

Diploma Thesis

The environmental relevance of road and tire wear particles and an analysis of regulatory and constructive measures for a reduction

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Die Umweltrelevanz von Straßen- und Reifenabrieb und Analyse von regulativen und konstruktiven Maßnahmen zur Reduktion

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Lena-Sophie Hainschink

Matr.Nr.: 01327009

unter der Anleitung von

Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Günter Emberger

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/230-1, A-1040 Wien

Wien, im April 2022

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Auswirkung der Elektrifizierung, also der Umstellung der österreichischen Personen- und Lastkraftwagenflotte auf Fahrzeuge mit klimaneutralen Antrieben. Aufgrund der höheren Reifenabriebemissionen pro zurückgelegtem Kilometer von Elektrofahrzeugen kommt es dadurch zu einer kontinuierlichen Zunahme der gesamten Reifenabriebemissionen pro Jahr. Um die Auswirkungen der bis zum Jahr 2040 fortschreitenden Elektrifizierung zu untersuchen, werden die Fahr- und Transportleistung, sowie die sukzessive Umstellung der Fahrzeugflotte prognostiziert. In weiterer Folge werden Prognosen über die zu erwartenden Emissionen des Personen- und Güterverkehrs berechnet. Die Personenfahrleistung wird auf zwei unterschiedliche Varianten berechnet. Variante 1 bezieht sich auf eine mögliche Reduktion der Fahrleistung durch umfassende regulative Maßnahmen. Variante 2 bezieht sich auf den Fall „business as usual“. Dies bedeutet, dass die durchschnittliche Fahrleistung pro Fahrzeug bis zum Jahr 2040 als konstant angenommen wird. Die gesamte Fahrleistung nimmt daher durch den prognostizierten steigenden Motorisierungsgrad bis zum Jahr 2040 zu. Für die Berechnung der Emissionen des Straßengüterverkehrs werden unterschiedliche Szenarien betrachtet. Einerseits bezieht sich die Berechnung der Abgasemissionen auf die Umlagerung der Transportleistung auf den Schienengüterverkehr, andererseits werden die durch die Elektrifizierung der Lkw-Flotte steigenden Reifenabriebemissionen prognostiziert. Durch die Elektrifizierung werden die Abgasemissionen deutlich verringert, je nach Berechnungsvariante steigen allerdings die Nicht-Abgasemissionen. In allen betrachteten Fällen würde eine Reduktion der Fahr- und Transportleistung bzw. eine Verlagerung auf klimaschonendere Verkehrsträger zu einer Reduktion der Abgas- und Nicht-Abgasemissionen führen. Eine Gegenüberstellung der jährlichen Emissionen ohne Elektrifizierung und der Emissionen mit Elektrifizierung bestätigen, dass Nicht-Abgasemissionen ohne Umstellung der Fahrzeugflotte niedriger ausfallen. Bei Abgasemissionen verhält sich dies umgekehrt. Durch die Berechnung der kumulierten Emissionen wird gezeigt, dass aufgrund der kumulierenden Wirkung von Luftschadstoffen und Mikroplastik durch die Elektrifizierung teilweise nur geringe Einsparungen bis 2040 möglich sind. Um das neu geschaffene und weitreichende Problem des Reifenabriebs aufgrund der Elektrifizierung zu bewältigen, bedarf es neuer regulativer und konstruktiver Maßnahmen, die in dieser Arbeit ebenso erläutert werden.

Schlagwörter

Elektrifizierung; Abgasemissionen; Nicht-Abgasemissionen; Reifenabrieb

Abstract

This thesis focuses on the effects of the electrification, namely the continuous switch of the Austrian passenger and truck fleet to vehicles with climate-neutral engines. Since electric vehicles cause higher tire wear particle emissions per kilometre travelled, an increasing number of such vehicles lead to an overall increase of total tire wear emissions. To examine the effects of the ongoing electrification of the passenger and truck fleet until 2040, the passenger and transport mileage as well as the gradual conversion of the vehicle fleet are forecast. Subsequently, the forecasts of the expected emissions from passenger and freight transport are calculated. The passenger mileage is calculated in two different ways. Variant 1 relates to a possible reduction in mileage through comprehensive regulatory measures. Variant 2 relates to “business as usual”. This means that the average mileage per car is considered as constant until the year 2040. The total mileage will increase due to the predicted increase in motorization. Different scenarios are considered to calculate the emissions from road freight transport. On the one hand, the exhaust emissions due to the transfer of the freight performance to rail freight transport are calculated, on the other hand, the increasing tire wear particles due to the electrification of the truck fleet are forecast. Due to the increased electrification exhaust emissions are significantly reduced, non-exhaust emissions increase depending on the calculation variant. In all cases considered a reduction in driving and transport performance or a shift to more climate-friendly means of transport would lead to a reduction in exhaust and non-exhaust emissions. A comparison of the total annual fleet emissions with and without electrification confirms that non-exhaust emissions are lower without the shift towards increased electrification. The opposite is true for exhaust emissions. The calculation of cumulative emissions shows that due to the cumulative effect of air pollutants and microplastics, only a small reduction of exhaust emission is possible by the year 2040. To cope with the new and extensive problem of tire wear due to electrification, new regulatory and constructive measures are required, which are also analysed in this thesis.

Keywords

Electrification; exhaust emissions; non-exhaust emissions; tire wear particles

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Günter Emberger für die Möglichkeit dieses spannende Thema am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Verkehrsplanung, zu bearbeiten und für die äußerst hilfreiche und kompetente Betreuung bedanken.

Des Weiteren danke ich meinen StudienkollegInnen und FreundInnen, die meine Studienzeit durch ihre Freundschaft und den inhaltlichen Austausch unendlich bereichert haben.

