Ländern, lokale oder temporäre Geschwindigkeitsbeschränkungen auch in Deutschland. Die Einführung einer allgemeinen Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen in Deutschland wurde in der Vergangenheit immer wieder politisch diskutiert, wenn auch nicht beschlossen. Größter Flaschenhals ist daher die politische Umsetzung.

Umsetzungshorizont: Die konkrete Ausgestaltung und Umsetzung ist weitgehend erprobt und könnte vergleichsweise kurzfristig und mit geringem Aufwand erfolgen. Daher wird eine vollständige Umsetzung ab dem Jahr 2025 angenommen.

Synergien/Wechselwirkungen:

- + Die Reduktion der Fahrgeschwindigkeiten im Bereich von >80 km/h hat weitere positive Umweltwirkungen, insbesondere eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen, eine Reduktion der Partikelemissionen durch Abrieb und Aufwirbelung, die Verringerung von Verkehrsunfällen und -toten und eine Verringerung der Lärmemissionen.
- + Die Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen könnte dazu führen, dass weniger Pkw mit hoher Motorleistung neu zugelassen werden.

Quellen:

(Notter et al., 2022), (UBA, 2021), (UBA, 2022b), sowie eigene Berechnungen

3.2.3 Förderung Elektromobilität

Die direkte als auch indirekte Förderung der Elektromobilität erfolgt bereits durch eine Vielzahl an Einzelmaßnahmen. In den untersuchten Quellen (siehe Abschnitt 3.1) werden u. a. die folgende Einzelmaßnahmen genannt:

- ▶ EU-CO₂-Standards für Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge
- ▶ Novelle der Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung
- ▶ Steigerung des Anteils umweltschonend betriebener Kraftfahrzeuge im Fuhrpark des Bundes
- ▶ Förderung des Aufbaus öffentlicher und privater Versorgungsinfrastruktur für elektrifizierte Nutzfahrzeuge
- ▶ Unterstützung bei der Transformation der Automobilindustrie
- ▶ Beschleunigung von Planung und Umsetzung neuer Infrastrukturen (Maßnahmengesetzvorbereitungsgesetz und Planungsbeschleunigungsgesetz III)
- ▶ Kaufprämie für elektrische Fahrzeuge und Infrastrukturförderung
- ▶ Vergünstigte Besteuerung von elektrischen Dienstwagen und andere steuerliche Vorteile
- ▶ Kraftfahrzeugsteuer: stärkere Gewichtung der CO₂-Komponente für Pkw und verlängerte Gewährung der Befreiung für erstzugelassene reine Elektrofahrzeuge
- ▶ Umsetzung der Clean Vehicles Directive
- ▶ Sonderabschreibung für elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge bis 2030
- ▶ Förderung von umweltfreundlichen Bussen

Eine Wirkungsabschätzung solcher Einzelmaßnahmen ist nur eingeschränkt möglich, da große Synergien bestehen, die nicht adäquat quantifizierbar sind. Zum Beispiel wird eine Förderung der Ladeinfrastruktur nur einen geringen Effekt haben, sofern die Fahrzeugpreise von elektrischen Fahrzeugen zu hoch sein sollten. Zudem können Mitnahmeeffekte entstehen. Beispielsweise stellen (Harthan et al., 2020) in Bezug auf die Kaufprämie für elektrische Pkw fest, dass, „der von den Automobilherstellern zu tragende Anteil [...] offensichtlich oft mit den bereits bestehenden Rabatten verrechnet wurde“ und „es aufgrund der Wechselwirkungen mit den CO₂ Standards hohe Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung des Instruments gibt“ da letztere sowieso nur mit einem hohen Anteil an elektrischen Fahrzeugen erreicht werden können. Da auch diese Effekte kaum trennbar sind, werden sämtliche Maßnahmen zusammengefasst und über ein Maßnahmenbündel abgebildet.

Bei einigen Maßnahmen, zum Beispiel die „Clean Vehicles Directive“ (EU, 2019), hat seit der Erstellung des WM-Szenarios bereits die Umsetzung begonnen. Andere Maßnahmen sind zwar im WM-Szenario enthalten, jedoch wird bereits verhandelt wie diese fortgeführt oder verschärft werden können, z. B. die CO₂-Standards für neue Pkw bis 2035 und danach (Bundesregierung, 2022a). Auch eine Fortschreibung der Kaufprämie für Elektro-Pkw bis 2024 und danach wurde inzwischen beschlossen (BMW, 2022).

In der Modellierung wird die Wirkung der Förderung der Elektromobilität durch einen Anstieg von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen abgebildet, welche neue Verbrennerfahrzeuge

ersetzen. Durch die Reduktion der Fahrleistungen von Verbrennern ergibt sich eine Reduktion der Emissionen. Tabelle 11 fasst das Maßnahmenbündel „Förderung Elektromobilität“ zusammen. In Abbildung 12 bis Abbildung 14 sind die Neuzulassungsanteile pro Fahrzeugkategorie im WM-Szenario und bei der Umsetzung der Maßnahme angegeben. Im WM-Szenario wird das Ziel der alten Bundesregierung von 7-10 Mio. Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 mit ca. 8,4 Mio. Elektro-Pkw im Bestand eingehalten (Bundesregierung, 2022b). Bei der Umsetzung des Maßnahmenbündels würden im Jahr 2030 13,7 Mio. E-Fahrzeugen im Bestand sein. Somit werden die Pläne der aktuellen Bundesregierung nach dem Koalitionsvertrag in Höhe von 15 Mio. Elektro-Pkw im Jahr 2030 (SPD et al. 2021) fast erreicht. Die Bestände an Elektrofahrzeugen pro Fahrzeugkategorie und Referenzjahr sind in Tabelle 12 und die dazugehörigen Fahrleistungen in Tabelle 13 zusammengefasst.

Der folgende Steckbrief fasst die Annahmen und Ergebnisse für das Jahr 2030 zusammen.

Tabelle 11: Annahmen und Berechnung – Förderung Elektromobilität

Förderung Elektromobilität

Kurzbeschreibung:

Das Maßnahmenbündel „Förderung Elektromobilität“ enthält eine Vielzahl an Einzelmaßnahmen. Als besonders wichtig werden die CO₂-Standards, die Kaufprämien für elektrische Fahrzeuge und die Förderung der Ladeinfrastruktur erachtet. Die Förderung bewirkt eine Erhöhung der Neuzulassungen von elektrischen Fahrzeugen, die wiederum Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ersetzen. Durch das Ersetzen werden die Emissionen, die aus der motorischen Verbrennung resultieren, reduziert.

Annahmen und Berechnung:

Es wird angenommen, dass die Neuzulassungsanteile von elektrischen Fahrzeugen verglichen zum WM-Szenario steigen. Bei Pkw, LNF und motorisierten Zweirädern¹ werden in Anlehnung an die europäischen CO₂-Standards ab dem Jahr 2035 nur noch „Null-Emissionsfahrzeuge“ (insb. batterieelektrische Fahrzeuge, kurz: BEV) sowie Hybridfahrzeuge mit externer Lademöglichkeit (PHEV) zugelassen (Bundesregierung, 2022a). Zwar wird bei PHEV voraussichtlich die CO₂-Berechnung im Rahmen der Typgenehmigung verschärft, jedoch ist noch nicht beschlossen wie bzw. ob die Anrechnung von synthetischen klimaneutralen Kraftstoffen im Rahmen der Flottengrenzwerte erfolgt. Daher beträgt der Anteil von PHEV an den Neuzulassungen nach 2035 noch ca. 20 %. Bei Lkw und Bussen wird davon ausgegangen, dass die Marktdurchdringung zeitlich verzögert eintritt. Hier wird für das Jahr 2040 von einem Anteil von Null-Emissionsfahrzeugen (BEV) an den Neuzulassungen von ca. 98 % ausgegangen. Zugrunde liegen hierbei die Ankündigungen von Fahrzeugherstellern (Recherchen im Rahmen von (Jöhrens et al., 2022)). Bis einschließlich 2030 werden bei Umsetzung des Maßnahmenbündels insgesamt ca. 18 Mio. Elektrofahrzeuge zugelassen.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	9,04 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,54 kt ²
NM VOC:	6,05 kt
NH ₃ :	1,25 kt
SO ₂ :	0,11 kt

Ansatz:

Um die berechneten Minderungspotenziale zu erreichen, ist eine konsequente Umsetzung der Maßnahmen nötig. Dies bedeutet beispielsweise eine Verschärfung der CO₂-Standards für Pkw und LNF gegenüber den aktuell gültigen Grenzwerten sowie eine Verschärfung der CO₂-Standards für Lkw und/oder eine Verlängerung der Förderung von Null-Emissions-Lkw durch das Förderprogramm KsNI (siehe BAG, 2022).

Stand der Umsetzung:

Einige Maßnahmen befinden sich in oder stehen kurz vor der Umsetzung.

Förderung Elektromobilität

Umsetzungshorizont: Bei der Berechnung wird angenommen, dass bereits ab 2023 ein Anstieg der Neuzulassungszahlen verglichen mit dem WM-Szenario erfolgt.

Synergien/Wechselwirkungen:

- + Neben den Schadstoffemissionen sinken auch die Treibhausgas- und die Lärmemissionen.
- das durchschnittliche Fahrzeuggewicht steigt voraussichtlich; dies bewirkt einen höheren Rohstoffbedarf und eine stärkere Straßenabnutzung
 - o Geschwindigkeitsbegrenzungen auf BAB und Außerortsstraßen verringern den Energieverbrauch. Somit können Traktionsbatterien kleiner dimensioniert werden. Dies fördert wiederum den Anstieg an den Neuzulassungen, da die Fahrzeuge günstiger werden, und der Verbrauch reduziert sich aufgrund der Gewichtssenkung.
 - o Eine Anpassung der Maut (CO₂-Aufschlag) führt ebenfalls zu einem Anstieg der elektrischen Fahrleistung.
 - o Verlagerungen von der Straße hin zu anderen Verkehrsträgern reduzieren das errechnete Potenzial.

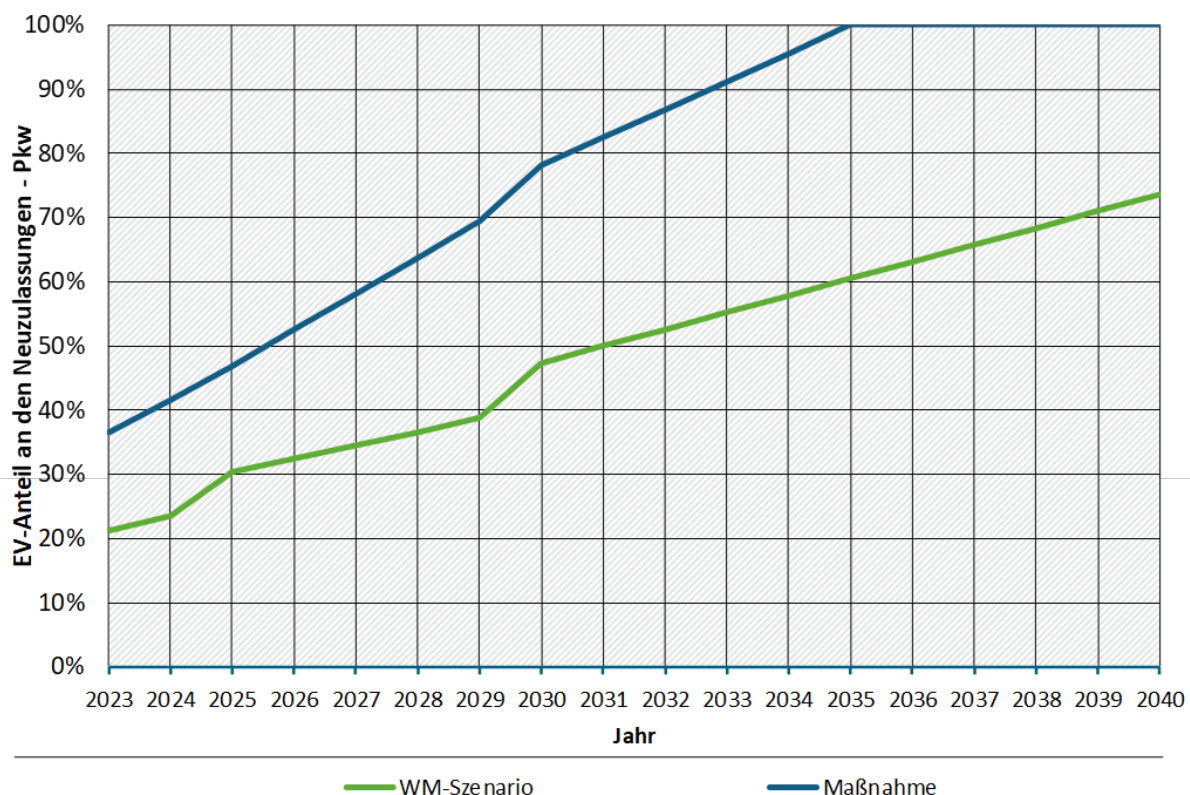
Quellen:

Eigene Annahmen. Diese orientieren sich bei Pkw und LNF an den Plänen zu CO₂-freien Neufahrzeugen ab 2035 (Bundesregierung, 2022a) und dem Koalitionsvertrag der aktuellen Regierung (SPD et al., 2021).

Anmerkung: ¹Motorisierte Zweiräder (MZR) werden von den Flottengrenzwerten zwar nicht erfasst, aber vereinfachend werden dieselben Elektro-Hochläufe wie bei Pkw angenommen. Da der Anteil von MZR an den Emissionen gering ist, hat diese Vereinfachung keine signifikanten Auswirkungen auf das Gesamtergebnis. ²Angenommen wird, dass die Abriebpartikel bei Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gleich sind.

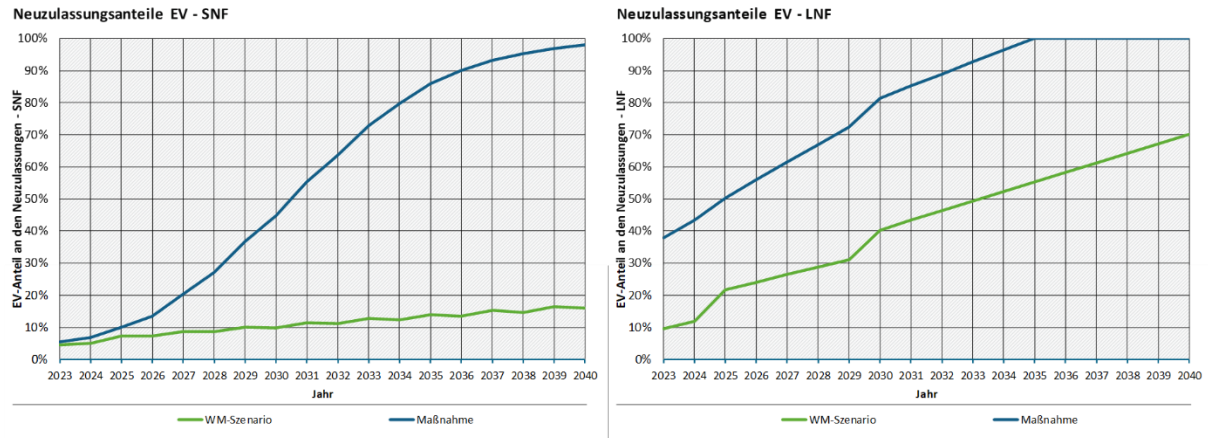
Abbildung 12: Neuzulassungsanteile von Pkw mit elektrischem Antrieb

Neuzulassungsanteile EV - Pkw



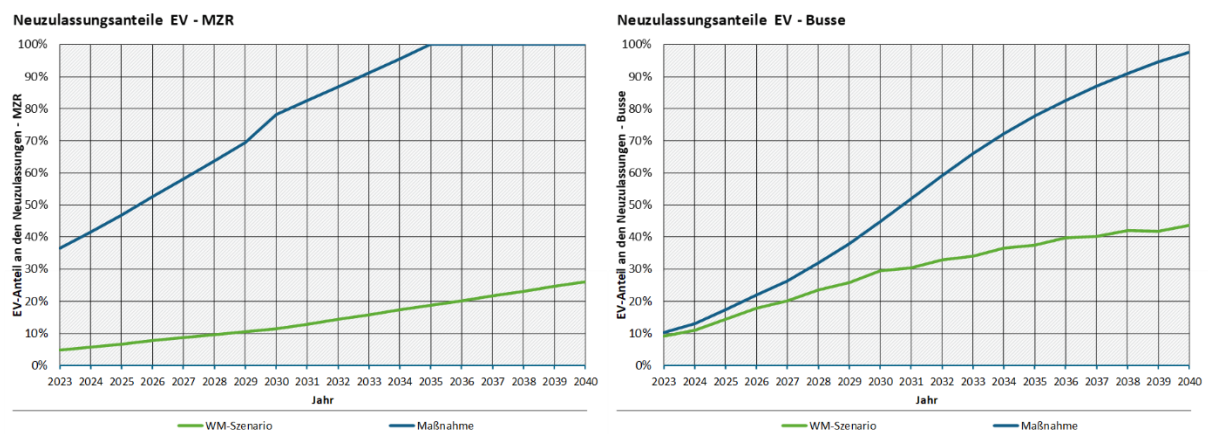
Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkungen: PHEV, FCEV und BEV zählen zu den Elektrofahrzeugen (EV). Da die Technologieanteile an den Neuzulassungen im Szenario im Jahr 2021 angenommen wurden, kann es sein, dass tatsächlich in den Jahren 2021 und 2022 geringfügig mehr Elektrofahrzeuge zugelassen wurden.

Abbildung 13: Neuzulassungsanteile von SNF und LNF mit elektrischem Antrieb



Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkung: FCEV und BEV zählen zu den Elektrofahrzeugen (EV).

Abbildung 14: Neuzulassungsanteile von mobilen Zweirädern (MZR) und Bussen mit elektrischem Antrieb



Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkung: FCEV und BEV zählen zu den Elektrofahrzeugen (EV).

Tabelle 12: Bestand von Elektrofahrzeugen

	2025	2030	2035	2040
WM-Szenario				
Pkw	3,63 Mio.	8,44 Mio.	15,07 Mio.	22,03 Mio.
SNF	0,01 Mio.	0,04 Mio.	0,07 Mio.	0,10 Mio.
LNF	0,10 Mio.	0,29 Mio.	0,67 Mio.	1,23 Mio.
MZR	0,08 Mio.	0,16 Mio.	0,30 Mio.	0,50 Mio.
Busse	<0,01 Mio.	0,01 Mio.	0,02 Mio.	0,03 Mio.
Maßnahme				
Pkw	5,31 Mio.	13,75 Mio.	25,29 Mio.	36,33 Mio.
SNF	0,02 Mio.	0,10 Mio.	0,30 Mio.	0,51 Mio.
LNF	0,34 Mio.	0,96 Mio.	1,86 Mio.	2,72 Mio.
MZR	0,35 Mio.	0,92 Mio.	1,72 Mio.	2,57 Mio.
Busse	<0,00 Mio.	0,01 Mio.	0,03 Mio.	0,05 Mio.

Anmerkungen: PHEV, FCEV und BEV zählen zu den Elektrofahrzeugen. Die Zahlen geben den Bestand und nicht die aggregierten Neuzulassungen an. Zum Beispiel beträgt der Bestand an Elektrofahrzeugen für Pkw im Jahr 2030 im WM-Szenario 8,4 Mio. und die aggregierten Neuzulassungen bis 2030 betragen 10,0 Mio.

Tabelle 13: Elektrische Fahrleistung

	2025	2030	2035	2040
WM-Szenario				
Pkw	38,1 Mrd. km	96,5 Mrd. km	170,8 Mrd. km	254,7 Mrd. km
SNF	0,7 Mrd. km	2,1 Mrd. km	3,7 Mrd. km	5,4 Mrd. km
LNF	1,3 Mrd. km	4,9 Mrd. km	11,5 Mrd. km	21,3 Mrd. km
MZR	0,1 Mrd. km	0,3 Mrd. km	0,5 Mrd. km	0,8 Mrd. km
Busse	0,1 Mrd. km	0,4 Mrd. km	0,8 Mrd. km	1,2 Mrd. km
Maßnahme				
Pkw	58,5 Mrd. km	208,0 Mrd. km	342,7 Mrd. km	446,8 Mrd. km
SNF	1,1 Mrd. km	6,8 Mrd. km	21,8 Mrd. km	38,4 Mrd. km
LNF	5,3 Mrd. km	21,9 Mrd. km	38,0 Mrd. km	52,1 Mrd. km
MZR	0,6 Mrd. km	1,8 Mrd. km	3,0 Mrd. km	4,1 Mrd. km
Busse	0,1 Mrd. km	0,5 Mrd. km	1,2 Mrd. km	2,2 Mrd. km

Anmerkungen: PHEV, FCEV und BEV zählen zu den Elektrofahrzeugen. Bei PHEV wird nur der elektrische Fahranteil eingerechnet.

3.2.4 Anpassung Lkw-Maut

Bei dieser Maßnahme wird untersucht, welche Wirkungen die Einführung eines CO₂-Aufschlags auf die Lkw-Maut und eine Ausweitung der Maut auf Lkw von 3,5-7,5 t haben könnten. In der Berechnung ist keine Doppelbesteuerung angenommen. Das heißt die aktuell erhobene CO₂-Steuer auf Diesel entfällt für Lkw, und sie wird über die Maut erhoben. In diesem Fall würden lediglich die internationalen Verkehre, die günstiger im Ausland tanken, durch den CO₂-Aufschlag verteuert werden. Der Anteil dieser Verkehre wird auf 12,8 % der Verkehrsleistung geschätzt und ergibt sich daraus, dass rund 40 % der Verkehrsleistung in Deutschland grenzüberschreitend sind (Allekotte et al., 2021b) und davon ca. 32 % überwiegend im Ausland tanken (eigenes Modell im Rahmen der Zuarbeit für Henning et al., 2021). Bei einem CO₂-Aufschlag von 100 €/t im Jahr 2030 verteuert sich dieser Anteil des Straßengüterverkehrs um ca. 3,3 % (eigenes Modell im Rahmen von Jöhrens et al., 2022).

Die Verteuierung bei Diesel-Lkw macht zudem den Wechsel zu Elektrofahrzeugen attraktiver. Anhand der vorliegenden Kostenparameter wird vereinfacht angenommen, dass ca. 2 % der verteuerten Lkw-Transporte (12,8 % der Verkehrsleistung) durch die Maßnahme von elektrisch betriebenen Lkw durchgeführt werden.

Bei einer Preiselastizität von -0,6 (Repenning, 2021) kommt es zu einer Reduktion der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs in Höhe von insgesamt 0,25 %. Ein Teil der Reduktion ist auf die Verlagerung auf Schiene und Binnengewässer zurückzuführen. Hierfür wird eine Kreuzpreiselastizität von 0,3 verwendet (Repenning, 2021). Von den verlagerten Mengen entfallen 15 % auf die Binnenschifffahrt und 85 % auf die Bahn (Berechnungen im Rahmen des Projekts Opitz et al., 2022). Hieraus ergeben sich Verlagerungen auf das Binnenschiff in Höhe von 0,02 % der Lkw-Verkehrsleistung und 0,11 % auf die Bahn. Die restlichen 0,12 % (=0,25%-0,02%-0,11%) der Lkw-Verkehrsleistung werden demnach durch die Maßnahme vermieden.

Neben der Vermeidung und Verlagerung auf andere Verkehrsträger kommt es durch die Ausweitung der Maut auf Lkw von 3,5-7,5 t zu Verlagerungen innerhalb des Straßenverkehrs. Es wird angenommen, dass sich die Verkehrsleistung bzw. Fahrleistung dieser Größenklasse um 20 % reduziert. Diese Fahrleistung wird zu 95 % auf Lkw >7,5 t und zu 5 % auf LNF verlagert (Berechnungen im Rahmen des Projekts Opitz et al., 2022).

Die angenommenen Werte sind für den gesamten betrachteten Zeitraum in Tabelle 14 angegeben.

Tabelle 14: Änderungen an den Transporten durch die Maßnahme „Anpassung Lkw-Maut“

	2025	2030	2035	2040
CO ₂ -Aufschlag	55 €/t	100 €/t	150 €/t	200 €/t
Verteuerung ¹	2,0%	3,3%	4,4%	5,5%
Verteuerung - Anteil an Verkehrsleistung (VL) ²	12,8%	12,8%	12,8%	12,8%
Verlagerung von Verbrennern auf Elektrofahrzeuge	0,16%	0,25%	0,34%	0,43%
Reduktion VL von Lkw ³	793 Mio. tkm	1.338 Mio. tkm	1.900 Mio. tkm	2.496 Mio. tkm
VL-Verlagerung Lkw auf Bahn ³	337 Mio. tkm	569 Mio. tkm	808 Mio. tkm	1.061 Mio. tkm
VL-Verlagerung Lkw auf Schiff ³	59 Mio. tkm	100 Mio. tkm	143 Mio. tkm	187 Mio. tkm
Reduktion Fahrleistung (FL) von Lkw 3,5-7,5t	1.312 Mio. km	1.231 Mio. km	1.204 Mio. km	1.200 Mio. km
Erhöhung FL von Lkw >7,5t	1.246 Mio. km	1.169 Mio. km	1.144 Mio. km	1.140 Mio. km
Erhöhung FL von LNF	66 Mio. km	62 Mio. km	60 Mio. km	60 Mio. km

Anmerkungen: ¹Gilt nur für 12,8 % der Verkehrsleistung (internationale Verkehre, die überwiegend im Ausland tanken). ²40 % internationale Verkehre, wobei 32 % überwiegend im Ausland tanken ($12,8\% = 40\% \cdot 32\%$), ³Die Änderungen der Verkehrsleistung bewirken eine proportionale Änderung der Fahrleistung (Auslastung bleibt konstant) und beinhalten sowohl die Vermeidung als auch die Verlagerung.

Im folgenden Steckbrief wird die Maßnahme zusammengefasst, und es werden die Minderungspotenziale für das Jahr 2030 angegeben.

Tabelle 15: Annahmen und Berechnung – Anpassung Lkw-Maut

Anpassung Lkw-Maut

Kurzbeschreibung:

Zwei Aspekte werden bei der Maßnahme betrachtet. Zum einen wird der CO₂-Aufschlag auf die Maut, die jedoch auch eine Abschaffung der CO₂-Steuer auf Diesel für Lkw impliziert, berücksichtigt. Zum anderen erfolgt die Ausweitung der Maut auf Lkw der Größenklasse 3,5-7,5 t. Angenommen wird ein CO₂-Preis von 100 €/t im Jahr 2030. Durch die Maßnahme steigen voraussichtlich die Transportkosten lediglich für internationale Verkehre, die bis dato vom Grauimport (Tanken im Ausland und Fahren in Deutschland) profitiert haben, und Transporte mit Lkw von 3,5-7,5 t werden teurer. Dies bewirkt zum einen Verlagerungen auf Schiff und Bahn bei einem kleinen Teil der internationalen Verkehre sowie eine geringfügige Erhöhung der Anteile von elektrischen Lkw. Zum anderen werden statt Lkw von 3,5-7,5 t vermehrt Lkw von 7,5-12 t sowie LNF eingesetzt.

Annahmen und Berechnung:

Durch die Verteuerung eines Teils der Lkw-Transporte kommt es zu einer Vermeidung von 0,12 % der Verkehrsleistung. Verlagert werden zusätzlich 0,02 % auf das Binnenschiff und 0,11 % auf die Bahn. Bei Lkw von 3,5-7,5 t reduziert sich die Verkehrsleistung um 20 %. Dieser Anteil verlagert sich zu 95 % auf Lkw >7,5 t und zu 5 % auf LNF. Zudem steigt der Anteil an der Verkehrsleistung von elektrisch betriebenen Lkw um insgesamt 0,25 %.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	0,07 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,01 kt*
NM _{VOC} :	<0,01 kt
NH ₃ :	<0,01 kt
SO ₂ :	<0,01 kt

Ansatz:

Durchführung einer Mautreform. Grundlage ist die Revision der Eurovignettenrichtlinie.

Stand der Umsetzung:

Beschlossen, Höhe des CO₂-Preises noch nicht festgelegt.
Umsetzungshorizont: 2024

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Reduziert die Treibhausgasemissionen
o Ergänzend zur Maßnahme „Förderung Elektromobilität“

Quellen: Fahranteile internationaler Verkehre aus (Allekotte et al., 2021b), Mengen Grauimporte aus eigenem Modell im Rahmen der Vorbereitung von (Henning et al., 2021), Kostenparameter aus (Jöhrens et al., 2022), Verlagerungsanteile aus (Opitz et al., 2022).

Anmerkung: *Inklusive Abrieb

3.2.5 Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen

Durch die Nutzung von Landstrom kann ein Teil der Emissionen der Binnenschiffe vermindert werden. Bisher ist die Nutzung von Landstrom in der Binnenschifffahrt noch vernachlässigbar. Liegende Binnenschiffe verwenden stattdessen dieselbetriebene Generatoren für die Bereitstellung des Bordstroms. Die Landstromnutzung soll durch den schrittweisen Ausbau von Landstromanlagen in den Binnenhäfen erhöht werden.

Dies setzt unter anderem die Bereitstellung von Bundesfinanzhilfen für die zuständigen Bundesländer sowie weiterer Fördermittel für die Modernisierung der Binnenschifffahrt voraus. Die Maßnahme wird bereits im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsbericht 2021 berücksichtigt. Demnach prüfe die Bundesregierung den verpflichtenden Einsatz von Landstrom derzeit (Repenning, 2021). Gleichzeitig unterstützen verschiedene Förderprogramme wie die

„Richtlinie über Zuwendungen zur Marktaktivierung alternativer Technologien für die umweltfreundliche Bordstrom- und mobile Landstromversorgung von See- und Binnenschiffen“ (BMVI, 2020) oder die geplante „technologieoffene Förderrichtlinie zur nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen“ die stärkere Nutzung von Landstrom (BMVI, 2021).

Nach Analysen in (Knörr et al., 2013) macht die Bereitstellung von Bordstrom mithilfe von dieselbetriebenen Generatoren/Hilfsaggregaten ca. 1 % des Treibstoffverbrauchs der Binnenschifffahrt aus. Die Autorinnen*Autoren gehen daher in Anlehnung an den Projektionsbericht der Bundesregierung von einem sukzessiven Ausbau der Landstromversorgung aus. Im Jahr 2040 wird ausschließlich Landstrom genutzt. Damit werden der jährliche Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen wie folgt reduziert: 2020 um 0,25 %, 2030 um 0,5 %, 2035 um 0,75 % und 2040 um 1 %.

Tabelle 16: Annahmen und Berechnung – Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen

Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen

Kurzbeschreibung:

Die Versorgung deutscher Binnenhäfen mit Landstromanlagen wird schrittweise mithilfe von Bundesmitteln ausgebaut. Liegende Binnenschiffe nutzen Landstromanschlüsse statt dieselbetriebener Generatoren für die Bereitstellung des Bordstroms. Damit werden die Emissionen durch die Schifffahrt in Binnenhäfen reduziert.

Annahmen und Berechnung:

Schätzungen zufolge macht die Bereitstellung von Bordstrom mithilfe von dieselbetriebenen Generatoren/Hilfsaggregaten ca. 1 % des Treibstoffverbrauchs der Binnenschifffahrt aus. In Anlehnung an den Projektionsbericht 2021 der Bundesregierung wird ein Ausbau der Landstromversorgung angenommen. Im Jahr 2030 werden der Dieselverbrauch und die Emissionen damit um 0,5 % reduziert.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	0,04 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	<0,01 kt
NM VOC:	<0,01 kt
NH ₃ :	<0,01 kt
SO ₂ :	<0,01 kt

Ansatz:

Für die Umsetzung der Maßnahme ist die Sicherstellung von Bundesfinanzhilfen für die Errichtung von Landstromanlagen an Liegeplätzen der Binnenschifffahrt und die Errichtung und der Betrieb durch die Bundesländer erforderlich.

Stand der Umsetzung:

Der Ausbau von Landstromanlagen ist Teil des im Mai 2019 beschlossenen Masterplans Binnenschifffahrt des Bundes-Verkehrsministeriums (BMVI, 2019). Weitere Förderungen für emissionsarme Schiffsantriebe sind im Konjunkturprogramm 2020 (Bundesregierung, 2020) und der Förderrichtlinie zur nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen (BMVI, 2021) enthalten. Die Finanzierung für eine vollständige Landstromversorgung ist bisher nicht beschlossen und muss schrittweise bis 2040 erfolgen. Umsetzungshorizont: schrittweise Umsetzung zwischen 2025 und 2040

Synergien/Wechselwirkungen:

- + die Landstromversorgung kann eine Elektrifizierung des Fahrbetriebs beschleunigen, sofern entsprechende Schiffsantriebe marktfähig sind.
- Es entstehen Mehremissionen in der Energiewirtschaft (sektorübergreifend) durch die zusätzliche Bereitstellung von Strom.

Quelle:

(Repenning, 2021) und eigene Annahmen.

3.2.6 Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds

Bei dieser Maßnahme geht es um die Stärkung und den Ausbau des Umweltverbunds: Durch Stärkung des Radverkehrs und des Fußverkehrs, Verbesserung der Qualität des öffentlichen Verkehrs (Busse, Bahnen) und der Sharing-Angebote für die „letzte Meile“ einerseits sowie durch Einschränkungen im Straßenraum für den motorisierten Individualverkehr, Tempolimits Tempo 30 und die Einführung einer flächendeckenden Parkraumbewirtschaftung andererseits wird Fahrleistung vom motorisierten Individualverkehr zum Umweltverbund verlagert.

Für die vorliegende Studie wurden zwei Maßnahmenbündel betrachtet: Die schwächere Ausprägung 1 enthält Maßnahmen zur Stärkung des Umweltverbunds ohne den Radverkehr sowie eine Erhöhung der Fahrzeit des motorisierten Individualverkehrs (MIV) im städtischen Netz. Ausprägung 2 enthält zusätzlich Maßnahmen zur Stärkung des Radverkehrs sowie eine Reduktion der Parkierungsflächen in Kombination mit Parkraumbewirtschaftung.

Die Annahmen für die Wirkungen dieser Maßnahmen wurden aus (PwC, 2021) übernommen, wo sowohl Einzelmaßnahmen als auch Maßnahmenbündel betrachtet werden.