Am meisten danke ich meiner Mutter und meinem Freund für ihre bedingungslose Unterstützung in jeder Hinsicht über meine gesamte Studiendauer und ihr großes Vertrauen in mich.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	2
Abstract.....	4
Abkürzungen.....	10
1 Einleitung.....	11
1.1 Problemstellung.....	12
1.2 Forschungsfragen.....	14
1.3 Methodik.....	14
2 Ausgangssituation.....	15
2.1 Ziele des Mobilitätsmasterplans 2030.....	15
2.1.1 Ziele für den Personenverkehr.....	16
2.1.2 Ziele für den Güterverkehr.....	16
2.2 Strommix Österreich.....	17
2.3 Definitionen.....	19
2.3.1 Treibhausgase und Treibhauseffekt.....	19
2.3.2 Abgasemissionen.....	21
2.3.3 Nicht-Abgasemissionen.....	21
2.3.4 Zusammensetzung von Reifen.....	23
2.3.5 Größenordnungen von Partikelemissionen.....	23
2.4 Besetzungs- und Auslastungsgrad.....	24
2.5 Zusammensetzung Reifenabrieb.....	25
2.6 Aktuelle Emissionen in Österreich.....	25
2.6.1 Emissionen exkl. Reifen- und Bremsabrieb und Aufwirbelung - PKW.....	25
2.6.2 Emissionen exkl. Reifen- und Bremsabrieb und Aufwirbelung - Lkw.....	27
2.6.3 Emissionen von Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung - Pkw	28
2.6.4 Emissionen von Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung - Lkw	30

2.6.5	Gegenüberstellung der Pkw-Emissionen nach Antriebsart.....	30
2.6.6	Gegenüberstellung der Emissionen von leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebsart.....	33
3	Folgen von Schadstoffen für Umwelt und Gesundheit.....	34
3.1.1	Die Wirkung einzelner Schadstoffe.....	34
3.1.2	Der Gesamteffekt der Schadstoffe	36
3.1.3	Gesundheitliche Relevanz in Abhängigkeit von der Partikelgröße	36
4	Prognosen.....	37
4.1	Prognosen motorisierter Individualverkehr	37
4.1.1	Prognose des Pkw-Bestandes, des Motorisierungsgrades und der Bevölkerung	39
4.1.2	Prognose der Pkw - Fuhrparkzusammenstellung.....	41
4.1.3	Prognose der Pkw - Fahrleistung.....	43
4.1.4	Vergleich Variante 1 und Variante 2.....	46
4.2	Prognose der Emissionen pro Personenkraftfahrzeug.....	48
4.3	Prognose des Lkw-Fuhrparks.....	48
4.4	Prognose der Güterverkehrsleistung.....	49
4.5	Prognose des österreichischen Strommix.....	49
5	Berechnung der Pkw-bezogenen Emissionen bis 2040.....	50
5.1	Verwendete Berechnungsdaten.....	50
5.1.1	CO ₂ -Emissionen.....	50
5.1.2	NO _x -Emissionen.....	50
5.1.3	Feinstaubemissionen (exkl. Abrieb und Aufwirbelungen).....	50
5.1.4	Reifenabrieb.....	50
5.1.5	PM _{0,1} Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert	51
5.1.6	PM _{1,0} Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert	51
5.1.7	PM _{2,5} Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert	51

5.1.8	PM10 Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert	52
5.2	Ergebnisse	52
5.2.1	Ergebnisse der Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1	52
5.2.2	Ergebnisse der Nicht-Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1	55
5.2.3	Ergebnisse der Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2	58
5.2.4	Ergebnisse der Nicht-Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2	60
5.3	Vergleich der Ergebnisse	62
6	Berechnung der Lkw-bezogenen Emissionen bis 2040	64
6.1	Reduktion der Abgasemissionen durch Umlagerung der Transportleistung	64
6.2	Reduktion der Treibhausgasmissionen durch Elektrifizierung der Lkw-Flotte	66
6.3	Entwicklung des Reifenabriebs durch Elektrifizierung der Lkw-Flotte	69
6.3.1	Gegenüberstellung des Pkw- und Lkw-Reifenabriebs	73
7	Kumulierende Pkw-Emissionen	73
7.1	Effekt der Elektrifizierung	74
7.1.1	Abgasemissionen	76
7.1.2	Nicht-Abgasemissionen	83
7.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	91
8	Grundproblem Reifenabrieb	93
8.1	Reifenabrieb in Kläranlagen	94
8.2	Reifenabrieb in Ozeanen	95
9	Möglichkeiten zur Reduktion	96
9.1	Regulative Maßnahmen	96
9.2	Konstruktive Maßnahmen	99
9.3	Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung	100
10	Schlussfolgerung	101

11	Fazit.....	102
11.1	Zusammenfassung.....	102
11.2	Ausblick.....	103
11.3	Limitationen.....	103
12	Abbildungsverzeichnis.....	104
13	Tabellenverzeichnis.....	107
	Literaturverzeichnis.....	110

Abkürzungen

a	Jahr
B	Benzin
BEV	battery electric vehicle
cap	pro Kopf
CB	carbon black
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalent
D	Diesel
E	Elektro
EAG	Erneuerbare-Ausbau-Gesetz
EW	Einwohner
Fzkm	Fahrzeugkilometer
HDV	heavy duty vehicle
HEV	hybrid electric vehicle
ICEV	Internal combustion engine vehicle
IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISC	In-service conformity test
kWh	Kilowattstunde(n)
LDV	light duty vehicle
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	leichte(s) Nutzfahrzeug(e)
MIV	motorisierter Individualverkehr
NO _x	Stickoxide
NO ₂	Stickstoffdioxid
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
PC	passenger car
PHEV	plug-in hybrid electric vehicles
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PM	particle matter
SNF	schwere(s) Nutzfahrzeug(e)
SZ	Sattelzüge
t	Tonne(n)
Tab.	Tabelle
THG	Treibhausgas(e)
Tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terawattstunde(n)
TWP	tire wear particles
WST	Wasserstoff

1 Einleitung

Der motorisierte Individualverkehr bezogen auf Personenkraftwagen hat in den letzten Jahrzehnten in Österreich um ca. 50% zugenommen. 2018 lag die Fahrleistung bereits bei ungefähr 83 Mrd. Pkm¹. Durch steigende Fahrleistungen nehmen auch sämtliche fahrzeugbezogenen Emissionen zu. Österreich hat sich durch den „Green Deal“ der Europäischen Union² einer nachhaltigen Entwicklung und der Klimaneutralität bis 2050 verschrieben. Die darin enthaltenen Maßnahmen für den Verkehr sehen ein Umdenken vor und haben das Ziel die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 90% zu reduzieren. Dafür soll unter anderem bis zum Jahr 2030 der Bestand emissionsfreier Fahrzeuge auf 30 Mio. steigen³. Mit der „Agenda 2030“ setzt sich Österreich 17 nachhaltige Ziele bis zum Jahr 2030, darunter unter anderem, dass es „Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen“⁴ und „umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen“⁴ muss. Zur Erfüllung des Pariser Klimaabkommens hat das Bundesministerium für Klima den Mobilitätsmasterplan 2030⁵ erstellt, der die Ziele und Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen und Erreichung der Klimaneutralität des Verkehrssektors bis 2040 zusammenfasst. Hier wird betont, dass es ein starkes Bewusstsein für die Klimakrise in der Bevölkerung gibt⁶. Ein wichtiges Ziel im Mobilitätsmasterplan ist die Reduktion der Fahrleistung auf ca. 62 Mrd. Pkm⁷. Doch die Maßnahmen zur Reduktion von Abgasemissionen schaffen wiederum neue Probleme, für die es in Österreich noch wenig Bewusstsein und keine einheitliche Regelung gibt⁸.