Ausprägung 1 beinhaltet folgende Annahmen:

- ▶ Durch mehr Fußgänger-Überwege und Fußgänger-Passagen werden Fußwege pauschal um 5 % beschleunigt.
- ▶ Das Angebot des ÖPNV wird verdichtet (50 % mehr Abfahrten) und beschleunigt (pauschal 10 % höhere Geschwindigkeit auf den Linien).
- ▶ Durch den Ausbau von Sharing-Angeboten für die „letzte Meile“ (Bike & Ride, E-Scooter etc.) wird die Anbindungszeit um 50 % verringert.
- ▶ Durch Ride-Pooling in Nebenverkehrszeiten und schlechter erschlossenen Stadtrandzonen ergeben sich zusätzliche Fahrzeitreduktionen um 20 %.
- ▶ Durch den Ausbau von Park&Ride-Möglichkeiten im Stadt-Umlandverkehr insbesondere in ländlichen Verkehrsgebieten werden Anbindungszeiten verkürzt.
- ▶ Beim Umsteigen entstehende Zeitverluste sind einerseits durch den Fahrplan verursacht sowie durch die Zeit, die erforderlich ist, um von einem Verkehrsmittel zum anderen zu gelangen. Weitere Zeitverluste können z. B. dadurch entstehen, dass Personen vorsorglich zusätzliche Zeitpuffer einplanen, um sicher zu gehen, auch bei Verspätungen ihre Anschlüsse zu erreichen. Durch verbesserte Informationsbereitstellung, z. B. durch Mobilitätsplattformen, können solche nicht physisch oder fahrplantechnisch erforderlichen Zeiten beim Umsteigen verringert werden, in dieser Ausprägung wird dafür eine Reduktion um 33 % angenommen.
- ▶ Durch Einschränkungen im Straßenraum wird die Fahrzeit des motorisierten Individualverkehrs im städtischen Netz pauschal um 10 % erhöht.

Ausprägung 2 beinhaltet zusätzlich folgende Annahmen:

- ▶ Durch Ausbau und Verdichtung des Radwegenetzes wird der innerstädtische Radverkehr pauschal um 10 % beschleunigt.
- ▶ Durch den Bau von Radschnellwegen wird auf Hauptverkehrsachsen eine zusätzliche Beschleunigung um 5 % erreicht.

- ▶ Mit Ausnahme von Hauptverkehrsstraßen gilt innerstädtisch pauschal ein Tempolimit von 30 km/h.
- ▶ In dicht bebauten Gebieten wird die Anzahl der Pkw-Stellplätze um 25 % reduziert.
- ▶ In allen geschlossen bebauten Gebieten werden Parkplätze lizenziert.
- ▶ Die Parkkosten im öffentlichen Raum werden verdoppelt.
- ▶ Durch Digitalisierung wird der Parksuchverkehr um 50 % reduziert.

Tabelle 17: Annahmen und Berechnung – Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds

Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds

Kurzbeschreibung:

Durch Stärkung des Radverkehrs und des Fußverkehrs, Verbesserung der Qualität des öffentlichen Verkehrs (Busse, Bahnen) und der Sharing-Angebote für die „letzte Meile“ einerseits sowie durch Einschränkungen im Straßenraum für den motorisierten Individualverkehr, Tempolimits Tempo 30 und die Einführung einer flächendeckenden Parkraumbewirtschaftung andererseits wird Fahrleistung vom motorisierten Individualverkehr zum Umweltverbund verlagert.

Annahmen und Berechnung:

Auf Basis von (PwC, 2021) wurden zwei Maßnahmenbündel betrachtet, die schwächere Ausprägung 1 enthält Maßnahmen zur Stärkung des Umweltverbunds ohne den Radverkehr sowie eine Erhöhung der MIV-Fahrzeit im städtischen Netz. Ausprägung 2 enthält zusätzlich Maßnahmen zur Stärkung des Radverkehrs sowie eine Reduktion der Parkierungsflächen in Kombination mit Parkraumbewirtschaftung.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

	Ausprägung 1	Ausprägung 2
NO _x :	1,06 kt	2,09 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,15 kt	0,28 kt
NM _{VOC} :	1,51 kt	2,62 kt
NH ₃ :	0,08 kt	0,15 kt
SO ₂ :	0,01 kt	0,01 kt

Ansatz:

Koordinierung von Ansätzen aus der lokalen Politik, den städtischen Planungsämtern und der Gesetzgeber auf Bundes- und Landesebene, Bereitstellung von Finanzmitteln

Stand der Umsetzung:

Teilweise Umsetzung in Städten im Rahmen von Luftqualitäts-, Verkehrsentwicklungs- und Klimamobilitätsplänen
Umsetzungshorizont: 2025 bis 2040 (Ausbau Stadtbahnen langfristiger)

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Reduktion des Kraftstoffverbrauchs
+ verursachungsgerechte und zukunftsfähige Nutzer*innenfinanzierung der Straßeninfrastruktur
o im Zusammenhang zu sehen mit weiteren ökonomischen Instrumenten

Quelle:

(Blanck et al., 2021), (Oehlmann et al., 2020) und (PwC, 2021)

3.2.7 City-Logistik

Bei der im Folgenden beschriebenen Maßnahme soll die Fahrleistung des innerstädtischen Güterverkehrs vermindert werden. Wie schon bei den Maßnahmen zur Förderung des Umweltverbunds werden die Annahmen aus (PwC, 2021) übernommen:

- Touren sollen effizienter geplant werden, u. a. durch Berücksichtigung von Information über Verkehrsverhältnisse, Ampelschaltungen, Wetterverhältnisse, Baustellen, Vermeidung des Linksabbiegens.
- Fahrten sollen räumlich und zeitlich besser gebündelt werden, u. a. durch Güterverteilzentren, möglichst angebunden an Schiene/Hafen, davon u. a. konsolidierte Belieferung der Geschäfte, durch Zusammenfassung der Leistungen einzelner Logistikdienstleister*innen unter einem White Label, durch Einrichtung von Mikrodepots zur Weiterverteilung durch Lastenräder, durch Einrichtung von Bündelungsstellen zum Abholen zur Vermeidung von Mehrfachzustellungen (Packstationen, Pick-up Points, Paketshops).

Insgesamt wird die Anzahl an Leerfahrten verringert und der Beladungsgrad erhöht. Für die in (PwC, 2021) untersuchte repräsentative Modellstadt führt dies zu Minderungen der innerstädtischen Güterverkehrs-Fahrleistung von 13 bis 14 %.

Tabelle 18: Annahmen und Berechnung – City-Logistik

City-Logistik

Kurzbeschreibung:

Verminderung der Fahrleistung des innerstädtischen Güterverkehrs durch effizientere Tourenplanung (Berücksichtigung von Informationen über Verkehrsverhältnisse, Ampelschaltungen, Wetterverhältnisse, Baustellen, ...) und durch bessere räumliche und zeitliche Bündelung von Fahrten (Güterverteilzentren, Zusammenfassung von Leistungen einzelner Logistikdienstleister unter einem „White Label“, Mikrodepots zur Weiterverteilung durch Lastenräder, Bündelungsstellen zum Abholen zur Vermeidung von Mehrfachzustellungen).

Annahmen und Berechnung:

Nach (PwC, 2021) kann durch die oben genannten Maßnahmen zur City-Logistik die Anzahl der Leerfahrten verringert werden und der Beladungsgrad um 25 % erhöht werden. Dies führt zu einer Reduktion der innerstädtischen Güterverkehrsfahrleistung um 13,5 %.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	0,77 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,07 kt
NM VOC:	0,06 kt
NH ₃ :	0,01 kt
SO ₂ :	<0,01 kt

Ansatz:

Koordinierung von Ansätzen aus der lokalen Politik, der städtischen Planungsämter und der Gesetzgeber auf Bundes- und Landesebene, Einbeziehung privater Logistikdienstleister*innen

Stand der Umsetzung:

Teilweise Umsetzung in Städten im Rahmen von Luftqualitäts-, Verkehrsentwicklungs- und Klimamobilitätsplänen
Umsetzungshorizont: schrittweise Umsetzung ab 2025

Synergien/Wechselwirkungen:

- + Reduktion des Kraftstoffverbrauchs
- + kompatibel mit Maßnahmen zur Förderung des Umweltverbunds

Quellen:

(PwC, 2021)

3.2.8 Flugverkehr

Im Bereich des Flugverkehrs werden zwei Maßnahmen untersucht: „Erhöhung der Luftverkehrssteuer“ und „Förderung zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt“. Zunächst wird die Erhöhung der Luftverkehrssteuer beschrieben.

Eine Erhöhung der Luftverkehrssteuer bewirkt eine Erhöhung der Ticketpreise und somit der Reisekosten. Für die Erhöhung ab dem Jahr 2024 wird ein Wert von 10,12 € pro Flug für nationale und internationale Flüge bis 2.000 km angenommen (entspricht dem Vorschlag aus (Neiva et al., 2021) für „Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums bis 6.000 km“). Für Flüge über 2.000 km wird eine Erhöhung der Steuer von 45,54 € angenommen (Vorschlag für „Flüge außerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums über 6.000km“ aus (Neiva et al., 2021)). Aus der Preiserhöhung resultiert eine Nachfragereduktion. Hierfür werden die Elastizitäten -0,9 (national) und -0,76 (international) aus (Repenning, 2021) verwendet. Da das Konzept der Preiselastizität auf prozentualen Preisänderungen beruht, sind noch absolute Ticketpreise anzugeben. Diese wurden aus (Grimme und Maertens, 2022) und (Brützel und Kirchgeßner, 2019) abgeleitet. Die angenommenen Preis- und Verkehrsleistungsänderungen können der folgenden Tabelle entnommen werden. Die prozentualen Änderungen werden einheitlich auf alle Betrachtungsjahre angewandt.

Tabelle 19: Änderungen an den Preisen und Verkehrsmengen durch die Maßnahme „Erhöhung der Luftverkehrssteuer“

	National	International ≤2.000 km	International >2.000 km
Ticketpreis	154 €	196 €	504 €
Steueränderung	10,12 €	10,12 €	45,54 €
Preissteigerung	7%	5%	9%
Verkehrsleistungsänderung	-6%	-4%	-7%

Es wird angenommen, dass die Änderung in der Verkehrsleistung nicht zulasten der Auslastung der Flugzeuge geht. Es wird demnach von einer Reduktion des Angebots ausgegangen. Demnach reduzieren sich die jeweiligen Emissionen proportional zu der Verkehrsleistungsänderung. Bei der Überprüfung der Einhaltung der Reduktionsverpflichtungen gemäß NEC-Richtlinie werden die Emissionen oberhalb von 3.000 Fuß nicht berücksichtigt. Die Minderungspotenziale der Maßnahme werden daher anteilig an den Emissionen aus Start- und Landezyklen berechnet. Der folgende Steckbrief fasst die Annahmen und errechneten Minderungspotenziale für 2030 zusammen.

Tabelle 20: Annahmen und Berechnung – Erhöhung der Luftverkehrssteuer

Erhöhung der Luftverkehrssteuer

Kurzbeschreibung:

Seit Januar 2011 wird in Deutschland die Luftverkehrssteuer erhoben, die zum Abflug eines Fluggastes berechtigt. Die Steuer entsteht mit dem Abflug des Passagiers von einem inländischen Flughafen. Die Besteuerung umfasst lediglich gewerbliche Flüge durch Luftverkehrsunternehmen. Güterverkehre werden indes nicht besteuert. Aktuell wird bereits die Luftverkehrssteuer erhoben, die letztmalig im Jahr 2022 angepasst wurde. In der Maßnahme „Erhöhung der Luftverkehrssteuer“ wird analysiert, welchen Einfluss eine weitere Erhöhung der Steuer bewirken könnte. Es wird von einer Nachfragereduktion aufgrund der Preiserhöhung ausgegangen.

Annahmen und Berechnung:

Es wird angenommen, dass die steigenden Ticketpreise aufgrund der Steueranhebung zu einer Reduktion der Verkehrsnachfrage führen. Es werden Steueranhebungen für Flüge ≤ 2.000 km in Höhe von ca. 10 € und für Flüge > 2.000 km von knapp 46 € angenommen. Für die Nachfragereduktion wird eine Preiselastizität von -0,9 (national) und -0,76 (international) angenommen. Die Nachfrageänderung bewirkt eine proportionale Angebotsreduktion (die Auslastung bleibt konstant).

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	0,32 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	<0,01 kt
NMVOC:	0,04 kt
NH ₃ :	0,01 kt
SO ₂ :	0,03 kt

Ansatz:

Die Steuer wird analog zum „Gesetz zur Änderung des Luftverkehrssteuergesetzes“ (BMF, 2022) vom Dezember 2019 angepasst. Die Steuer wird pro Flug erhoben. Alternativ könnte auch eine Erhebung von Steuern auf Kerosin erfolgen. Hierdurch würden aber z. T. andere Anreize entstehen.

Stand der Umsetzung:

Seit Januar 2011 wird in Deutschland die Luftverkehrssteuer erhoben. Mit dem „Gesetz zur Änderung des Luftverkehrssteuergesetzes“ wurde letztmalig im Jahr 2022 eine Anpassung beschlossen (BMF, 2022). Die aktuellen Sätze betragen: 12,77 € (Kurzstrecke), 32,35 € (Mittelstrecke) und 58,23 € (Langstrecke). Aktuell ist keine weitere Anpassung der Steuer beschlossen.

Umsetzungshorizont: Angenommen wird eine Erhöhung der Steuer im Jahr 2024 (Neiva et al., 2021).

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Reduktion von Treibhausgasemissionen

o Ermitteltes Reduktionspotenzial sinkt bei gleichzeitiger Umsetzung der Maßnahme „Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt“.

Quellen:

Ticketpreise abgeleitet aus (Grimme und Maertens, 2022) und (Brützel und Kirchgeßner, 2019). Vorschläge zu den Steueranpassungen und Einführungszeitraum aus (Neiva et al., 2021). Preiselastizitäten aus (Repenning, 2021).

Anmerkung: Bilanziert werden lediglich die Emissionen, die im Landing and Take Off (LTO)-Zyklus, also bei Start und Landung entstehen.

Aktuell beruht der zivile Flugverkehr fast ausschließlich auf dem Einsatz von fossilem Kerosin. Nach der nationalen Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED II (BMU, 2021) sind Mindestanteile von synthetischem flüssigem Kraftstoff aus Strom (Power to Liquid, PtL) ab dem Jahr 2026 vorgesehen. Im Jahr 2030 soll der Anteil mindestens 2 % betragen. Dies ist im WM-Szenario angenommen. Über (Soone und Claros, 2022) kann ein ambitionierterer Hochlauf abgeschätzt werden. Von den höheren Anteilen an PtL und fortschrittlicher Biokraftstoffe erhofft man sich neben Treibhauseinsparungen auch Reduktionen von Luftschadstoffemissionen. Im

Rahmen der Analyse wurden vier Quellen herangezogen, um zu überprüfen, ob die spezifischen Luftschadstoffemissionen geringer sind als beim fossilen Kerosin: (Santoni et al., 2011), (Zschocke, 2014), (Lobo et al., 2011) und (Neuling et al., 2019). Zu Ammoniak wurden keine Änderungen gefunden. Bei den PM- und NMVOC-Emissionen waren die Messungen nicht eindeutig, sodass keine Verbesserung oder Verschlechterung mit statistischer Signifikanz hergeleitet werden konnte. Demgegenüber konnten leichte Verbesserungen bei den NO_x-Emissionen und deutliche Reduktionen von SO₂ festgestellt werden. Für die Anteile von PtL und fortschrittlichen Biokraftstoffen werden Verbesserungen für NO_x in Höhe von 20 % und für SO₂ von 98 % angenommen. In Tabelle 21 werden die Anteile und die Verbesserungen angegeben.

Tabelle 21: Änderungen an den Preisen und Verkehrsmengen durch die Maßnahme „Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt“

	2025	2030	2035	2040
PtL-Anteil WM-Szenario	0%	2%	2%	2%
PtL-Anteil Maßnahme	2%	5,7%	25%	40%
Erhöhung ggü. WM-Szenario	2%-Pkt.	3,7%-Pkt.	20%-Pkt.	38%-Pkt.
Spez. Verbesserung NO _x	20%	20%	20%	20%
EF-Verbesserung NO _x	0,4% (2%*20%)	0,7% (3,7%*20%)	4,6% (20%*20%)	7,6% (38%*20%)
Spez. Verbesserung SO ₂	98%	98%	98%	98%
EF-Verbesserung SO ₂	2,0% (2%*98%)	3,6% (3,7*98%)	22,6% (20*98%)	37,3% (38*98%)

Der folgende Steckbrief fasst die Maßnahme „Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt“ zusammen und gibt die Einsparpotenziale für das Jahr 2030 an.

Tabelle 22: Annahmen und Berechnung – Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt

Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt

Kurzbeschreibung:

Aktuell wird ausschließlich fossiles Kerosin im zivilen Luftverkehr eingesetzt. Durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED II (BMU, 2021) ist eine Mindestquote von PtL ab 2026 vorgeschrieben. Die Quote steigt von 0,5 % (2026) auf 1 % im Jahr 2028 und 2 % im Jahr 2030. Dieser Anteil wird im Rahmen der betrachteten Maßnahme höher angenommen. Für das Jahr 2030 wird ein Anteil von PtL und fortschrittlicher Biokraftstoffe von 5,7 % angenommen. Es wird angenommen, dass neben der angestrebten Treibhausgasminderung durch den Einsatz von PtL auch eine Reduktion der Luftschadstoffemissionen erzielt wird. Es wird von einer Reduktion der NO_x- und SO₂-Emissionen ausgegangen.

Annahmen und Berechnung:

Im WM-Szenario werden bereits Anteile für PtL nach der RED II angenommen. Im Rahmen der Maßnahme werden höhere PtL-Anteile angenommen. Im Jahr 2030 ist der Anteil 3,7 % höher als im WM-Szenario. Für NO_x- und SO₂-Emissionen konnte eine Reduktion der spezifischen Emissionen beim Einsatz von PtL gegenüber fossilem Kerosin festgestellt werden. Diese spezifische Verbesserung liegt bei NO_x bei 20 % und bei SO₂ bei 98 %. Die genannten Verbesserungen werden bei der Quantifizierung jedoch nur auf die Differenz zwischen WM-Szenario und Maßnahme (+3,7 % im Jahr 2030) angewandt.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	0,06 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	-
NM VOC:	-
NH ₃ :	-
SO ₂ :	0,03 kt

Ansatz:

Erzeugungsanlagen für strombasierte Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien befinden sich in der Entwicklungs- und Marktvorlaufphase. Die Kraftstoffe sind derzeit im Vergleich zu konventionellen, fossilen Kraftstoffen nicht wettbewerbsfähig. Dies liegt an hohen Investitions- und Betriebskosten sowie fehlender Mehrzahlungsbereitschaft. Mit Hilfe einer über mehrere Jahre angelegten Bundesförderung kann die Wirtschaftlichkeitsbewertung für diese Anlagen verbessert und der notwendige Markthochlauf von Erzeugungsanlagen unterstützt werden.

Für die Entwicklung regenerativer Kraftstoffe und die Förderung von Anlagen zur Erzeugung strombasierter Kraftstoffe, fortschrittlicher Biokraftstoffe sowie von Antriebstechnologien für die Luftfahrt stehen Fördermittel im Energie- und Klimafonds zur Verfügung.

Stand der Umsetzung:

Fördermittel stehen über Energie- und Klimafonds zur Verfügung. Diese wurden jedoch im Jahr 2020 zu großen Teilen nicht abgerufen (BMF, 2021).

Umsetzungshorizont: Erhöhung der Anteile von PtL und fortschrittlichen Biokraftstoffen ab 2025 bei einer sukzessiven Steigerung der Anteile.

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Treibhausgasminderung

o Ermitteltes Reduktionspotenzial sinkt bei gleichzeitiger Umsetzung der Maßnahme „Erhöhung der Luftverkehrssteuer“.

Quellen:

Erhöhung der Anteile von PtL aus (Soone und Claros, 2022). Verbesserung der Emissionsfaktoren aus (Santoni et al., 2011), (Zschocke, 2014), (Lobo et al., 2011) und (Neuling et al., 2019).

3.2.9 Schienenverkehr

Im Bereich des Schienenverkehrs werden zwei Maßnahmen untersucht: „Elektrifizierung Schienenverkehr“ und „Stärkung Schienenpersonenfernverkehr: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung“. Zunächst wird die Elektrifizierung des Schienenverkehrs beschrieben.

Bei der Elektrifizierung des Schienenverkehrs wird davon ausgegangen, dass der Anteil an elektrischer Traktion steigen wird. Angenommen wird, dass die Verkehrsleistung gegenüber dem WM-Szenario unverändert bleibt. Weitere Informationen sind im Steckbrief (Tabelle 23) zu finden. Die Anteile der elektrischen Traktion an der Verkehrsleistung pro Transportart und Jahr sind unter dem Steckbrief in Abbildung 15 angegeben.

Tabelle 23: Annahmen und Berechnung – Elektrifizierung Schienenverkehr

Elektrifizierung Schienenverkehr

Kurzbeschreibung:

Die Traktion des Schienenverkehrs erfolgt in Deutschland überwiegend elektrisch, jedoch gibt es noch einige Strecken, die nicht mit einer Oberleitung ausgestattet sind. Hier erfolgt in der Regel die Traktion über Dieselmotoren. Durch eine umfassendere Elektrifizierung durch Oberleitungs- und/oder batterieelektrische Züge können die direkten motorischen Schadstoffemissionen reduziert werden.

Annahmen und Berechnung:

Ausgehend von den Annahmen der Anteile der elektrischen Traktion des WM-Szenarios werden nach 2025 steigende Anteile sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr angenommen. Die Anteile steigen auf 100 % im Jahr 2040.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	1,08 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,01 kt*
NM VOC:	0,09 kt
NH ₃ :	0,01 kt
SO ₂ :	<0,01 kt

Ansatz:

Der Plan der Bundesregierung ist ein Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur bis 2025 auf 70 % (BMDV, 2021a). Zudem möchte die Deutsche Bahn Diesellokomotiven durch batterieelektrische Lokomotiven mit Stromabnehmer ersetzen, um hierdurch auch durch Oberleistungsinseln ohne Komplettausbau eine Elektrifizierung zu ermöglichen. Bis zum Jahr 2040 soll bei der Deutschen Bahn der gesamte Verkehr „klimaneutral“ abgewickelt werden (Tagesschau, 2022).

Stand der Umsetzung:

Aktuell werden Strecken elektrifiziert, so z. B. die Hochrheinbahn von Basel zum Bodensee (Schwarz, 2022). Neben dem Ersatz von Diesellokomotiven durch batterieelektrische Lokomotiven (Tagesschau, 2022) kommen auch Brennstoffzellenzüge zum Einsatz, die ebenfalls keine direkten Schadstoffemissionen aufweisen (Hahn, 2022).

Umsetzungshorizont: Der Ausbau befindet sich bereits in der Umsetzung. Eine Steigerung gegenüber WM-Szenario wird nach 2025 angenommen mit Abschluss der vollständigen Elektrifizierung im Jahr 2040.

Synergien/Wechselwirkungen:

- + Reduktion des Energieverbrauchs und Treibhausgasemissionen
- + Reduktion von Lärm
- o Verlagerungen von der Straße auf die Schiene haben noch höhere Einsparpotenziale.

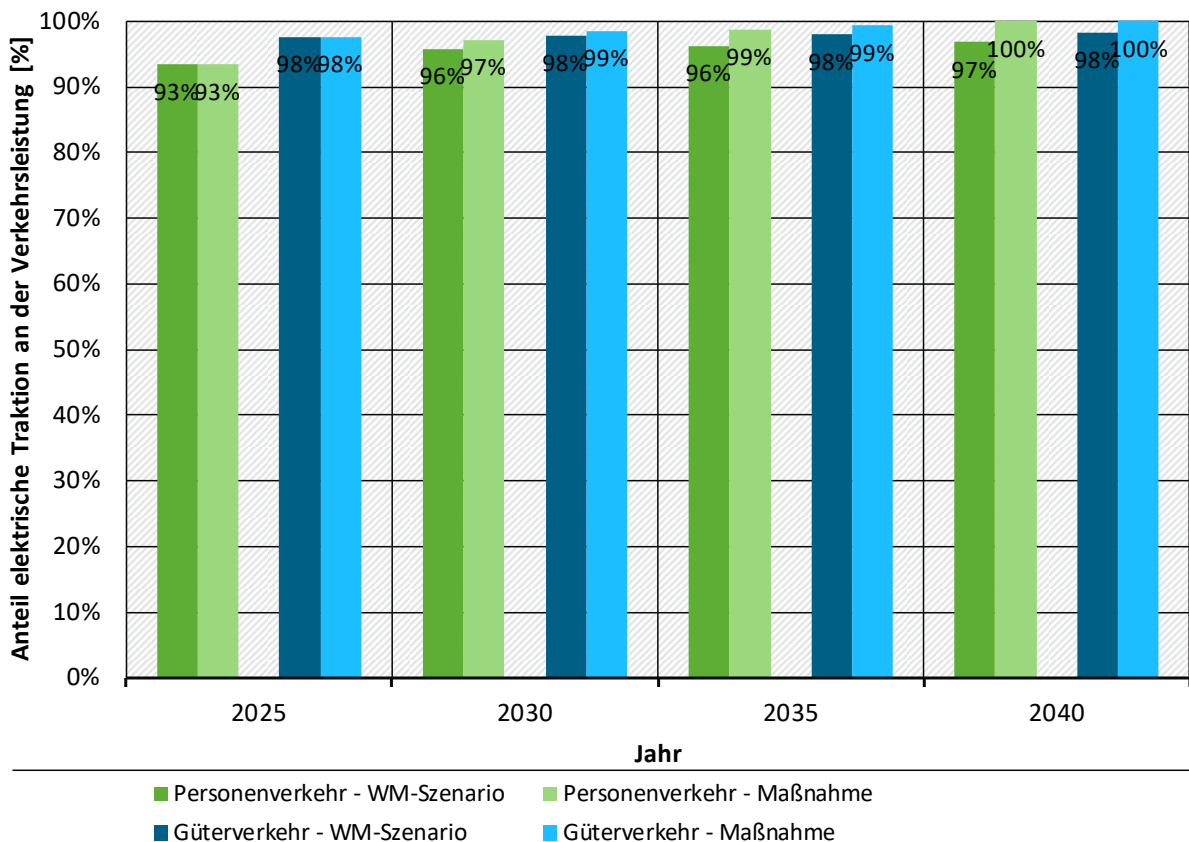
Quellen:

Eigene Annahmen. Diese decken sich mit den Zielen der Deutschen Bahn (Hahn, 2022).

Anmerkung: *Inklusive Abrieb

Abbildung 15: Anteile elektrischer Traktion im Schienenverkehr im WM-Szenario und bei umgesetzter Maßnahme

Maßnahme: Elektrifizierung Schienenverkehr



Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Maßnahme „Stärkung Schienenpersonenfernverkehr: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung“ wird davon ausgegangen, dass schrittweise die Schieneninfrastruktur ausgebaut und die Digitalisierung vorangetrieben wird, um auf Basis dessen den Deutschlandtakt einführen zu können. Der Deutschlandtakt ermöglicht deutschlandweit eine bessere Abstimmung der Züge aufeinander. Hierdurch werden Umsteige- und Reisezeiten signifikant gesenkt. Somit gewinnt der Schienenverkehr gegenüber dem Pkw an Attraktivität. Die Annahmen zur Quantifizierung der Wirkungen der Maßnahme werden dem Projektionsbericht 2021 entnommen (Repenning, 2021). Die Verbesserung des Bahnangebots erzielt eine Zeiteinsparung für die Reisenden bis 2030 von 5 % und bis 2040 von 10 %. Es wird eine Reisezeitelastizität von -0,6 angenommen. Hieraus wird eine Erhöhung der Verkehrsleistung im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) in Höhe von 3 % im Jahr 2030 und 6 % im Jahr 2040 abgeleitet. Für das Zwischenjahr 2035 wird in der Berechnung der Mittelwert 4,5 % angenommen. Bis zum Jahr 2025 wird von keiner Änderung gegenüber dem WM-Szenario ausgegangen. Für die so zusätzlich entstehende Verkehrsleistung wird angenommen, dass diese vom Pkw verlagert wird. Die folgende Tabelle fasst die Änderungen an den Verkehrsmengen im Schienenpersonenfernverkehr zusammen.

Tabelle 24: Änderungen an den Verkehrsmengen durch die Maßnahme „Stärkung SPfV: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung“

Jahr	Verkehrsmittel	Verkehrsleistung WM-Szenario	Verkehrsleistungs- änderung	Verkehrsleistung mit Maßnahme
2030	Bahn (Fernverkehr)	45,6 Mrd. Pkm	+1,4 Mrd. Pkm	47,0 Mrd. Pkm
	Pkw	963,0 Mrd. Pkm	-1,4 Mrd. Pkm	961,6 Mrd. Pkm
2035	Bahn (Fernverkehr)	46,2 Mrd. Pkm	+2,1 Mrd. Pkm	48,3 Mrd. Pkm
	Pkw	961,7 Mrd. Pkm	-2,1 Mrd. Pkm	959,6 Mrd. Pkm
2040	Bahn (Fernverkehr)	46,8 Mrd. Pkm	+2,8 Mrd. Pkm	49,6 Mrd. Pkm
	Pkw	964,2 Mrd. Pkm	-2,8 Mrd. Pkm	961,4 Mrd. Pkm

Anmerkung: Im Jahr 2025 gibt es keine Änderung gegenüber dem WM-Szenario

Der folgende Steckbrief zeigt u. a. die Änderungen der Emissionen im Jahr 2030, die aus der Verlagerung resultieren. Anzumerken ist, dass die Partikelemissionen durch die Maßnahme steigen. Dies ist auf die im Vergleich hohen Abriebemissionen bei der Bahn zurückzuführen.

Tabelle 25: Annahmen und Berechnung – Stärkung SPFV: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung

Stärkung SPFV: Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung

Kurzbeschreibung:

Bei der Maßnahme wird davon ausgegangen, dass schrittweise die Schieneninfrastruktur ausgebaut und die Digitalisierung vorangetrieben wird. Dies ermöglicht die Einführung des Deutschlandtakts und eine Ausweitung des Bahnangebots. Hierdurch werden Umsteige- und Reisezeiten gesenkt. Aufgrund der Reisezeitsenkung wird von einer Verlagerung vom Pkw auf die Bahn ausgegangen. Hierdurch entfallen Pkw-Fahrten und somit werden verbrennungsmotorische Emissionen vermieden.

Annahmen und Berechnung:

Angenommen wird eine Zeiteinsparung für Reisende bis 2030 von 5 % und bis 2040 von 10 % durch eine Verbesserung des Bahnangebots. Es wird eine Reisezeitelastizität von -0,6 angenommen. Hieraus wird eine Erhöhung der Verkehrsleistung im SPFV von 3 % im Jahr 2030 und 6 % im Jahr 2040 abgeleitet. Für die so zusätzlich entstehende Verkehrsleistung wird angenommen, dass diese vom Pkw verlagert wird.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	0,11 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	-0,08 kt*
NM VOC:	0,06 kt
NH ₃ :	0,01 kt
SO ₂ :	<0,01 kt

Ansatz:

Für ein besseres Bahnangebot braucht es aber zunächst die dafür passende Schieneninfrastruktur. Hierfür wurde ein Zielfahrplan entwickelt, anhand dessen die jeweils passgenaue Infrastruktur abgeleitet wurde. Dieser enthält unter anderem halbstündige Verbindungen auf den Hauptachsen im Schienenpersonenfernverkehr. Der Deutschlandtakt soll in Etappen umgesetzt werden. Dies bedeutet, dass die Maßnahme nicht auf einmal, sondern in sinnvollen Bündeln umgesetzt wird.

Stand der Umsetzung:

Der finale Gutachterentwurf zum Zielfahrplan wurde im Juni 2020 vorgestellt (BMDV, 2020). Die hierfür erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen wurden im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) volkswirtschaftlich bewertet. Auf Basis des BVWP konnte für ca. 180 Infrastrukturprojekte mit einem Investitionsvolumen von rund 40 Mrd. € die Planung vorbereitet werden (BMDV, 2021b).

Umsetzungshorizont: Angenommen wird, dass erste (positive) Wirkungen nach 2025 erfolgen. Ein kontinuierlicher Ausbau und eine Verbesserung des Angebots werden bis 2040 angenommen.

Synergien/Wechselwirkungen:

- + Reduktion von Treibhausgasemissionen
- Erhöhung der PM-Emissionen durch den im Vergleich hohen Abrieb bei der Bahn
 - o Höhere Reduktionen von Schadstoffemissionen (abgesehen von PM) bei gleichzeitiger Umsetzung der Maßnahme „Elektrifizierung Schienenverkehr“

Quellen:

Es wurden die Annahmen zur Reisezeitverkürzung und Reisezeitelastizität aus dem Projektionsbericht 2021 verwendet (Repenning, 2021).

Anmerkung: *Inklusive Abrieb. Das negative Vorzeichen bedeutet einen Anstieg der Emissionen durch die Maßnahme.

3.2.10 Ökonomische Instrumente

Zu den im Folgenden betrachteten ökonomischen Instrumenten gehören die Maßnahmen „Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut“, „Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel“, „Abschaffung der Entfernungspauschale“ sowie „Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen: Reform des Dienstwagenprivilegs“.

Die Wirkung der ersten beiden genannten Maßnahmen wird mit Hilfe der Pkw-Preiselastizität abgeschätzt, in diesem Fall der Sensitivität der Pkw-Fahrleistung (FL) auf Preisänderungen ($\Delta FL / \Delta \text{Kosten}$). Für die Preiselastizität wurde hier der Wert -0,3 angesetzt. Dieser Wert wurde bereits im Vorgängerprojekt verwendet und entspricht auch dem in (Blanck et al., 2018) sowie dem in (Theloke et al., 2013) angesetzten Wert. Andere Autor*innen kommen teilweise auf höhere Werte, z. B. fanden (Zimmer und Koch, 2017) eine kurzfristige Preiselastizität der Pkw-Fahrleistung von -0,65, die langfristig auf einen Wert von -1,13 ansteigt. Der hier angesetzte Wert ist also der für Deutschland am häufigsten verwendete Wert und entspricht einer eher konservativen Annahme.

Zur Plausibilisierung des Werts für die Preiselastizität wurde eine Meldung der Tagesschau vom 02.08.2022 herangezogen: Nach Auskunft des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) lag die Kraftstoffabgabe im Zeitraum von März bis Mai 2022 für Benzin und für Diesel um ca. 10 % niedriger als im Vor-Corona-Vergleichszeitraum von März bis Mai 2019. Als Hauptgrund für den Rückgang wurde für Benzin der hohe Spritpreis genannt, bei Diesel zusätzlich eine geringere Güterverkehrs-Nachfrage.

Da die oben betrachteten Maßnahmen auf die Personenverkehrs-Fahrleistung zielen, wurde die Abschätzung hier anhand des Benzinpreises durchgeführt. Die Steigerung des Benzinpreises lag im betrachteten Zeitraum bei 41,5 % (da die Inflation in diesem Zeitraum im Wesentlichen durch die Energiepreise getrieben wurde, wurde für diese Abschätzung eine Inflationsbereinigung durchgeführt). Damit ergibt sich ein Wert für die Preiselastizität von -0,24 (oder etwas höher bei Bereinigung), was die Größenordnung von -0,3 bestätigt. Die Abschätzung zeigt darüber hinaus, dass diese Wirkung bereits kurzfristig eintritt.