¹ Österreichisches Umweltbundesamt und VCÖ, 2019, Mit Auto gefahrene Kilometer sind seit 1990 um 50 Prozent gestiegen

² BMK, 2022, Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025, Entwurf (Namen der Autoren werden vom BMK ergänzt), S. 6

³ Europäische Kommission, 2020, The Transport And Mobility Sector

⁴ Bundeskanzleramt, o.J., Ziele der Agenda 2030

⁵ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030

⁶ BMK, o.J., Mobilitätsmasterplan 2030 – Neuausrichtung des Mobilitätssektors

⁷ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 11

⁸ BMK, 2022, Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025, Entwurf (Namen der Autoren werden vom BMK ergänzt), S. 28

1.1 Problemstellung

Um eine Trendwende des Verkehrssektor als einer der Hauptverursacher von klimawirksamen Gasen zu erreichen, ist eine Dekarbonisierung notwendig⁹.

Der Mobilitätsmasterplan 2030 wird als „Wegmarke Richtung Paris-Abkommen¹⁰“ bezeichnet und enthält Maßnahmen, welche notwendig sind, um die schädlichen verkehrsbedingten Emissionen bis 2030 zu reduzieren, um in weiterer Folge bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen. Diese beziehen sich unter anderem auf den motorisierten Individual- und den Güterverkehr. Bis 2040 soll demnach die gesamte Fahrzeugflotte des MIV in Österreich auf klimaneutrale Kraftfahrzeuge umgestellt¹¹ und die Fahrleistung in Personenkilometern um ca. 25% reduziert werden⁷. Auch der Güterverkehr auf der Straße soll um ca. eine Milliarde Tonnenkilometer reduziert und die Fahrzeugflotte sukzessive durch klimaneutrale Fahrzeuge ersetzt werden. Von der gesamten Transportleistung im Inlandverkehr von ca. 348,5 Mio. Tonnenkilometern werden ca. 84,1% auf nur bis zu 80 km langen Strecken transportiert¹². Aufgrund dieser kurzen Strecken besteht vermutlich besonders hier ein großes Elektrifizierungspotenzial der Lkw-Flotte, wodurch eine effiziente Einsparung an Abgasemissionen erzielt werden könnte.

Neben Abgasemissionen erzeugt der motorisierte Individualverkehr bzw. Straßengüterverkehr auch gesundheitsgefährdende Nicht-Abgasemissionen, sogenannte non-exhaust emissions. Eine PM_{2,5}-Emissionsaussetzung birgt beispielsweise das siebtgrößte Sterblichkeitsrisiko¹³. Je nach Expositionsdauer hat Feinstaub unterschiedliche negative Folgen für die Gesundheit des Menschen. Lange Exposition führt beispielsweise zur Reduktion der Lungenfunktion oder einer Verringerung der Lebenserwartung¹⁴.

Diese Nicht-Abgasemissionen sind Abriebpartikel und deren Aufwirbelungen, die in der Luft schweben oder sich ablagern. Größere Abriebpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von mehr als 10 µm lagern sich am Boden ab und ergeben den massenmäßig größten Teil der Abriebemissionen. Feinere Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 µm verweilen Minuten bis Stunden schwebend in der Luft und können Wege von bis zu 50 km zurücklegen. Deren Masseanteil liegt bei 0,1% bis 10%. Partikel im Nanometerbereich können durch elektrostatische Kräfte vom Boden oder der

⁹ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 8

¹⁰ Ebd. 7

¹¹ Vgl. ebd. 37

¹² STATISTIK AUSTRIA, Güterverkehr – Straßengüterverkehr Österreichischer Unternehmen

¹³ OECD, 2020, Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge, vgl. S. 39

¹⁴ Asbach et al., 2010, Statuspapier Feinstaub, vgl. S. 155

Karosserie aufgefangen werden¹⁵. Die Partikelgröße ist nicht nur für den Transportweg von Abriebpartikeln, sondern auch für gesundheitliche Auswirkungen ausschlaggebend. Unter der Annahme, dass ca. 5-10% des Mikroplastiks in den Ozeanen aus Reifenabrieb besteht¹⁵ (laut Europäischem Parlament liegt der Anteil bei 15% bis 31%¹⁶), birgt Reifenabrieb auch Gefahren für die Umwelt. Von Reifen stammendes Mikroplastik konnte bereits in antarktischen Schnee und Eis nachgewiesen werden. Das darin enthaltene Carbon Black (Industrieruß), zugesetzt für einen besseren UV-Schutz¹⁷, färbt das Eis dunkel. Dadurch wird die Rückstrahlungsfähigkeit verringert und es kommt zu einem beschleunigten Abschmelzen¹⁸.

Die Menge an emittiertem Reifenabrieb und die Größe der Partikel sind von unterschiedlichen Faktoren abhängig, „...such as climate (temperature), composition and structure of the tyre, the road surface, driving speed and style and the nature of the contact (e.g., rolling versus slipping)¹⁹“. Auch die Motorleistung, die Ladung oder die Reifenposition und das Fahrzeuggewicht, werden als begünstigende Faktoren genannt²⁰. BEV 100 und BEV 300 emittieren aufgrund der geringeren Bremsabriebemissionen insgesamt weniger PM10 als ICEVs, die Menge an PM10-Reifenabrieb ist allerdings höher bei Elektrofahrzeugen. Große Reichweiten von Elektrofahrzeugen und ein damit einhergehendes höheres Gesamtgewicht, führen dazu, dass BEV 300 mehr PM2,5 durch Reifen- und Bremsabrieb und Aufwirbelung emittieren als leichtere ICEVs²¹.

Der ADAC hat erstmals einen Reifentest durchgeführt, bei dem der durchschnittliche Reifenabrieb nach Hersteller bzw. von Winter-, Sommer- und Ganzjahresreifen quantifiziert wurde. Hierbei wurde ein durchschnittlicher Reifenabrieb von 120 g/1000 km ermittelt. Laut diesem Reifentest neigen besonders sportliche Sommerreifen zu erhöhten Mengen an Abrieb. Der ermittelte Durchschnitt nach Hersteller liegt zwischen 90 und 134 g Reifenabrieb pro 1000 km²². Ein Hauptverursacher von Reifenabrieb sind Kraftfahrzeuge mit Elektroantrieb, hierbei

¹⁵ Kole et al., 2017, Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment, vgl. S.19

¹⁶ Europäisches Parlament, 2018, Mikroplastik: Ursachen, Auswirkungen und Lösungen

¹⁷ Kole et al., 2017, vgl. S. 2

¹⁸ Deutsches Umweltbundesamt, 2016, Gefährdung der antarktischen Welt

¹⁹ Kole et al., 2017, S. 3

²⁰ Prenner et al., Static modelling of the material flows of micro- and nanoplastic particles caused by the use of vehicle tyres 2021, vgl. S. 1

²¹ Prenner et al., 2021, vgl. S. 4-5

²² ADAC e.V. – Technik, 2021, Sportliche Reifen produzieren sehr viel Abrieb (Studie)

erzeugen Pkw je nach Elektroantrieb zwischen 3,6% und 38,6% und leichte Nutzfahrzeuge je nach Elektroantrieb zwischen 6,0% und 47,9% mehr Reifenabrieb als ICEVs²³.