Tabelle 26: Annahmen und Berechnung – Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel

Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel

Kurzbeschreibung:

Die Energiesteuern auf Diesel (und Erdgas und Flüssiggas) sind niedriger als auf Benzin. Bei einer Angleichung der Steuersätze ist eine Reduktion der Fahrleistung der Diesel-Pkw zu erwarten. Ebenfalls zu erwarten sind Verschiebungen bei der Antriebswahl zu Gunsten von Benzinern und Elektrofahrzeugen. Weiterhin besteht ein Anreiz für Plug-In-Hybridfahrzeuge, welche mit einem Dieselmotor ausgestattet sind, häufiger im elektrischen Modus zu fahren. Die Maßnahme bezieht sich auf den Personenverkehr, im gewerblichen Bereich könnte ein Rückerstattungssystem eingeführt werden (wie in anderen EU-Ländern).

Annahmen und Berechnung:

Nach (Blanck et al., 2021) führt eine Angleichung der Diesel- an die Benzinsteuern zu einer Dieselpreissteigerung von durchschnittlich 18 %. Wie schon bei der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut“ wurde auch hier eine Preiselastizität von -0,3 angenommen. Dies führt zu einer Reduktion der Fahrleistung der Diesel-Pkw um 5,4 %. Mit ohnehin abnehmendem Diesel-Anteil an den Pkw-Neuzulassungen (von ca. 50 % 2015 auf unter 20 % 2022) sinkt der Effekt einer weiteren energiesteuerbedingten Verschiebung bei den Neuzulassungen. Dieser Effekt wurde hier nicht quantifiziert.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	3,03 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,17 kt
NMVOC:	0,06 kt
NH ₃ :	0,08 kt
SO ₂ :	0,01 kt

Ansatz:

Weder verfassungs- noch EU-rechtlich bestehen Bedenken gegen eine Angleichung der Energiesteuern. Bei einem System der Rückerstattung von Kraftstoffsteuern bei gewerblichen Verwendungen besteht eine beihilferechtliche Notifizierungspflicht.

Stand der Umsetzung:

nicht umgesetzt

Umsetzungshorizont: 2025

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Reduktion des Kraftstoffverbrauchs

o im Zusammenhang zu sehen mit weiteren ökonomischen Instrumenten

Quellen:

(Blanck et al., 2021) und (Oehlmann et al., 2020).

Anmerkung: Alle Zahlen wurden auf die zweite Nachkommastelle gerundet.

Tabelle 27: Annahmen und Berechnung – Abschaffung der Entfernungspauschale

Abschaffung der Entfernungspauschale

Kurzbeschreibung:

Mit der Entfernungspauschale können Wegekosten zwischen Wohn- und Arbeitsstätte als Werbungskosten von der Einkommensteuer abgesetzt werden. Sie begünstigt damit den Trend zu langen Arbeitswegen und ermöglicht es vielen Arbeitnehmer*innen, im Umland von Städten zu wohnen. Dadurch fördert sie Verkehrsaufkommen und Zersiedlung. Durch eine Abschaffung oder Reduktion der Entfernungspauschale wird umgekehrt das Verkehrsaufkommen reduziert und der Zersiedelung entgegengewirkt.

Annahmen und Berechnung:

Eine Abschaffung der Entfernungspauschale bewirkt nach Petschow et al. (2008) eine Reduktion der Pkw-Fahrleistung um 2,3 % in 10 Jahren und nach Rodt et al. (2010) um 4,5 % nach 10 Jahren und um 7 % nach 20 Jahren. Hier wurde als Kombination beider Quellen folgende Reduktion angesetzt: 2025: 0,5 %, 2030: 2 %, 2035: 4,5 %, 2040: 5,8 %.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	1,55 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,17 kt
NM VOC:	0,49 kt
NH ₃ :	0,14 kt
SO ₂ :	0,01 kt

Ansatz:

Die Entfernungspauschale rechtfertigt sich aus dem der Einkommensbesteuerung grundsätzlich zugrundeliegenden „Nettoprinzip“. Danach unterliegt der Einkommensteuer grundsätzlich nur das Nettoeinkommen, nämlich der Saldo aus den Erwerbseinnahmen einerseits und den (betrieblichen/beruflichen) Erwerbsaufwendungen sowie den (privaten) existenzsichernden Aufwendungen andererseits. Nach der Rechtsprechung des Bundesverfassungsgerichts kann der Gesetzgeber das objektive Nettoprinzip beim Vorliegen gewichtiger Gründe durchbrechen und sich dabei generalisierender, typisierender und pauschalierender Regelungen bedienen.

Stand der Umsetzung:

nicht umgesetzt

Umsetzungshorizont: 2025 bis 2040

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Reduktion des Kraftstoffverbrauchs

o im Zusammenhang zu sehen mit weiteren ökonomischen Instrumenten

Quellen:

(Blanck et al., 2021), (Petschow et al., 2008) und (Rodb et al., 2010).

Tabelle 28: Annahmen und Berechnung – Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen

Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen

Kurzbeschreibung:

Aktuell müssen Arbeitnehmer*innen den geldwerten Vorteil der privaten Nutzung von Dienstwagen pauschal mit 1 % des Bruttolistenpreises pro Monat versteuern. Das Fahrzeug wird als Fahrzeug des Unternehmens behandelt (und von diesem abgesetzt); sämtliche Kosten gelten für das Unternehmen als Betriebsausgaben, häufig übernimmt das Unternehmen alle Kosten inklusive Kraftstoff. Die aktuelle Praxis verleitet einerseits zum Vielfahren und andererseits zum häufigen Neuwagenerwerb größerer Fahrzeuge.

Annahmen und Berechnung:

Nach (Blanck et al., 2021) reduziert sich die Fahrleistung der Dienstwagen bei einer Besteuerung des gesamten geldwerten Vorteils inklusive privat gefahrener Kilometer je nach Ausgestaltung zwischen 25 % und 75 %. Hier wird eine Minderung zwischen 10 % im Jahr 2025 und 75 % im Jahr 2040 angesetzt sowie nach (Blanck et al., 2018) ein Anteil der Dienstwagen-Fahrleistung an der Pkw-Fahrleistung von 6 %.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

NO _x :	1,63 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,18 kt
NM VOC:	0,51 kt
NH ₃ :	0,15 kt
SO ₂ :	0,01 kt

Ansatz:

Zeitnahe Umsetzung möglich, da es sich um eine Umgestaltung eines bestehenden Systems handelt.

Stand der Umsetzung:

nicht umgesetzt

Umsetzungshorizont: 2025 bis 2040

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Reduktion des Kraftstoffverbrauchs

o im Zusammenhang zu sehen mit weiteren ökonomischen Instrumenten

Quellen:

(Blanck et al., 2021) und (Blanck et al., 2018).

Tabelle 29: Annahmen und Berechnung – Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut

Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut

Kurzbeschreibung:

Durch eine fahrleistungsabhängige Pkw-Maut wird der motorisierte Individualverkehr teurer. Dadurch ergeben sich Anreize, Autofahrten zu verkürzen oder ganz einzusparen oder stattdessen auf klimafreundlichere Verkehrsmittel umzusteigen. Langfristig wird die Elektrifizierung des Verkehrs bei gleichbleibenden Steuersätzen zu sinkenden Staatseinnahmen aus der Energiesteuer führen. Die fahrleistungsabhängige Pkw-Maut ist eine Möglichkeit, eine verursachungsgerechte und zukunftsfähige Nutzer*innenfinanzierung der Straßeninfrastruktur langfristig zu gewährleisten.

Annahmen und Berechnung:

Nach (Blanck et al., 2021) entspricht eine fahrleistungsabhängige Pkw-Maut in Höhe von 6 ct/km einer Erhöhung der Pkw-Nutzer*innenkosten um ca. 60 % und führt zu einer Reduktion der Pkw-Fahrleistung von ca. 18 %. Dies ist kompatibel mit einer Preiselastizität von -0,3, wie sie z. B. auch von (Blanck et al., 2018) angesetzt wird.

Hier wurde eine stufenweise Einführung von 2 ct/km im Jahr 2030 bis 6 ct/km im Jahr 2040 angenommen. Untersucht wurden zwei Ausprägungen: Ausprägung 1: Pkw-Maut nur auf Bundesautobahnen, Ausprägung 2: Pkw-Maut bundesweit.

Minderungspotenzial im Jahr 2030:

	Ausprägung 1	Ausprägung 2
NO _x :	1,78 kt	4,65 kt
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	0,15 kt	0,51 kt
NM _{VOC} :	0,05 kt	1,46 kt
NH ₃ :	0,16 kt	0,42 kt
SO ₂ :	0,01 kt	0,03 kt

Ansatz:

Mautregelungen sind Bepreisungssysteme nach Art einer Gebühr. Der Bund hat gemäß Art. 74 Abs. 1 Nr. 22 GG unter anderem die Gesetzgebungskompetenz für „die Erhebung und Verteilung von Gebühren oder Entgelten für die Benutzung öffentlicher Straßen mit Fahrzeugen“ und kann die Pkw-Maut damit beschließen.

Stand der Umsetzung:

nicht umgesetzt

Umsetzungshorizont: 2030: 2 ct/km, 2035: 4 ct/km, 2040: 6 ct/km

Synergien/Wechselwirkungen:

+ Reduktion des Kraftstoffverbrauchs

+ verursachungsgerechte und zukunftsfähige Nutzer*innenfinanzierung der Straßeninfrastruktur
o im Zusammenhang zu sehen mit weiteren ökonomischen Instrumenten

Quellen:

(Blanck et al., 2021) und (Oehlmann et al., 2020)

3.3 Erstellung der Szenarien (Bündelung der Maßnahmen)

Die Auswahl der Maßnahmen für das WAM-Szenario erfolgte unter mehreren Gesichtspunkten. Im Vordergrund steht das Ziel, die gegenwärtige Lücke zwischen dem WM-Szenario und den NEC-Verpflichtungen für die einzelnen Schadstoffe zu schließen. Dafür müssen die Emissionen und Minderungspotenziale aller Sektoren, d. h. neben Verkehr z. B. auch Energiewirtschaft, Landwirtschaft etc., berücksichtigt werden. Diese sektorübergreifenden Aspekte wurden vom Umweltbundesamt analysiert und werden in diesem Bericht nicht näher erläutert.

Zentrale Faktoren für die Auswahl der Maßnahmen für den Verkehr waren die ermittelten Minderungspotenziale und weiteren Faktoren wie Kosten und Hemmnisse der Umsetzung. Im Folgenden wird die Erstellung des WAM-Szenarios erläutert. Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts ein weiteres „Optionales Szenario“ erstellt. Dieses enthält neben den Maßnahmen des WAM-Szenarios zusätzliche Maßnahmen, welche herangezogen werden können, falls zusätzliche Emissionsminderungen notwendig werden.

3.3.1 WAM-Szenario⁶

Im Rahmen eines Abstimmungsprozesses mit dem UBA und dem BMUV wurde beschlossen, dass die folgenden Maßnahmen/-bündel in das WAM-Szenario aufzunehmen sind:

- ▶ Einführung Euro 7
- ▶ Förderung Elektromobilität
- ▶ Anpassung Lkw-Maut

Von den drei betrachteten Maßnahmen ist insbesondere der Straßenverkehr betroffen. Da die Maßnahme „Anpassung Lkw-Maut“ aber auch zu Verlagerungen auf die Schiene und Binnenschifffahrt führt (vgl. Abschnitt 3.2.4), sind auch hier Änderungen zu erwarten. Durch die Verlagerungen kommt es bei der Bahn und der Binnenschifffahrt zu einer proportionalen Erhöhung der Aktivitätsraten (Energieverbräuche). Die Emissionsfaktoren bleiben konstant, sodass auch sämtliche Schadstoffemissionen proportional steigen. Der Flugverkehr ist von keiner der berücksichtigten Maßnahmen betroffen, wodurch es keine Änderung gegenüber dem WM-Szenario gibt.

Beim Straßenverkehr ändert sich durch die Anpassung der Lkw-Maut geringfügig die gesamte Verkehrsleistung und somit auch die Fahrleistung (die Auslastung der Fahrzeuge wird als konstant angenommen). Im ersten Schritt wird die Verkehrs- und Fahrleistung aller SNF einheitlich prozentual reduziert. Durch die Maßnahme kommt es zudem zu Verlagerungen von Lkw von 3,5-7,5 t auf Lkw >7,5 t und LNF, die im zweiten Schritt berücksichtigt werden. Der Einfluss auf die Antriebstechnologie durch die Lkw-Maut wird nicht berücksichtigt, da die Einflüsse der Maßnahme „Förderung Elektromobilität“ diese deutlich übersteigen und nicht additiv sind. Die Lkw-Maut stellt vielmehr einen der Bausteine der Maßnahme „Förderung Elektromobilität“ dar.

Im Anschluss erfolgt die Berücksichtigung der Maßnahme „Förderung Elektromobilität“. Hier werden in den Berechnungen die Neuzulassungszahlen analog zu den Angaben aus Abschnitt 3.2.3 angepasst. Über das in TREMOD implementierte Flottenmodell kann aus den Neuzulassungen der Bestand und hieraus wiederum die Fahrleistung von elektrischen

⁶ Das hier vorliegende WAM-Szenario dient als eine Arbeitsgrundlage des UBA für die Erstellung des Entwurfs des nationalen Luftreinhalteprogramms. Es kann sich vom WAM-Szenario im Entwurf des Bundesumweltministeriums (BMUV) sowie des nationalen Luftreinhalteprogramms der Bundesregierung unterscheiden.

Fahrzeugen berechnet werden. Die höheren Bestände an Elektrofahrzeugen bewirken einen prozentualen Anstieg der elektrischen Fahrleistung an der Gesamtfahrleistung. Des Weiteren verringert sich die Fahrleistung von Lkw geringfügig durch die Anpassung der Lkw-Maut. Rechnerisch werden beide Aspekte miteinander verrechnet indem die (höheren) prozentualen Anteile der elektrischen Fahrleistung mit der (verringerten) Gesamtfahrleistung multipliziert werden.

Abschließend wird die Maßnahme „Einführung Euro 7“ mit den anderen beiden Maßnahmen kombiniert. Im WM-Szenario entsprechen alle Fahrzeugneuzulassungen in den Szenarienjahren (nach 2020) der neusten Abgasnorm (z. B. bei Pkw Euro 6-d, bei Lkw Euro VI E). Durch die Einführung von Euro 7 werden alle Fahrzeugneuzulassungen ab einschließlich dem Zulassungsjahr 2027, die nicht durch elektrische Fahrzeuge ersetzt werden, durch Fahrzeuge mit Euro 7 ersetzt. Tabelle 30 stellt exemplarisch die Fahrleistungen pro Antriebstechnologie für Pkw und SNF aus dem WAM-Szenario dem WM-Szenario gegenüber. Unter Berücksichtigung der deutlich geringeren Schadstoffemissionen von Euro 7-Fahrzeugen und der gegebenen Fahrleistungen ergeben sich die in Kapitel 4 dargestellten Emissionsmengen.

Tabelle 30: Fahrleistungen nach Antriebstechnologie und Abgasnorm

	2025	2030	2035	2040
WM-Szenario				
Pkw – elektrisch	38,1 Mrd. km	96,5 Mrd. km	170,8 Mrd. km	254,7 Mrd. km
Pkw – Euro 7	-	-	-	-
Pkw – vor Euro 7	620,0 Mrd. km	592,4 Mrd. km	517,2 Mrd. km	435,1 Mrd. km
SNF – elektrisch	0,7 Mrd. km	2,1 Mrd. km	3,7 Mrd. km	5,4 Mrd. km
SNF – Euro 7	-	-	-	-
SNF – vor Euro 7	60,7 Mrd. km	60,9 Mrd. km	61,3 Mrd. km	61,5 Mrd. km
WAM-Szenario				
Pkw – elektrisch	58,5 Mrd. km	208,0 Mrd. km	342,7 Mrd. km	446,8 Mrd. km
Pkw – Euro 7	-	67,0 Mrd. km	111,9 Mrd. km	128,3 Mrd. km
Pkw – vor Euro 7	599,7 Mrd. km	413,9 Mrd. km	233,4 Mrd. km	114,7 Mrd. km
SNF – elektrisch	1,1 Mrd. km	6,8 Mrd. km	21,8 Mrd. km	38,4 Mrd. km
SNF – Euro 7	-	24,8 Mrd. km	27,5 Mrd. km	17,7 Mrd. km
SNF – vor Euro 7	60,2 Mrd. km	31,2 Mrd. km	15,3 Mrd. km	10,5 Mrd. km

Anmerkung: Zu „elektrisch“ werden auch die elektrischen Fahrleistungen von PHEV hinzugezählt, wogegen bei „Euro 7“ und „vor Euro 7“ nur die Fahrleistung im Verbrennermodus eingeht.

3.3.2 Optionales Szenario

Das optionale Szenario soll ein realistisches Szenario für zusätzliche Minderungspotenziale aufzeigen. Es baut auf dem WAM-Szenario auf und enthält, mit Ausnahme der Pkw-Maut (deren Umsetzung zumindest bis 2030 unrealistisch erscheint), alle weiteren betrachteten Maßnahmen. Das Tempolimit wurde in der Variante einer allgemeinen Geschwindigkeitsbeschränkung von max. 130 km/h auf Autobahnen und von max. 80 km/h auf

sonstigen Außerortsstraßen berücksichtigt.⁷ Von den Maßnahmen zur Stärkung des Umweltverbunds wurde die stärkere Ausprägung, also inklusive der Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs und zum Parkraummanagement, für das optionale Szenario ausgewählt.

Das optionale Szenario enthält damit Maßnahmen, deren Wirkungsermittlung durch eine Änderung der Flottenzusammensetzung (z. B. Euro 7 und Elektromobilität), durch eine Änderung der Emissionsfaktoren (z. B. Tempolimits) oder durch die Änderung der Aktivitätsraten (z. B. die Förderung des Umweltverbunds) modelliert wird. Viele Maßnahmen wirken daher nicht unabhängig voneinander: Wenn z. B. die Emissionen im Straßenverkehr durch einen höheren Anteil an Euro 7- oder Elektrofahrzeugen bereits reduziert sind, bewirken Fahrleistungsminderungen geringere Emissionsminderungen als im WM-Szenario. In diesem Fall müssen die Wirkungen im Einzelnen betrachtet und in geeigneter Weise kombiniert werden: Zum Beispiel führt die Abschaffung der Entfernungspauschale zu einer Fahrleistungsminderung, die sich auf Arbeitswege bezieht. Dadurch verringert sich auch der Anteil der Dienstwagen-Fahrleistung an der Gesamtfahrleistung der Pkw. Bei der Maßnahme „Umgestaltung der Dienstwagenbesteuerung“ geht dieser Anteil als Parameter ein. Bei der kombinierten Wirkung der Maßnahmen „Abschaffung der Entfernungspauschale“ und „Umgestaltung Dienstwagenbesteuerung“ im optionalen Szenario wurde dies berücksichtigt.

⁷ Da für Euro 7 noch keine Daten bzgl. der Wirkungen von Tempolimits vorliegen können, werden hier die relativen Änderungen von Euro 6-Fahrzeugen übernommen.

4 Vermeidungspotenziale Gesamtübersicht

Im Folgenden werden die Minderungspotenziale der Einzelmaßnahmen sowie der beiden Szenarien „WAM-Szenario“⁸ und „Optionales Szenario“ tabellarisch dargestellt. In den Tabellen sind neben den Minderungen im Jahr 2030 auch die zu erwartenden Minderungen der Jahre 2025, 2035 und 2040 angegeben. Die Minderungen berechnen sich aus der Differenz der Einzelmaßnahme, des WAM-Szenarios bzw. Optionalen Szenarios zum WM-Szenario. Da die Wirkungen der Einzelmaßnahmen sich teilweise kannibalisieren, ist die Minderung des WAM- und des Optionalen Szenarios geringer als die Summe der Einzelmaßnahmen (vgl. Tabelle 31 bis Tabelle 35).

Unter den Einzelmaßnahmen haben insbesondere die für das WAM-Szenario ausgewählten Maßnahmen „Einführung Euro 7“ und „Förderung Elektromobilität“ bei allen Schadstoffen die mit Abstand höchsten Minderungen. Auch die Maßnahmen „Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds“, „Elektrifizierung Schienenverkehr“ sowie die ökonomischen Instrumente „Pkw-Maut“, „Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel“, „Abschaffung der Entfernungspauschale“ und „Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen“ führen zu nennenswerten Minderungspotenzialen bis 2030.

Im WAM-Szenario ergeben sich Emissionseinsparungen aus der zusätzlichen Umsetzung der drei Maßnahmen gegenüber dem WM-Szenario. Die Anpassung der Lkw-Maut führt u. a. zu einer leichten Reduktion der Fahrleistung beim Straßengüterverkehr. Die Förderung der Elektromobilität führt zur Vermeidung verbrennungsmotorischer Emissionen im Straßenverkehr. Die Einführung der Abgasnorm Euro 7 führt wiederum dazu, dass die „verbleibenden“ Neufahrzeuge mit Verbrennungsmotor geringere Schadstoffemissionen verursachen. Die beiden zuletzt genannten Maßnahmen reduzieren daher nicht den Verkehr, sondern führen lediglich zu durchschnittlich geringeren Emissionen pro gefahrenem Kilometer. Sie verursachen dennoch die größten Schadstoffminderungen im WAM-Szenario. Insgesamt führt das WAM-Szenario sowohl mittel- als auch langfristig zu deutlichen Emissionsminderungen, z. B. bei NO_x im Jahr 2030 um ca. 19 kt (13 %) und im Jahr 2040 um ca. 34 kt (45 %) gegenüber dem WM-Szenario.

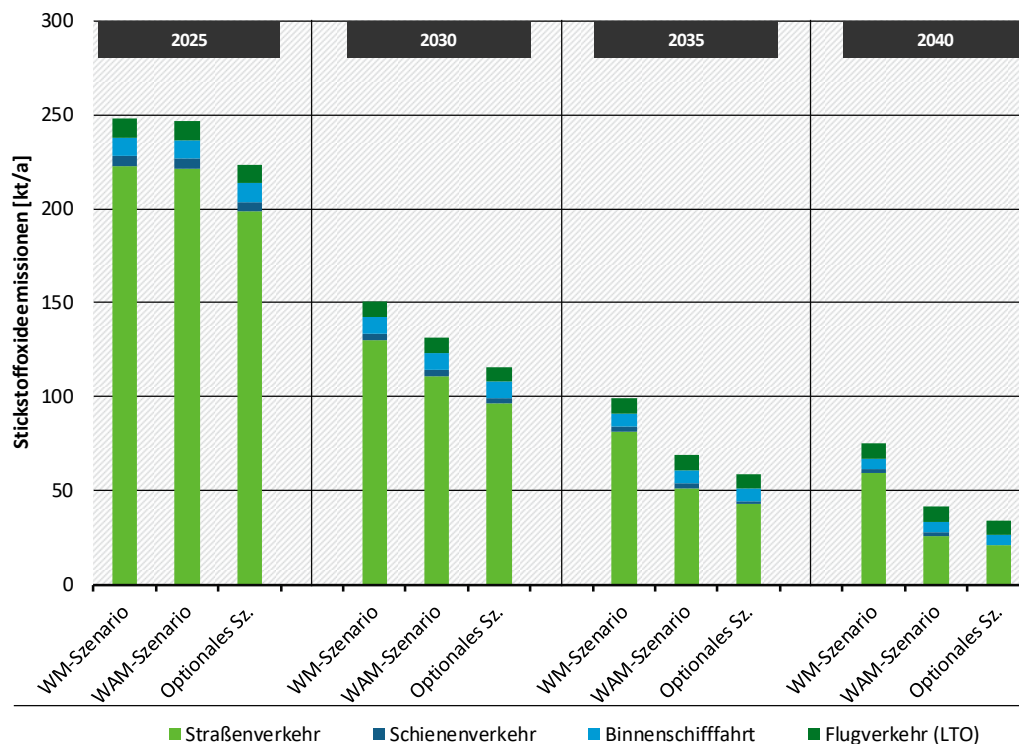
Beim Optionalen Szenario werden alle analysierten Maßnahmen außer der Pkw-Maut im Verbund betrachtet. Auch hier bestehen gegenseitige Wechselwirkungen analog zu den beschriebenen Wirkungen im WAM-Szenario. Insgesamt fallen die Minderungspotenziale gegenüber dem WM-Szenario erwartungsgemäß deutlich höher aus. Je nach Schadstoff sind die Minderungen um 25 % bis 85 % höher als im WAM-Szenario.

Die folgenden Abbildungen stellen die gesamten Emissionen des Verkehrs für beide Szenarien dar. Zusätzlich ist der Zahlenwert des Jahres 2005 angegeben. Die Emissionen des Jahres 2005 sind die Referenzwerte, für die die in Abschnitt 1 genannten Minderungsziele gelten. Zu beachten ist jedoch, dass die Minderungsziele sektorenübergreifend definiert sind und keine absoluten Zielwerte für den Verkehr definiert sind.

⁸ Das hier vorliegende WAM-Szenario dient als eine Arbeitsgrundlage des UBA für die Erstellung des Entwurfs des nationalen Luftreinhalteprogramms. Es kann sich vom WAM-Szenario im Entwurf des Bundesumweltministeriums (BMUV) sowie des nationalen Luftreinhalteprogramms der Bundesregierung unterscheiden.

Abbildung 16: Absolute NO_x-Emissionen des Verkehrs in den Szenarien

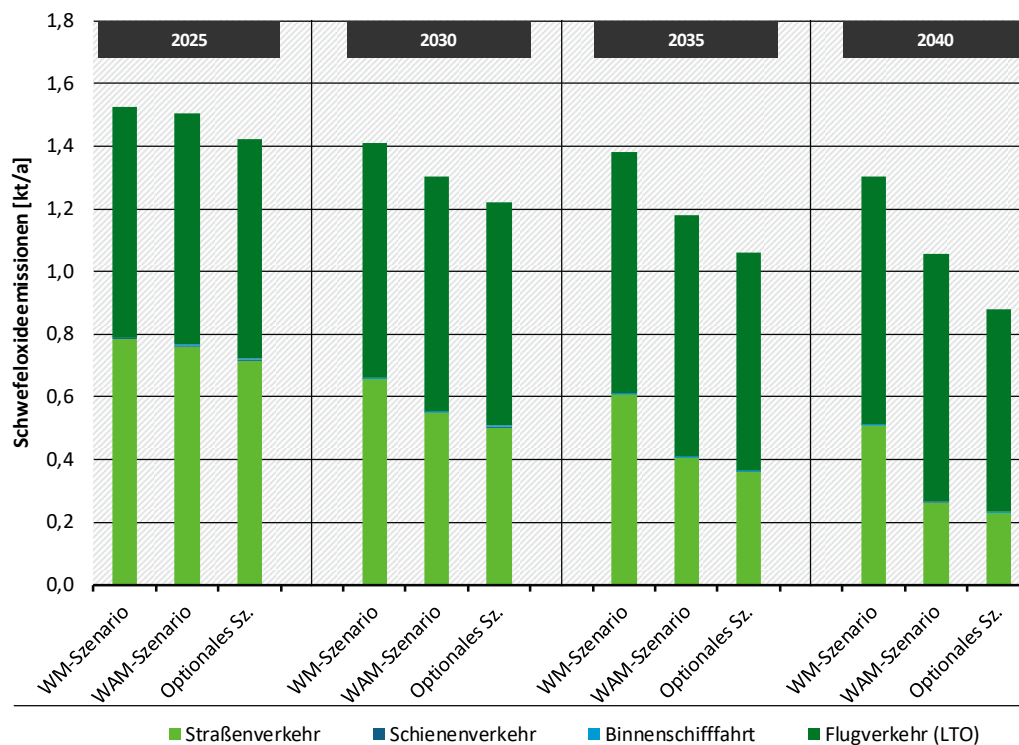
Stickstoffoxidemissionen des Verkehrs (Referenzwert 2005: 828 kt)



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 17: Absolute SO₂-Emissionen des Verkehrs in den Szenarien

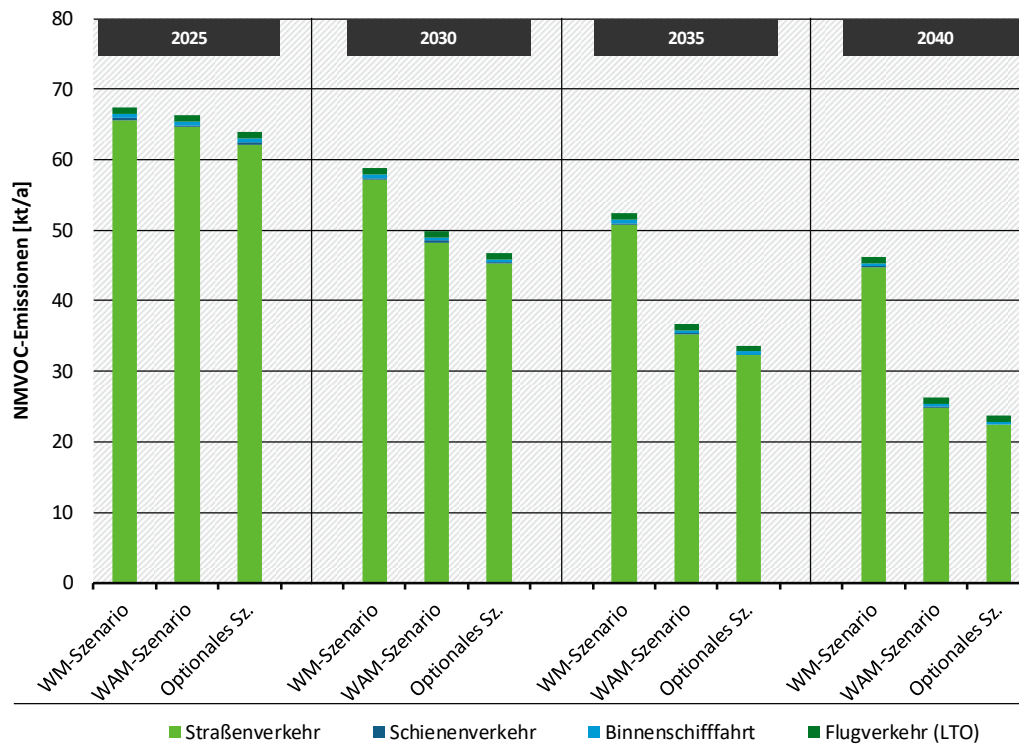
Schwefeloxidemissionen des Verkehrs (Referenzwert 2005: 2,2 kt)



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 18: Absolute NMVOC-Emissionen des Verkehrs in den Szenarien

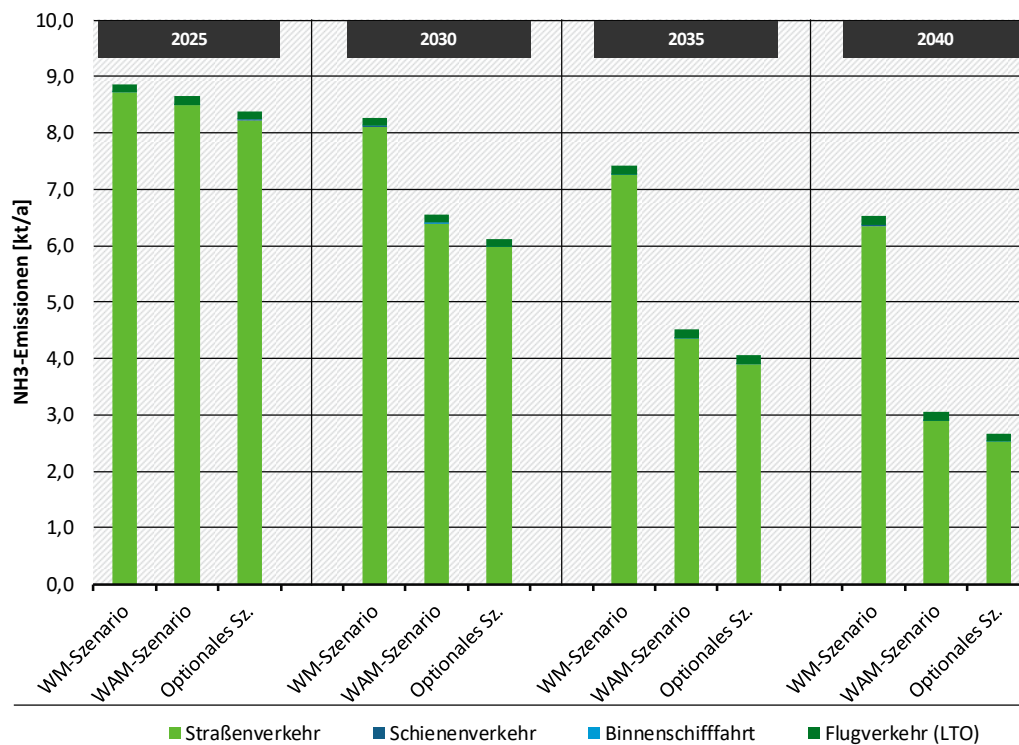
NMVOC-Emissionen des Verkehrs (Referenzwert 2005: 209 kt)



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 19: Absolute NH₃-Emissionen des Verkehrs in den Szenarien

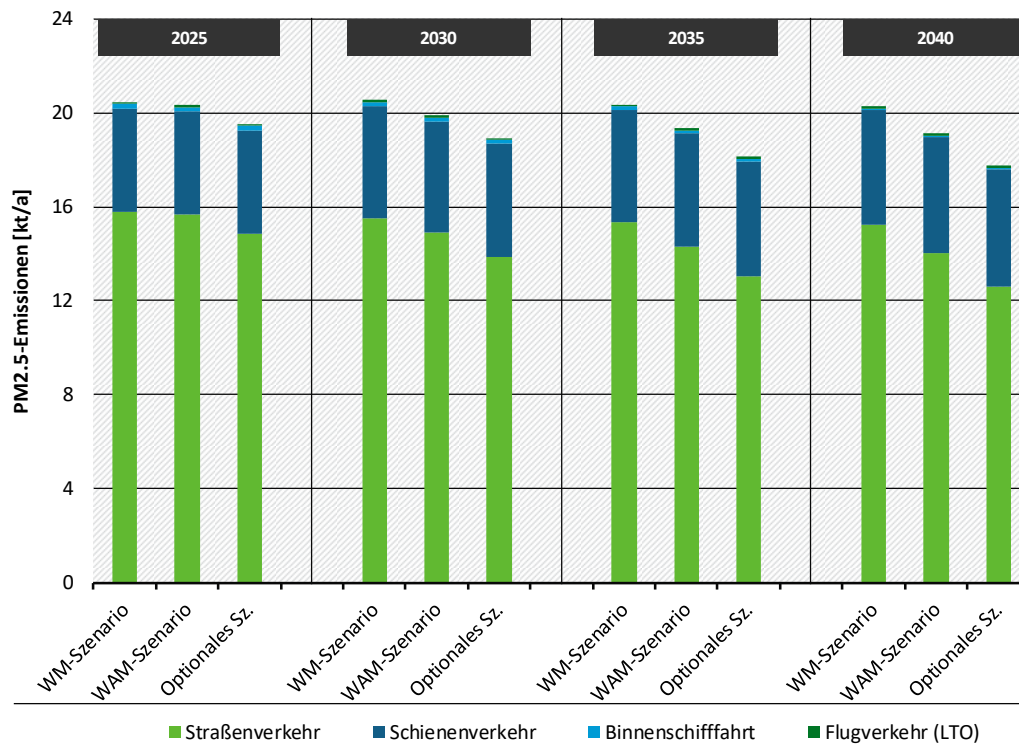
Ammoniakemissionen des Verkehrs (Referenzwert 2005: 26,2 kt)



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 20: Absolute PM_{2.5}-Emissionen des Verkehrs in den Szenarien

PM_{2.5}-Emissionen des Verkehrs (Referenzwert 2005: 31,2 kt)



Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkung: Inklusive Abriebemissionen.