Die Grenzwerte für Abgasemissionen wurden durch die Abgasnormen seit der Euro 1 vom Jahr 1992 stark herabgesetzt²⁴. Durch die geplante Elektrifizierung der Verkehrsflotte werden zwar die Abgasemissionen verringert, durch den höheren Reifenabrieb von Elektrofahrzeugen²⁰ kann es jedoch zu einem Anstieg der Nicht-Abgasemissionen kommen.

1.2 Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist es, den Effekt der Elektrifizierung hinsichtlich der Abgas- und Nicht-Abgasemissionen in Abhängigkeit von der Verkehrsleistung und dem Fahrzeugbestand in Österreich zu untersuchen, die Stellschrauben zur Reduktion von Emissionen zu definieren und Möglichkeiten zu analysieren, wie Mikroplastik und Feinstaub aus verkehrsbezogenem Abrieb reduziert oder vermieden werden können. Diese Arbeit befasst sich diesbezüglich mit folgenden Forschungsfragen:

- Welchen Effekt hat die Elektrifizierung des österreichischen Fuhrparks auf die Abgas- und Nicht- Abgasemissionen?
- Welche Stellschrauben zur Reduktion von Abgas- und Nicht-Abgasemissionen gibt es?
- Wie kann Reifen-, Brems- und Straßenabrieb reduziert oder vermieden werden?

1.3 Methodik

Diese empirische Arbeit, insbesondere die für die Berechnungen verwendeten Werte der Abgas- und Nicht-Abgasemissionen, bezieht sich auf Österreich. Aufgrund der Aktualität dieses Themas, erfolgte die Literaturrecherche online. Auch stehen online eine große Bandbreite an sehr aktuellen wissenschaftlichen und fachspezifischen Artikeln zur Verfügung (z.B. Prenner et al. (2021), Pabortsava, K. & Lampitt, R.S. (2020), Sexlinger, K. & Liebmann, B (2021)). Diese Arbeit gliedert sich in

- Literaturrecherche der Grundlagen und Ausgangssituation bezüglich Abgas- und Nicht-Abgasemissionen in Österreich, Erläuterung der für die Berechnungen verwendeten Daten und Werte (Kapitel 2, Kapitel 3)

²³ Prenner et al., 2021, vgl. S. 3, zitiert nach Hillenbrand et al. (2005) und ADAC (2019)

²⁴ Deutsches Umweltbundesamt, 2016, Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW

- Erstellen der für die Emissionsberechnungen erforderlichen Prognosen (Kapitel 4)
- Berechnungen der Emissionswerte von Pkw und Lkw bis 2040 (Kapitel 5, Kapitel 6, Kapitel 7)
- Analyse der Ergebnisse, Analyse der Reduktionsmöglichkeiten (Kapitel 8, Kapitel 9)
- Schlussfolgerung, Zusammenfassung, Ausblick und Limitationen (Kapitel 10, Kapitel 11)

2 Ausgangssituation

Laut Österreichischem Umweltbundesamt machte der Verkehr im Jahr 2019 30%²⁵ der gesamten Treibhausgasemissionen aus. Bei gesamt 79,8 Mio. t CO₂eq THG in Österreich²⁶ ergibt dies ca. 24 Mio. t CO₂eq THG für den Verkehrssektor, dies entspricht einer Zunahme von 74,4% seit dem Jahr 1990²⁵. Im Jahr 2020 verursachte der Verkehrssektor 20,7 Mio. t CO₂-Äquivalent²⁷, konnte also um ca. 13,5% verringert werden. Zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2040 sieht der Mobilitätsmasterplan vor, die CO₂-Emissionen des Verkehrssektor auf nahezu null t CO₂eq zu reduzieren²⁸.

Elektrofahrzeuge erzeugen keine direkten Abgasemissionen, jedoch entstehen bei der Produktion und der Stromerzeugung vorgelagerte Treibhausgase²⁹. Um Emissionen von Elektrofahrzeugen, Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und sonstigen Fahrzeugen (Hybrid, Plug-in Hybrid etc.) vergleichbar zu machen, beziehen sich die Berechnungen aus Kap. 5 auf die gesamten Abgasemissionen. Diese setzen sich aus den direkten und indirekten Emissionen zusammen. Direkte Emissionen entstehen pro zurückgelegtem Kilometer durch Verbrennung des Kraftstoffes (Verbrennungsmotor), indirekte Emissionen entstehen bei der Bereitstellung und Umwandlung der Energieträger³⁰.

2.1 Ziele des Mobilitätsmasterplans 2030

Die Grundidee des Mobilitätsmasterplan 2030 ist mit den drei Stellschrauben Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung die Zukunft Österreichs klimaneutral und effizient zu gestalten. Mittels Backcasting-Ansatz wurde zuerst eine wünschenswerte Zukunft visualisiert und

²⁵ Umweltbundesamt, 2021, Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren

²⁶ Umweltbundesamt, 2021, Treibhausgas-Bilanz Österreichs 2019

²⁷ Österreichs Energie, o.J., CO₂-Emissionen in Österreich ab 1990 nach Sektoren

²⁸ BMK, 2020, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 16

²⁹ Pötscher et al., 2014, Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich

³⁰ Deutsches Umweltbundesamt, 2021, Emissionsdaten

anschließend die für die Erreichung dieses Ziels erforderlichen Maßnahmen erarbeitet³¹. Dabei wurde der Fokus auf die Vermeidung von Verkehr, Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger und die Verbesserung der Effizienz von Verkehrsträgern gelegt⁹. Wie bereits in Kap. 2 angeführt, ist das Ziel, die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors auf null t CO₂-Äquivalent zu reduzieren, um bis zum Jahr 2040 Klimaneutralität zu erreichen²⁸. Wichtig dabei ist die Effizienzsteigerung, diese wird bei Personen- und Güterverkehr und den jeweiligen Verkehrsträgern auf unterschiedliche Arten erzielt³².

2.1.1 Ziele für den Personenverkehr

Um die Ziele des Mobilitätsmasterplans 2030 zu erreichen, soll die Personenverkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs durch Verlagerung auf andere Verkehrsträger reduziert werden. Hierbei wird eine Reduktion der Personenfahrleistung von 21 Mrd. Personenkilometer auf ca. 62 Mrd. Personenkilometer vorgesehen. Wenn diese 21 Mrd. Personenkilometer vom öffentlichen Verkehr und der aktiven Mobilität³³ aufgefangen werden, kann die gesamte Personenverkehrsleistung um ca. 3% bis 2040 steigen, unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums bis 2040, bedeutet dies eine Reduktion der pro Kopf Verkehrsleistung³⁴. Hierbei handelt es sich um ein Modell, bei dem „...sich Personen- und Güterverkehr ein geringes, mögliches Wachstumspotenzial teilen...“³⁵. Um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors weiter voranzutreiben, wird bis 2040 eine vollständige Umstellung des Pkw-Bestandes in Österreich auf 100% Elektrofahrzeuge bzw. Fahrzeuge mit klimaneutralem Antrieb³⁶ vorgesehen. Ein erster Schritt zur Elektrifizierung erfolgt durch ausschließlich klimaneutrale Neuzulassungen von Pkw ab 2030³⁷ und einen dadurch gewährleisteten „weitestgehend klimaneutralen Bestand in diesen Fahrzeugklassen im Jahr 2040“³⁸.

2.1.2 Ziele für den Güterverkehr

Für die Erreichung der Klimaziele muss das Wirtschaftswachstum von der Transportleistung unabhängig³⁹ und diese auf nachhaltige Verkehrsträger, wie beispielsweise die Schiene

³¹ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S.8

³² Vgl. ebd. 14 (Abb. 5 und S. 15 Abb. 6)

³³ Vgl. ebd. 11 (Abb. 2)

³⁴ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S.10, Abb. 1

³⁵ Ebd. 10

³⁶ Vgl. ebd. 16 (Abb. 8)

³⁷ Vgl. ebd. 37

³⁸ Ebd. 39

³⁹ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 10

verlagert werden⁴⁰. Durch die Entkopplung soll die Güterverkehrsleistung bis zum Jahr 2040 nur um ca. 10% zunehmen⁴¹. Im Güterverkehr ist die Verlagerung der Transportleistung auf den Verkehrsträger Schiene notwendig, während die Transportleistung auf der Straße abnehmen muss⁴². Auf der Schiene ist der Transport mit gleicher Menge an Energie über weitere Strecken möglich⁴⁰. Auch bei den unterschiedlichen Verkehrsträgern im Güterverkehr bedarf es einer Verbesserung der Effizienz durch Umstieg auf klimaneutrale Antriebe. Lkw können Strecken von bis zu 300 km mit Elektroantrieb zurücklegen⁴³. Wie bereits in Kap. 1.1 erwähnt, werden 84,1% der Transportleistung im Inlandverkehr auf 80 km langen Strecken abgewickelt. Die Elektrifizierung soll abhängig vom Gesamtgewicht der Lastkraftwagen in Etappen erfolgen. Neuzulassungen von leichten Nutzfahrzeugen und schweren Nutzfahrzeugen mit weniger als 18 Tonnen Gesamtgewicht müssen ab dem Jahr 2030 emissionsfrei sein, Neuzulassungen von schweren Nutzfahrzeugen mit über 18 Tonnen Gesamtgewicht ab dem Jahr 2035¹¹.

2.2 Strommix Österreich

Im Jahr 2020 konnten 81% des in Österreich produzierten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt werden⁴⁴. Laut Österreichischem Umweltbundesamt, handelt es sich hierbei um Energieträger, „die sich im Gegensatz zu fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas) verhältnismäßig schnell erneuern oder praktisch unerschöpflich zur Verfügung stehen.“⁴⁵ Der wichtigste Energieträger für erneuerbare Energien in Österreich ist die Wasserkraft, gefolgt von Windkraft und Sonnenenergie⁴⁴.

Im Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (kurz EAG) wird in §4 Abs. 2 das Ziel gesetzt, „dass der Gesamtstromverbrauch ab dem Jahr 2030 zu 100% national bilanziell aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt wird.“⁴⁶ Da Wasser- und Windkraft in Österreich nur noch ein geringes Ausbaupotenzial besitzen, sind effizienzsteigernde Maßnahmen notwendig, um dieses Ziel zu erreichen⁴⁷. Der Strommix 2020 setzt sich gemäß Diagramm 2.1 zusammen.

⁴⁰ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 13

⁴¹ Vgl. ebd. 21

⁴² Vgl. ebd. 13 (Abb. 4)

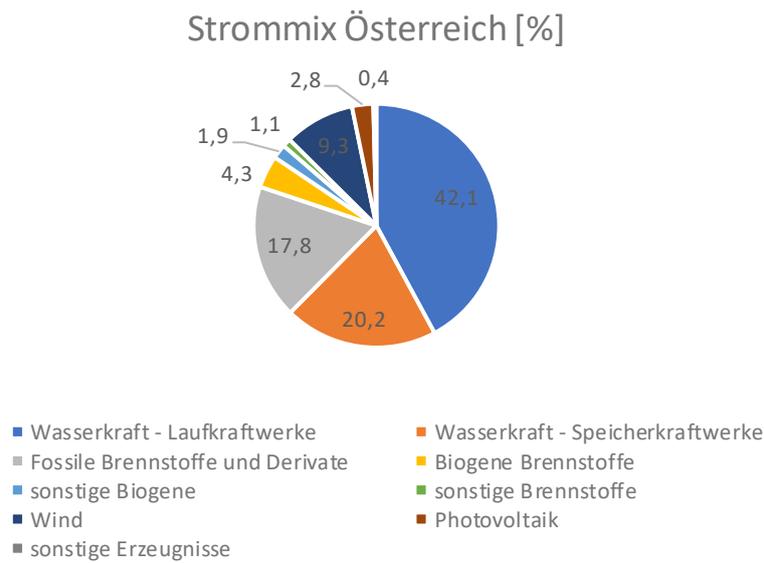
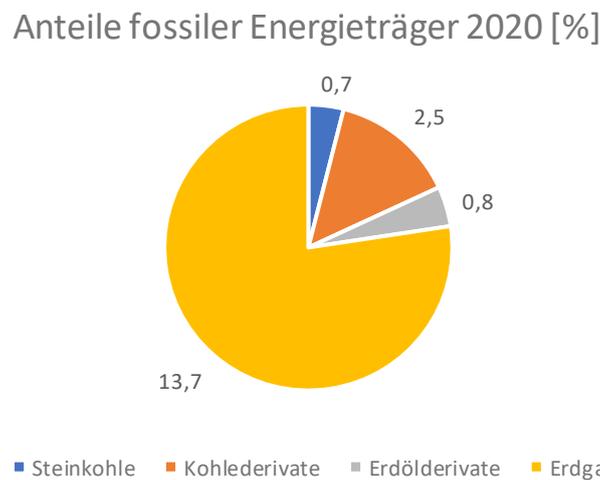
⁴³ Schwendinger, M., VCÖ, 2021, VCÖ Factsheet – Durch emissionsfreie Lkw Klimabilanz verbessern, vgl. S. 5