Tabelle 31: NO_x-Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel

Minderung NO _x in kt/a	2025	2030	2035	2040
Einführung Euro 7	-	13,72	22,17	23,90
Tempolimit BAB120 + AO80	13,96	7,78	4,73	3,51
Binnenschifffahrt	0,02	0,05	0,05	0,05
Elektromobilität	1,52	9,04	18,01	24,94
Anpassung Lkw-Maut	0,05	0,07	0,08	0,10
City-Logistik	0,66	0,77	0,79	0,84
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 1	0,79	1,06	1,03	0,97
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 2	1,61	2,09	1,99	1,84
Pkw-Maut bundesweit	-	4,65	5,15	4,96
Pkw-Maut auf BAB	-	1,78	1,96	1,96
Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel	6,00	3,03	1,38	0,70
Abschaffung Entfernungspauschale	0,69	1,55	1,93	1,59
Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen	0,83	1,63	1,42	1,24
Erhöhung der Luftverkehrssteuer	0,43	0,32	0,32	0,33
Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt	0,04	0,06	0,38	0,65
Elektrifizierung Schienenverkehr	-	1,08	1,65	1,83
Stärkung SPfV	-	0,11	0,09	0,08
WAM-Szenario	1,59	18,91	29,83	33,76
Optionales Szenario	24,90	34,46	39,99	41,26

Tabelle 32: SO₂-Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel

Minderung SO ₂ in kt/a	2025	2030	2035	2040
Einführung Euro 7	-	-	-	-
Tempolimit BAB120 + AO80	0,020	0,017	0,016	0,013
Binnenschifffahrt	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Elektromobilität	0,022	0,108	0,201	0,001
Lkw-Maut	<0,001	<0,001	0,001	0,001
City-Logistik	0,002	0,003	0,004	0,005
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 1	0,004	1,060	1,032	0,972
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 2	0,007	0,012	0,015	0,015
Pkw-Maut bundesweit	-	0,027	0,047	0,055
Pkw-Maut auf BAB	-	0,009	0,016	0,020
Kraftstoffsteuer	0,013	0,010	0,009	0,006
Abschaffung Entfernungspauschale	0,003	0,009	0,017	0,018
Umgestaltung Besteuerung Dienstwagen	0,003	0,009	0,013	0,014
Erhöhung der Luftverkehrssteuer	0,031	0,031	0,031	0,032
Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt	0,014	0,027	0,173	0,295
Elektrifizierung Schienenverkehr	-	0,001	0,001	0,002
Stärkung SPFV	-	0,001	0,001	0,001
WAM-Szenario	0,023	0,108	0,201	0,245
Optionales Szenario	0,104	0,191	0,321	0,425

Tabelle 33: NMVOC-Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel

Minderung NMVOC in kt/a	2025	2030	2035	2040
Einführung Euro 7	-	2,46	4,24	4,99
Tempolimit BAB120 + AO80	0,45	0,18	0,09	0,05
Binnenschifffahrt	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Elektromobilität	1,04	6,05	10,96	14,49
Lkw-Maut	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
City-Logistik	0,04	0,06	0,09	0,12
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 1	0,90	1,51	1,90	2,13
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 2	1,55	2,62	3,28	3,69
Pkw-Maut bundesweit	-	1,46	2,39	2,97
Pkw-Maut auf BAB	-	0,05	0,07	0,09
Kraftstoffsteuer	0,10	0,06	0,04	0,03
Abschaffung Entfernungspauschale	0,15	0,49	0,90	0,95
Umgestaltung Besteuerung Dienstwagen	0,18	0,51	0,66	0,74
Erhöhung der Luftverkehrssteuer	0,04	0,04	0,04	0,04
Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt	-	-	-	-
Elektrifizierung Schienenverkehr	-	0,09	0,15	0,21
Stärkung SPFV	-	0,06	0,08	0,09
WAM-Szenario	1,05	8,86	15,63	19,94
Optionales Szenario	3,50	12,02	18,72	22,56

Tabelle 34: NH₃-Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel

Minderung NH ₃ in kt/a	2025	2030	2035	2040
Einführung Euro 7	-	0,62	1,17	1,46
Tempolimit BAB120 + AO80	0,04	0,03	0,03	0,02
Binnenschifffahrt	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Elektromobilität	0,22	1,25	2,13	2,63
Lkw-Maut	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
City-Logistik	0,01	0,01	0,02	0,02
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 1	0,04	0,08	0,11	0,13
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 2	0,08	0,15	0,20	0,22
Pkw-Maut bundesweit	-	0,42	0,74	0,95
Pkw-Maut auf BAB	-	0,16	0,28	0,36
Kraftstoffsteuer	0,07	0,08	0,07	0,05
Abschaffung Entfernungspauschale	0,04	0,14	0,28	0,30
Umgestaltung Besteuerung Dienstwagen	0,05	0,15	0,20	0,24
Erhöhung der Luftverkehrssteuer	0,01	0,01	0,01	0,01
Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt	-	-	-	-
Elektrifizierung Schienenverkehr	-	<0,01	<0,01	<0,01
Stärkung SPfV	-	0,01	0,01	0,02
WAM-Szenario	0,22	1,72	2,89	3,46
Optionales Szenario	0,50	2,15	3,36	3,85

Tabelle 35: PM_{2,5}-Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel

Minderung PM _{2,5} in kt/a	2025	2030	2035	2040
Einführung Euro 7	-	0,23	0,39	0,40
Tempolimit BAB120 + AO80*	0,38	0,46	0,49	0,46
Binnenschifffahrt	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Elektromobilität	0,12	0,54	0,87	1,05
Lkw-Maut	<0,01	0,01	0,01	0,01
City-Logistik	0,04	0,07	0,10	0,13
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 1	0,08	0,15	0,22	0,28
Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds 2	0,14	0,28	0,39	0,51
Pkw-Maut bundesweit	-	0,51	0,97	1,40
Pkw-Maut auf BAB	-	0,15	0,29	0,43
Kraftstoffsteuer	0,21	0,17	0,13	0,11
Abschaffung Entfernungspauschale	0,04	0,17	0,34	0,48
Umgestaltung Besteuerung Dienstwagen	0,05	0,18	0,28	0,38
Erhöhung der Luftverkehrssteuer	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fördermittel strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe für die Luftfahrt	-	-	-	-
Elektrifizierung Schienenverkehr	-	0,01	0,01	0,01
Stärkung SPFV	-	-0,08	-0,12	-0,16
WAM-Szenario	0,12	0,64	1,02	1,15
Optionales Szenario	0,93	1,61	2,22	2,53

Anmerkung: Inklusive Abriebemissionen. Negative Zahlenwerte bedeuten eine Erhöhung der Emissionen. *Änderungen des Abriebs aufgrund der Geschwindigkeitsänderung werden nicht berücksichtigt.

5 Fazit

Die bereits beschlossenen Maßnahmen, die im WM-Szenario berücksichtigt sind, tragen zu großen Reduktionen der Schadstoffemissionen des Verkehrs gegenüber 2005 bei. Diese führen trotz der steigenden Verkehrsmengen auch zukünftig zu Emissionsminderungen.

Nichtsdestoweniger ist es für die Einhaltung der NEC-Richtlinie und der Luftqualitätsrichtlinie erforderlich, die Emissionen darüber hinaus zu senken. Hierfür wurden Maßnahmen analysiert, die nicht vom WM-Szenario abgedeckt und von der Politik weiter zu forcieren und umzusetzen sind.

Zwei Maßnahmen weisen besonders hohe Minderungspotenziale auf. Die Einführung einer Abgasnorm Euro 7 ab dem Jahr 2027 kann bereits im Jahr 2030 z. B. NO_x-Minderungen von knapp 14 kt/a erreichen. Die Förderung der Elektromobilität weist ebenfalls große Potenziale auf, da verbrennungsbedingte Emissionen im Betrieb gänzlich vermieden werden. Im Jahr 2030 können so ca. 9 kt NO_x vermieden werden. Nach 2030 steigt das Potenzial zur Minderung (abgesehen von den Partikelemissionen) merklich. Perspektivisch könnten direkte verbrennungsbedingte Emissionen komplett vermieden werden. Dies tritt jedoch aufgrund der erforderlichen Flottenumschichtung (z. B. beträgt das mittlere Alter von Pkw im Bestand ca. 10 Jahre) zeitverzögert ein.

Ein Augenmerk sollte auf den Partikelemissionen aus dem Abrieb liegen, da diese zukünftig den überwiegenden Anteil an den gesamten Partikelemissionen des Verkehrs ausmachen. Nach aktuellem Kenntnisstand würde die Elektromobilität die Partikelemissionen aus dem Abrieb ohne weitere Maßnahmen nicht signifikant ändern können. Inwiefern dieser beispielsweise im Rahmen der Euro 7-Gesetzgebung aufgegriffen wird, war zum Zeitpunkt des Projekts noch nicht geklärt. Daher wurden spezifische Maßnahmen zur Senkung der Abriebemissionen im Rahmen des Projekts nicht untersucht. Es ist jedoch möglich, dass solche Maßnahmen in den nächsten Jahren dennoch eingeführt werden. So wird aktuell die Integration der Abriebemissionen in die Euro 7-Gesetzgebung diskutiert.

Weitere Maßnahmen mit einem nennenswerten Minderungspotenzial sind „Stärkung und Ausbau des Umweltverbunds“, „Elektrifizierung Schienenverkehr“ sowie die ökonomischen Instrumente „Pkw-Maut“, „Angleichung der Steuersätze auf Benzin und Diesel“, „Abschaffung der Entfernungspauschale“ und „Besteuerung von Firmen- und Dienstwagen“.

Im Rahmen des Projekts wurden drei Maßnahmen ausgewählt, die im Verbund miteinander zu analysieren und im WAM-Szenario⁹ zusammenzufassen waren. Diese sind von der Politik prioritär umzusetzen, um die Emissionsreduktionsverpflichtungen der NEC-Richtlinie einhalten zu können. Diese drei Maßnahmen sind: „Einführung Euro 7“, „Förderung Elektromobilität“ und „Anpassung Lkw-Maut“. Insbesondere die beiden erstgenannten Maßnahmen weisen hohe Potenziale auf. Zudem sind bereits eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen¹⁰ im Bereich der Elektromobilität angelaufen und wären, um die angenommenen Steigerungen der Anteile zu erreichen, weiter auszuweiten und zu verlängern. Vor allem die CO₂-Flottengrenzwerte können zu einer Ausweitung der Elektromobilität beitragen. Auch die Euro 7-Abgasnorm ist zurzeit im Bearbeitungsprozess (Europäische Kommission, 2022). Ebenso soll die Anpassung der Lkw-Maut in Form der Ausweitung auf Lkw von 3,5-7,5 t und eines CO₂-Aufschlags im Jahr 2023 erfolgen (Bundesregierung, 2022c). Der CO₂-Aufschlag kann einen Baustein der Förderung der Elektromobilität im Güterverkehr darstellen. Verglichen mit den beiden anderen Maßnahmen ist

⁹ Das hier vorliegende WAM-Szenario dient als eine Arbeitsgrundlage des UBA für die Erstellung des Entwurfs des nationalen Luftreinhalteprogramms. Es kann sich vom WAM-Szenario im Entwurf des Bundesumweltministeriums (BMUV) sowie des nationalen Luftreinhalteprogramms der Bundesregierung unterscheiden.

¹⁰ Zum Beispiel: Förderprogramm für klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur (KsNI), Umweltbonus etc.

der Effekt der Anpassung der Lkw-Maut jedoch vernachlässigbar, da hier von keiner Doppelbesteuerung und somit auch von keinen nennenswerten Mehrkosten für den Transport ausgegangen wird. Tabelle 36 fasst die Minderungspotenziale des WAM-Szenarios bis 2030 zusammen. Aufgrund des Kannibalisierungseffekts erzielt der Verbund der Maßnahmen des WAM-Szenarios deutlich geringere Minderungen als die Summe aller Einzelmaßnahmen. Dies betrifft insbesondere die Euro 7-Abgasnorm, da bei gleichzeitiger Förderung der Elektromobilität viele „potenzielle“ Euro 7-Fahrzeuge durch elektrische Fahrzeuge ersetzt werden.

Tabelle 36: Minderungspotenziale des WAM-Szenarios

Schadstoff	2025	2030	2035	2040
NO _x	1,59 kt	18,91 kt	29,83 kt	33,76 kt
SO ₂	0,023 kt	0,108 kt	0,201 kt	0,245 kt
NMVOG	1,05 kt	8,86 kt	15,63 kt	19,94 kt
NH ₃	0,22 kt	1,72 kt	2,89 kt	3,46 kt
PM _{2.5} *	0,12 kt	0,64 kt	1,02 kt	1,15 kt

Anmerkung: *Inklusive Abrieb.

Zusätzlich zum WAM-Szenario wurde das „Optionale Szenario“ erstellt, das alle Maßnahmen außer der Pkw-Maut im Verbund enthält. Hier sind weitere Minderungen erreichbar, die je nach Schadstoff um 25 % bis 85 % höher ausfallen als im WAM-Szenario.

Folgende Punkte sind kritisch anzumerken:

Zu nennen sind zunächst die Unsicherheiten der Resultate. In die Berechnung der Minderungspotenziale gehen viele Annahmen, Modell- und Statistikwerte ein. Jedoch bestehen bei sämtlichen Eingangsgrößen der Modellierung Unsicherheiten, z. B. bei der Preiselastizität, die häufig genutzt wird, um Verkehrsvermeidungen aufgrund von Kostensteigerungen abzuleiten. In der Literatur existieren diesbezüglich große Bandbreiten. Aber auch die unterstellten Minderungen der Grenzwerte durch die Einführung der Abgasnorm Euro 7 sind aktuell noch nicht beschlossen und können durchaus auch weniger ambitioniert ausfallen. Bei der Elektromobilität werden in der Modellierung analog zu den Plänen der Verschärfung der CO₂-Flottengrenzwerte hin zu einem „Verbrennerverbot“ im Jahr 2035 bei Pkw und LNF nur noch PHEV und BEV zugelassen. Jedoch könnte weiterhin ein „Hintertürchen“ bestehen, das es erlaubt, Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zum Betrieb mit synthetischen oder biogenen Kraftstoffen neu zuzulassen. Da die Minderungen von Schadstoffen durch den Einsatz von PtL und fortschrittlichen Biokraftstoffen (vgl. Abschnitt 3.2.8) nicht umfassend nachgewiesen sind bzw. diese zu keiner vollständigen Vermeidung führen werden, könnten die berechneten Minderungspotenziale auch niedriger ausfallen.

Ein generelles Problem betrifft die Trennung der Szenarien. Einige betrachtete Maßnahmen sind bereits zum Teil umgesetzt und werden daher im WM-Szenario teilweise berücksichtigt. Dagegen ist es auch möglich, dass einige Maßnahmen zwar bereits beschlossen sind, aber nicht im WM-Szenario enthalten sind, da das Szenario überwiegend auf Annahmen aus dem Jahr 2021 beruht. Es wurde zwar im Rahmen des Projekts überprüft, ob solche Maßnahmen dann noch als Einzelmaßnahme berechnet werden können, aber dass alle Effekte, Maßnahmen und Trends adäquat berücksichtigt werden, kann nicht umfassend gewährleistet werden. Es können hier unter anderem die Energiekrise 2022 aufgrund des Kriegs in der Ukraine oder die Corona-

Pandemie genannt werden, die in keinem der betrachteten Szenarien (umfassend) berücksichtigt wurden. So könnten allgemein höhere Energiepreise, Rezessionen oder auch neue Entwicklungen wie der Trend zum Homeoffice zu einer Senkung der Verkehrsnachfrage führen. Dies ist schwer in Szenarien abzubilden.