⁴⁴ Wien Energie, o.J., Stromerzeugung in Österreich 2020

⁴⁵ Österreichisches Umweltbundesamt, o.J., Erneuerbare Energien

⁴⁶ §4 Abs. 2 BGBl. I Nr. 150/2021

⁴⁷ Brauner, G., 2016, Energiesysteme: regenerativ und dezentral, vgl. S. 15

Diagramm 2.1: Strommix Österreich 2020 – Aufteilung der Brutto-Stromerzeugung⁴⁸**Diagramm 2.2: Anteile der fossilen Energieträger 2020⁴⁸**

Laut dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)⁴⁹ ergeben sich die äquivalenten CO₂-Emissionen der einzelnen Energieträger gemäß Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Auflistung der mittleren lifecycle CO₂-Emissionen unterschiedlicher Energieträger⁴⁹

Energieträger	g CO ₂ eq/kWh
Wasserkraftwerke	24
Steinkohle	820

⁴⁸ E-Control, 2021, Statistikbroschüre 2021, vgl. S. 28

⁴⁹ Schlömer et al., 2014, vgl. S. 1335

Kohlederivate	Ann.: 820
Erdölderivate	Ann.: 490
Erdgas	490
Biogene Brennstoffe fest	Ann.: 230
Biogene Brennstoffe gasförmig	Ann.: 230
Sonstige biogene Brennstoffe	Ann.: 230
Sonstige fossile Brennstoffe	Ann.: 655 (Mittelung Kohle- und Erdölderivate)
Windturbinen (Land)	11
Photovoltaikanlagen	27
Sonstige Erzeugungen	---

Unter Berücksichtigung der Anteile der einzelnen Energieträger ergibt dies einen gesamten CO₂-Ausstoß von 135,5 g CO₂eq/kWh. Bei Umstellung auf 100% Strom aus erneuerbaren Energiequellen und unter der Annahme, dass das Ausbaupotenzial der Windkraft voll ausgeschöpft und die Effizienz so gesteigert wird, dass der Anteil der Windkraft um 25,6 Prozentpunkte steigt (Aufteilung: 62,3% Wasserkraft, 2,8% Photovoltaik, 34,9% Windturbinen), wäre eine Einsparung von 85,6% des CO₂-Ausstoßes möglich (Reduktion auf 19,55 g CO₂eq/kWh).

Hierbei muss erwähnt werden, dass es sich bei dieser Berechnung nur um eine Annahme handelt und die Realisierbarkeit in Frage gestellt werden muss, da gemäß Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz bis zum Jahr 2030 27 TWh mehr an Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt und davon 11 TWh Strom aus Photovoltaikanlagen gewonnen werden sollen. Weitere 10 TWh Strom kommen demnach aus der Windkraft, weitere 5 TWh aus der Wasserkraft und eine weitere TWh aus der Biomasse⁵⁰. Der zusätzliche Bedarf an erneuerbarem Strom wird folglich nicht ausschließlich durch Erweiterung und Effizienzsteigerung der Windkraft gedeckt werden.

2.3 Definitionen

2.3.1 Treibhausgase und Treibhauseffekt

Treibhausgase sind klimawirksame Gase in der Erdatmosphäre. Kurzwellige Sonnenstrahlen erwärmen die Erdoberfläche, diese reflektiert langwellige Infrarotstrahlung, welche von den Treibhausgasen absorbiert wird. Dadurch kommt es zum sogenannten Treibhauseffekt – die Infrarotstrahlen können nicht entweichen und es kommt zur Erwärmung innerhalb der Atmosphäre. Dabei kann zwischen natürlichem und anthropogenem Treibhauseffekt

⁵⁰ § 4, Abs. 4, BGBl. I Nr. 150/2021

unterschieden werden. Seit Beginn der Industrialisierung erzeugt der Mensch einen großen Anteil an anthropogenen Treibhausgasen⁵¹. Laut IPCC sind anthropogene Treibhausgase verantwortlich für eine Erderwärmung von 1,1°C seit 1850/1900. In den nächsten Jahren könnte diese sogar auf 1,5°C steigen⁵². Den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union hat CO₂ mit 80%, gefolgt von Methan, Stickstoffdioxid und Fluorkohlenwasserstoffen⁵³.

Nach dem Kyoto-Protokoll⁵⁴ zählen zu den Treibhausgasen:

- Kohlendioxid (CO₂)
- Methan (CO₄)
- Distickstoffoxid (N₂O)
- Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC)
- Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC)
- Schwefelhexafluorid (SF₆)
- Stickstofftrifluorid (NF₃)

In Diagramm 2.3 sind die Anteile der verschiedenen Sektoren an den gesamten THG-Emissionen dargestellt, hier ist ersichtlich, dass es vor allem beim Verkehrssektor großes Reduktionspotenzial gibt.

⁵¹ Deutsches Umweltbundesamt, 2021, Wie funktioniert der Treibhauseffekt?

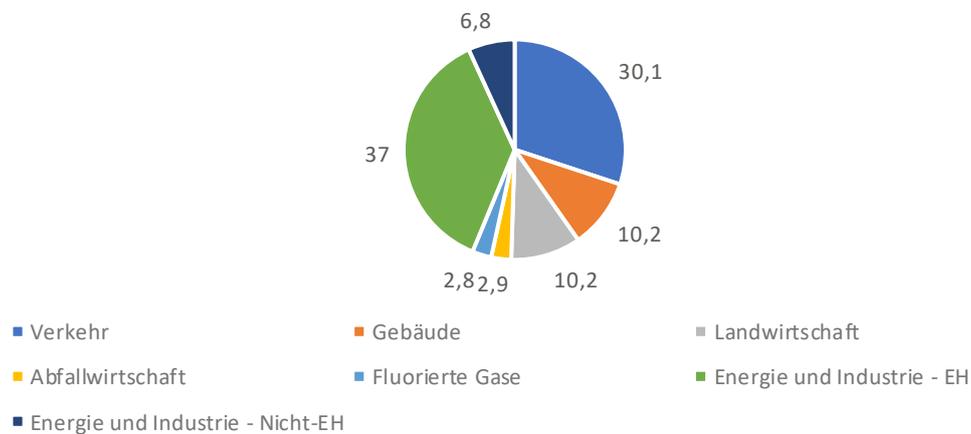
⁵² IPCC Press Release, 2021/17/PR, Climate change widespread, rapid and intensifying, vgl. S. 1