Allgemein ist auch die Berechnung der Emissionen großen Unsicherheiten unterworfen, vgl. (Allekotte et al., 2022). Dort werden beispielsweise Unsicherheiten (95 %-Konfidenzintervall) der Emissionsfaktoren von NO_x-Emissionen von Euro 6-d Diesel-Pkw auf Autobahnen in Höhe von 1,5 bis 91,3 kg/TJ (verwendeter Wert: 20,3 kg/TJ) angegeben. Diese spiegeln sich schlussendlich auch in den absoluten Emissionen wider. Dieser Aspekt hat jedoch zumindest auf die relativen Minderungswirkungen keinen großen Effekt. Regelmäßig ergeben sich auch bei den Emissionsfaktoren des HBEFA neue Daten und Erkenntnisse. Das verwendete HBEFA 4.2 berücksichtigt beispielsweise noch nicht alle der für Euro 7 angenommenen Effekte, z. B. zum Kaltstart und Defekten der Abgasnachbehandlung. Zukünftige Emissionsfaktoren können daher bei denselben Szenarien zu anderen Ergebnissen führen. Nichtsdestoweniger ist die Erfassung von Emissionen aus der motorischen Verbrennung über viele Messkampagnen sehr fundiert. Demgegenüber ist der Aspekt von Abriebemissionen, die insbesondere künftig einen Großteil der Partikelemissionen des Verkehrs (ca. 75 % im Jahr 2025) ausmachen werden, noch nicht hinreichend erforscht. Daher unterliegen auch die berechneten Partikelemissionen einer hohen Unsicherheit. Auch wurde beim Straßenverkehr im Projekt vereinfacht angenommen, dass die Abriebemissionen von konventionellen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen identisch sind. Durch Rekuperation könnten die Abriebemissionen der Bremsbeläge jedoch verringert werden, wogegen die Abriebemissionen der Reifen aufgrund des höheren Gewichts steigen könnten.

Vergleicht man die Szenarien mit den Zielen des Klimaschutzgesetzes der Bundesrepublik Deutschland, so zeigt sich, dass selbst im ambitioniertesten Szenario das Ziel im Jahr 2030 bezüglich der Treibhausgase deutlich verfehlt wird. Tabelle 37 zeigt die Treibhausgasemissionen in den Szenarien sowie das durch das Klimaschutzgesetz vorgegebene Ziel. Zwar können durch die Maßnahmen deutliche Reduktionen bei den Schadstoffemissionen erzielt werden, jedoch reichen diese nicht aus, um die Klimaziele zu erreichen. Im WAM-Szenario besteht eine Lücke von ca. 29 Mio. t CO₂-Äquivalenten. Demnach können die Szenarien zumindest bezogen auf die gesamten Umweltwirkungen des Verkehrs als nicht ambitioniert genug erachtet werden.

Tabelle 37: THG-Emissionen im Jahr 2030 in den Szenarios

Szenario	THG-Emissionen	Lücke zu KSG
Ziel nach Klimaschutzgesetz	85 Mio. t CO _{2eq}	-
WM-Szenario	136 Mio. t CO _{2eq}	51 Mio. t CO _{2eq}
WAM-Szenario	114 Mio. t CO _{2eq}	29 Mio. t CO _{2eq}
Optionales Szenario	111 Mio. t CO _{2eq}	26 Mio. t CO _{2eq}

Anmerkung: Summe aus Straßen-, Schienen- und Binnenschiffsverkehr sowie nationalem Flugverkehr. Biogene Kraftstoffe und PtL weisen per Definition keine direkten CO₂-Emissionen auf.

Mit der Umsetzung der drei Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel des WAM-Szenarios kann ein signifikanter Beitrag zum Erreichen der Emissionsreduktionsverpflichtungen für Luftschadstoffe im Rahmen der NEC-Richtlinie geleistet werden. Inwiefern die sektorübergreifenden Reduktionsverpflichtungen eingehalten werden, ist Bestandteil weiterer Analysen des Umweltbundesamtes und konnte daher im Rahmen des Projekts nicht geklärt

werden. Zu beachten ist zudem, dass die Maßnahme „Förderung Elektromobilität“ einen großen Anteil an den berechneten Minderungen aufweist, jedoch entstehen durch die Maßnahme höhere Energiebedarfe im Energiesektor und somit dort je nach Energiemix gegebenenfalls höhere Schadstoffemissionen. Daher können beide Sektoren bezüglich der Gesamtemissionen nicht getrennt voneinander betrachtet werden.

6 Quellenverzeichnis

Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Fehrenbach, H.; Heidt, C.; Knörr, W.; Kräck, J. (2021a): Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOD)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOMM)“ 2021. ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg.

Allekotte, M.; Heidt, C.; Knörr, W.; Kotzagiorgis, S.; Schneider, W. (2021b): Modellintegration des Transport-Visualisierungsmodells (TraViMo) und dem Transport Emission Model (TREMOMM). ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, TTS TRIMODE Transport Solutions GmbH, Heidelberg, Freiburg.

Allekotte, M.; Knörr, W.; Kräck, J.; Notter, B.; Schächli, B.; Soini, M.; Hausberger, S.; Tödling, M.; Schädler, D. (2022): Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden. ifeu, INFRAS, FVT, Heidelberg, Bern, Graz.

BAG (2022): KsNI - Förderung von Nutz- und Sonderfahrzeugen mit klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur - Bundesamt für Güterverkehr. In: *Bundesamt für Güterverkehr*. <https://www.bag.bund.de/DE/Foerderprogramme/KlimaschutzundMobilitaet/KsNI/KsNI.html>. (18.11.2022).

Blanck, R.; Zimmer, W.; Mock, P. (2018): Klimaschutz 2030 im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels. erstellt im Auftrag von Agora Verkehrswende.

Blanck, R.; Zimmer, W.; Mottschall, M.; Göckeler, K.; Keimeyer, F.; Runkel, M.; Kresin, J.; Klinski, S. (2021): Mobilität in die Zukunft steuern: Gerecht, individuell und nachhaltig - Abschlussbericht zum UBA-Vorhaben „Fiskalische Rahmenbedingungen für eine postfossile Mobilität“. TEXTE 85/2021 Öko-Institut, FÖS, HWR Berlin. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/2021-11-18_texte_85-2021_mobilitaet-zukunft-steuern.pdf (24.11.2022).

BMDV (2020): Zielfahrplan Deutschlandtakt - Informationen zum dritten Gutachterentwurf. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Berlin. https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/praesentation-deutschlandtakt.pdf?__blob=publicationFile (24.11.2022).

BMDV (2021a): Mit der Elektrobahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektrobahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html> (18.11.2022).

BMDV (2021b): 181 weitere Schienenprojekte rücken in vordringlichen Bedarf auf. In: *Bundesministerium für Digitales und Verkehr*. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/091-scheuer-weichen-deutschlandtakt-langfristig-gestellt.html?nn=12830>. (18.11.2022).

BMF (2021): EKF-Bericht. Bundesministeriums der Finanzen. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Oeffentliche-Finanzen/10-EKF-Bericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (18.11.2022).

BMF (2022): Verordnung zur Absenkung der Steuersätze im Jahr 2023 nach § 11 Absatz 2 des Luftverkehrsteuergesetzes. Bundesministeriums der Finanzen. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Gesetzestexte/Gesetze_Gesetzesvorhaben/Abteilungen/Abteilung_III/20_Legislaturperiode/2022-10-31-LuftVStAbsenkV2023/1-Verordnungsentwurf.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (18.11.2022).

BMU (2021): Kabinettdentwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote - BMU-Gesetze und Verordnungen. In: *www.bmu.de. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*, <https://www.bmu.de/GE931>. (26.02.2021).

BMVI (2020): Richtlinie über Zuwendungen zur Marktaktivierung alternativer Technologien für die umweltfreundliche Bordstrom- und mobile Landstromversorgung von See- und Binnenschiffen (BordstromTech-Richtlinie). Vom 26. März 2020. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. https://www.bav.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bordstrom/Foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (09.12.2022).

BMVI (2021): Richtlinie zur Förderung der nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen Vom 24. Juni 2021. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. https://www.elwis.de/DE/Service/Foerderprogramme/Nachhaltige-Modernisierung-von-Binnenschiffen/Foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (09.12.2022).

BMWK (2022): Fragen und Antworten zur erhöhten Kaufprämie bei Elektrofahrzeugen. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/Elektromobilitaet/faq-elektromobilitaet.html>. (06.12.2022).

Brützel, C.; Kirchgeßner, S. (2019): Wie viel kostet ein Flug? - Flugblatt STR. In: *Flughafen Stuttgart GmbH*. <https://www.flugblatt-magazin.de/stories/wie-viel-kostet-ein-flug/>. (18.11.2022).

Bundesregierung (2020): Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken Ergebnis Koalitionsausschuss 3. Juni 2020. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-corona-folgen-bekaempfen.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (09.12.2022).

Bundesregierung (2022a): Verbrennermotoren ab 2035 nur im Betrieb CO₂-frei | Bundesregierung. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/verbrennermotoren-2058450>. (18.11.2022).

Bundesregierung (2022b): Volle Ladung Klimaschutz: E-Mobilität und klimaschonender Verkehr. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschonender-verkehr-1790050>. (18.11.2022).

Bundesregierung (2022c): Lkw-Maut soll steigen. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/lkw-maut-steigt-2042262>. (02.12.2022).

EU (2008): RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Europäischer Rat und Parlament. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=de> (24.11.2022).

EU (2016): Richtlinie (EU) 2016/2284 des Europäischen Parlaments und des Rates - vom 14. Dezember 2016 - über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG. S. 31. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L2284&from=DE> (31.10.2022).

EU (2019): RICHTLINIE (EU) 2019/1161 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. Europäischer Rat und Parlament. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019L1161&from=DE> (24.11.2022).

Europäische Kommission (2022): Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_6495. (18.11.2022).

Grimme, W.; Maertens, S. (2022): Hintergrund - Wie teuer Flugtickets werden, wenn sich die Energiekosten verdoppeln - airliners.de. In: *DLR*. <https://www.airliners.de/hintergrund-teuer-flugtickets-energiekosten-verdoppeln/64890>. (18.11.2022).

Hahn, A. (2022): Klimaziele der Bahn: Unterwegs ohne Diesel. In: *Tagesschau.de*. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/deutsche-bahn-siemens-wasserstoff-zug-brennstoffzelle-101.html>. (18.11.2022).

Harthan, R. O.; Repenning, J.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Scheffler, M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Steinbach, J. (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES GmbH.

Hausberger, S.; Weller, K.; Ehrly, M. (2021): HDV Exhaust - Scenarios for HDVs: Scenarios for HDVs Summary Emission Limits and Test Conditions. LAT, emisia, TUG, FEV, TNO, Ricardo, VTT.
https://circabc.europa.eu/sd/a/b706ffba-f863-4d23-809d-20d9f18ecba4/AGVES-2021-04-08-HDV_Exhaust.pdf (24.11.2022).

Hausberger, S.; Weller, K.; Heidt, C. (2022): Abschätzungen möglicher Emissionsfaktoren für Euro 7-Fahrzeuge. Ad-Hoc Analyse im Rahmen des UBA-Projektes „Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen“ (unveröffentlicht). TU Graz, ifeu.

Henning, Prof. Dr. H.-M.; Knopf, Dr. B.; Bettzüge, Prof. Dr. M. O.; Heimer, Prof. Dr. T.; Schlomann, Dr. B. (2021): Bericht zur Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020 | Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes Klimaschutzgesetz.

Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“.

Knörr, W.; Heidt, C.; Schmied, M.; Notter, B. (2013): Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD. <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/IFEU-INFRAS-2013-Aktualisierung-der-Emissionsberechnung-f%C3%BCr-die-Binnenschifffahrt-und-%C3%9Cbertragung-der-Daten-in-TREMOD3.pdf>. (16.12.2020).

Lobo, P.; Hagen, D. E.; Whitefield, P. D. (2011): Comparison of PM Emissions from a Commercial Jet Engine Burning Conventional, Biomass, and Fischer–Tropsch Fuels.

Neiva, R.; Pons, A.; Horton, G.; Lutz, C.; Distelkamp; de Luis Iglesias, R.; Brajterman, O.; van Velzen, A.; Pirlot, A. (2021): Study on the taxation of the air transport sector - Final Report. Ricardo, GWS, Ipsos. <https://taxation-customs.ec.europa.eu/system/files/2021-07/Aviation-Taxation-Report.pdf> (18.11.2022).

Neuling, U.; Schripp, T.; Hauschild, S.; Majer, S. (2019): Use of multiblend JET A-1 in practice. Summary of the results from the model project of the Mobility and Fuel Strategy. TU Hamburg, DLR, Deutsches Biomasseforschungszentrum.

Notter, B.; Hausberger, S.; Allekotte, M.; et al (2022): HBEFA 4.2 Documentation of Updates. Bern.
https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA42_Update_Documentation.pdf (03.02.2022).

Oehlmann, M.; Rubel, C.; Klaas, K.; Nunes-Heinzmann, A.-C.; Schäppi, B.; Peter, M.; Angst, V.; Reutimann, J.; Dilling, O.; Möckel, S.; Wolf, A. (2020): Maßnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung. adelphi, INFRAS, UFZ, Berlin, Zürich, Leipzig. S. 277.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerien IX“)“ Berlin / Karlsruhe.

Opitz, M.; Rosentritt, S.; Schwemmer, M.; Köhler, A.; Allekotte, M.; Dünnebeil, F.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Brauer, C.; Köhler, J.; Bernsmann, A.; Kirsch, D. (2022): Umwelt und Klimaschutz in der Logistik - Potenziale umweltorientierter Logistikkonzepte zur Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs (PULK). Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, Nürnberg, Heidelberg, Karlsruhe, Dortmund.

Petschow, U.; Zimmermann, T.; Distelkamp, M.; Lutz, C. (2008): Wirkungen fiskalischer Steuerungsinstrumente auf Siedlungsstrukturen und Personenverkehr vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsziele der Bundesregierung. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin, Osnabrück. https://www.ioew.de/fileadmin/_migrated/tx_ukioewdb/WfS.pdf (24.11.2022).

PwC (2021): Mobilitätskonzepte für einen nachhaltigen Stadtverkehr 2050: Metaanalyse, Maßnahmen und Strategien - Dritter Zwischenbericht AP 1 - AP 3. PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft im Auftrag des Umweltbundesamts, Düsseldorf.

Repenning, J. (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. S. 369.

Ricardo (2020): Zero Emission HGV Infrastructure Requirements.

Rodt, S.; Georgi, B.; Huckestein, B.; Mönch, L.; Herbener, R.; Jahn, H.; Koppe, K.; Lindmaier, J. (2010): CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland - Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. TEXTE 05/2010 Umweltbundesamt. S. 84. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf> (24.11.2022).

Samaras, Z.; Andersson, J.; Aakko-Saksa, P.; Cuelenaere, R.; Mellios, G.; Balasz, A.; Ehrly, M.; Kontses, A.; Dimaratos, A.; Kontses, D.; Ligterink, N.; Ntziachristos (2021a): Additional technical issues for Euro 7 LDV. LAT, emisia, TUG, FEV, TNO, Ricardo, VTT. S. 48. https://circabc.europa.eu/sd/a/451ffbfb-b095-41bc-a4df-1a15af9f1409/AGVES-2021-04-27-LDV_v7_final.pdf (24.11.2022).

Samaras, Z.; Ehrly, M.; Kontses, A.; Dimaratos, A.; Kontses, D.; Aakko, P.; Ligterink, N.; Andersson, J.; Scarbrough, T.; Ntziachristos, L.; Balasz, A. (2021b): LDV Exhaust - Online AGVES Meeting. LAT, emisia, TUG, FEV, TNO, Ricardo, VTT. S. 56. https://circabc.europa.eu/sd/a/83a09cc8-7f8f-4ca6-9764-0b77da57d4cc/AGVES-2021-04-08-LDV_Exhaust.pdf (24.11.2022).

Santoni, G. W.; Lee, B. H.; Wood, E. C.; Herndon, S. C.; Miake-Lye, R. C.; Wofsy, S. C.; McManus, J. B.; Nelson, D. D.; Zahniser, M. S. (2011): Supporting Information for: Aircraft Emissions of Methane and Nitrous Oxide during the Alternative Aviation Fuel Experiment. Harvard University, School of Engineering and Applied Sciences and Department of Earth and Planetary Sciences, Aerodyne Research, Inc., Center for Aero-Thermodynamics and the Center for Atmospheric and Environmental Chemistry, Now at the University of Massachusetts at Amherst, School of Public Health and Health Sciences. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es200897h> (03.03.2022).

Schwarz, C. (2022): Willkommen auf der Hochrheinbahn - Die Hochrheinbahn. In: DB Netz AG. <https://www.die-hochrheinbahn.com/>. (18.11.2022).

Soone, J.; Claros, E. (2022): Sustainable aviation fuels. S. 2.

SPD; BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN; FDP (2021): Koalitionsvertrag 2021-2025. Sozialdemokratische Partei Deutschlands, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Freie Demokratische Partei, Berlin. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (01.12.2022).

Tagesschau (2022): Bau von Oberleitungsinseln: Bahn will Dieselflotte weiter verkleinern. In: Tagesschau.de. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/deutsche-bahn-dieselflotte-101.html>. (18.11.2022).

Theloke, J.; Kuhn, A.; Kugler, U.; Friedrich, R. (2013): Berechnung von Kosteneffektivitäten im Projekt PAREST, Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

UBA (2021): Klimaschutzinstrumente im Verkehr. Tempolimit auf Autobahnen. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_tempolimit_autobahnen_kliv_0.pdf (06.12.2022).

UBA (2022a): Tempolimit. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/tempolimit>. (18.11.2022).

UBA (2022b): Klimaschutzinstrumente im Verkehr. Tempolimit auf Straßen außerorts.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_tempolimit_ausserorts_kliv.pdf (06.12.2022).

Zimmer, A.; Koch, N. (2017): Fuel consumption dynamics in Europe: Tax reform implications for air pollution and carbon emissions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* Volume 106.

Zschocke, A. (2014): Abschlussbericht_BurnFAIR.pdf. Deutsche Lufthansa.

https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Berichte/Abschlussbericht_BurnFAIR.pdf (18.11.2022).