⁵³ Europäisches Parlament, 2018, Treibhausgasemissionen nach Sektoren (Infografik)

⁵⁴ Anlage A; BGBl. III Nr 89/2005: Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen samt Anlagen

Diagramm 2.3: Anteil der Sektoren an den gesamten THG-Emissionen in Österreich (Basisjahr 2019)⁵⁵

Anteil der Sektoren an den gesamten THG-Emissionen in % (2019)



2.3.2 Abgasemissionen

Unter Abgasemissionen versteht man jene Emissionen, die bei der Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemisches im Motor eines Fahrzeuges entstehen. „Bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen vor allem Kohlendioxidemissionen.⁵⁶“

Nach der in Österreich seit 01.01.2021 für alle Neuzulassungen geltenden Euronorm 6d -ISC-FCM seit 01.01.2021 (ISC: In-Service-Conformity-Tests), ist der Grenzwert für NO_x-Emissionen bei Dieselmotorkraftfahrzeugen höher als bei benzinbetriebenen Kraftfahrzeugen²⁴. Dies liegt womöglich daran, dass die NO_x-Emissionen pro zurückgelegtem Kilometer von Dieselmotorkraftfahrzeugen mehr als dreimal so hoch sind wie jene von Benzinmotorkraftfahrzeugen⁵⁷. Dies wird in Tab. 2.4 verdeutlicht.

2.3.3 Nicht-Abgasemissionen

Nicht-Abgasemissionen sind all jene Emissionen, die nicht aufgrund der Verbrennung von Kraftstoff entstehen. Dazu zählen Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und deren Aufwirbelung. Reifenabrieb entsteht durch den Kontakt des Reifens zur Straße. Durch die Reibung zwischen Reifen und Straßenbelag entstehen im Reifen hohe Temperaturen und Scherkräfte. Die Scherkräfte führen zur Emission von größeren Partikeln. Das Erwärmen des Reifens führt wiederum dazu, dass die flüchtigen Anteile des Reifens verdampfen, dies führt zur Emissionen

⁵⁵ Anderl et al. (Österreichisches Umweltbundesamt) 2021, Klimaschutzbericht 2021, vgl. S 69

⁵⁶ Deutsches Umweltbundesamt, 2021, Emissionsquellen

⁵⁷ Österreichisches Umweltbundesamt, 2021, EKZ Pkm – Tkm, Stand 2021

von eher kleineren Partikeln⁵⁸. Die unterschiedlichen Größen von Partikeln werden in Kap. 2.3.5 näher erläutert. Die Mechanismen bei der Entstehung des Reifenabriebs führen dazu, dass auch Straßenpartikel an den Reifengummipartikeln kleben bleiben und so ein Konglomerat bilden. Die Menge und Größe der Partikel hängen laut Kole et al. (2017) ab von „[...] climate (temperature), composition and structure of the tyre, the road surface, driving speed and style and the nature of the contact (e.g., rolling versus slipping).“⁵⁸

Beim Bremsvorgang werden die Bremsbeläge bzw. Bremsbacken gegen die Bremsscheiben gedrückt, durch die dadurch entstehende Reibung wird das Fahrzeug gebremst⁵⁹. Diese Reibung verursacht den Bremsabrieb. Dabei liegt der Bremsabrieb weit über den Feinstaub-Grenzwerten von beispielsweise Dieselkraftfahrzeugen⁶⁰. Bei Elektrofahrzeugen wird bei jedem Bremsvorgang ein Teil der Bremsenergie zurückgewonnen, daher „dürften auch diese Emissionen gegenüber klassischen Automobilen reduziert sein“⁶¹.

Laut Österreichischem Umweltbundesamt machen Abrieb und Aufwirbelung von Straßenstaub ca. 2/3 des vom Verkehrssektor erzeugten Staub aus⁶².

Nicht-Abgasemissionen gelangen auf mehreren Wegen in die Umwelt. Kleinere Partikel schweben und werden über die Luft verteilt, größere Partikel setzen sich am Boden ab und werden entweder im Straßenbelag eingelagert oder über den Regenwasserabfluss transportiert und gelangen so in den Kanal und Aufbereitungsanlagen, in Oberflächengewässer oder werden im Erdboden abgelagert⁶³.

Ca. 45% der Nicht-Abgasemissionen entstehen durch Straßenabrieb, 32% durch Reifen- und die restlichen 23% durch Bremsabrieb⁶⁴.

Laut Prenner et al. (2021) verlieren Reifen ca. 10% ihrer Masse während der Nutzungsdauer. Demnach werden in Österreich pro Jahr ca. 21.000 t an Reifenabrieb emittiert, davon gelangen 10.000 t in Oberflächengewässer und Böden (davon 5.000 t direkt und weitere 5.000 t über Abwasserbehandlung). Von diesen 10.000 t haben 600 t eine Partikelgröße von weniger als 5,0 µm und 9,0 t eine Partikelgröße von weniger als 0,1 µm⁶⁵.

⁵⁸ Kole et al., 2017, vgl. S. 3

⁵⁹ Schneider Kraftfahrzeug GmbH, 2019, Wie funktioniert Bremsen?

⁶⁰ Eigner, S., 2021, Bremsen als Feinstaubschleudern

⁶¹ Helmers, E., 2010, Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos, S. 573

⁶² Österreichisches Umweltbundesamt, o.J., Dieselfahrzeuge als Hauptverursacher

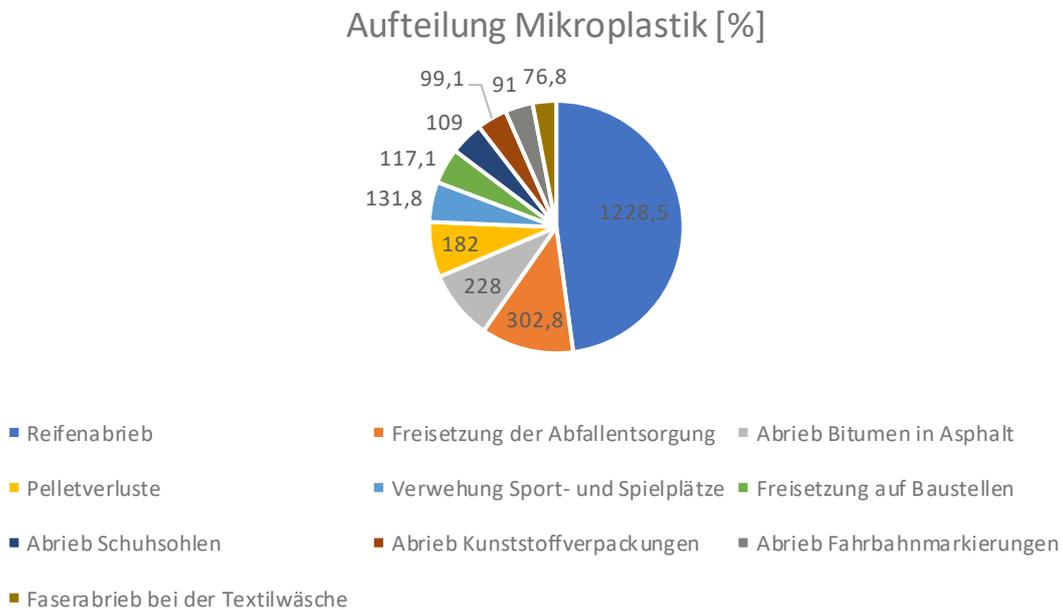
⁶³ Kole et al., 2017, vgl. S. 15

⁶⁴ Prenner et al., 2021, vgl. S. 4

⁶⁵ Prenner et al., 2021, vgl. S. 5

Die zehn Hauptverursacher von Mikroplastik sind in Diagramm 2.4 dargestellt⁶⁶. Die größte Quelle stellt Reifenabrieb dar mit 1228,5 g/(cap*a), gefolgt von Mikroplastik aus der Abfallentsorgung mit 302,8g/(cap*a).

Diagramm 2.4: Aufteilung Mikroplastik in Prozent⁶⁶



2.3.4 Zusammensetzung von Reifen

Reifen bestehen zu 40% bis 50% aus Gummi. Dieser kann hierbei synthetischen oder natürlichen Ursprungs sein. Zu 30% bis 35% bestehen Reifen aus Ruß, Siliziumoxid und Kalk. Durch den Abrieb von Reifen gelangen diese Reifenbestandteile in die Umwelt. Des Weiteren gilt Reifenabrieb als größte Quelle von Zink im Straßenablaufwasser⁶⁷.

2.3.5 Größenordnungen von Partikelemissionen

Das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (kurz: Fraunhofer UMSICHT) definiert Mikroplastik als feste Partikel mit einer maximalen Größe von unter fünf Millimetern. Reifenabrieb ist dabei der größte Verursacher von Mikroplastik, das in die Umwelt eingetragen wird, mit über 1000g jährlicher Eintragsmenge pro Person⁶⁸. Mikroplastik wird unterteilt in primäres Mikroplastik Typ A und primäres Mikroplastik Typ B. Typ A ist

⁶⁶ Bertling, J., Bertling, R., Hamann, L. (Fraunhofer UMSICHT), 2018, Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik, vgl. S. 10-11

⁶⁷ Fraunhofer UMSICHT, 2021, TyreWearMapping (Schlussbericht), vgl. S. 4

⁶⁸ Gehrke, I. (Fraunhofer UMSICHT), 2018, TyreWearMapping, Folie 13

jenes Mikroplastik, das „...bereits bei der Herstellung eines Produktes erzeugt werden...“⁶⁹ kann. Mikroplastik des Typs B entsteht erst bei der Nutzung. Zu dieser Kategorie zählt Reifenabrieb⁷⁰.

Feinstaub bzw. particulate matter (PM) ist einerseits ein Teil der Nicht-Abgasemissionen, der durch Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und deren Aufwirbelung⁷¹ und andererseits ein Teil der Abgasemissionen, der bei der Kraftstoffverbrennung (bspw. Dieselruß) entsteht⁵⁷. Die Größe befindet sich im Mikroskalenbereich⁷². Dabei sind die Partikelgrößen so klein, dass sie sich nicht sofort am Boden ablagern, sondern für einige Zeit in der Luft schweben¹⁵. Die Partikel werden in vier Größenkategorien in Abhängigkeit von ihrem aerodynamischen Durchmesser unterteilt:

- PM10 – mit einem aerodynamischen Durchmesser der Partikel von kleiner 10 µm,
- PM2,5 – mit einem aerodynamischen Durchmesser der Partikel von kleiner 2,5 µm,
- PM1,0 - mit einem aerodynamischen Durchmesser der Partikel von kleiner 1,0 µm und
- PM0,1 - mit einem aerodynamischen Durchmesser der Partikel von kleiner 0,1 µm⁷³.

Als Ultrafeinstaub werden Partikel mit einer Größe von kleiner 100nm (PM0,1) bezeichnet⁷⁴. Durch den Reifenabrieb werden auch die im Reifen enthaltenen Füllstoffe emittiert⁶⁷. Dazu zählt beispielsweise Carbon Black (zu Deutsch: Industrieruß), dessen Gehalt in Reifen bis zu 45% betragen kann⁶⁴. Laut Fraunhofer UMSICHT sind in einem Reifen ca. 3 kg CB enthalten⁷⁵. Pro Jahr werden davon ca. 5.500 Tonnen durch Reifenabrieb in die Umwelt eingetragen, davon 6% über die Luft und jeweils 47% über den Erdboden und Oberflächengewässer⁷². Carbon Black ist auch in Abgasemissionen von Benzin- und Dieselfahrzeugen enthalten, bei letzteren besonders, wenn kein Partikelfilter vorhanden ist⁷⁶.

2.4 Besetzungs- und Auslastungsgrad

Das österreichische Umweltbundesamt hat im Zuge der Ermittlung der Emissionswerte der unterschiedlichen Antriebsarten einen Besetzungsgrad von 1,14 Personen pro Pkw

⁶⁹ Bertling et al., (Fraunhofer UMSICHT), 2018, Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik, S. 9

⁷⁰ Vgl. ebd. S. 9

⁷¹ Umweltbundesamt, Mobilität, E-Mail Korrespondenz mit Dipl.-Ing. Stefan Lambert

⁷² Prenner et al., 2021, vgl. S. 1

⁷³ Cornelius et al., Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, 2017, Feinstaub PM₁₀

⁷⁴ Deutsches Umweltbundesamt, 2018, Was ist Feinstaub

⁷⁵ Fraunhofer UMSICHT, 2021, Carbon Black aus Autoreifen recyceln, vgl. S. 1

⁷⁶ Toenges-Schuller et al., 2020, Black Carbon Emissionen, Text Nr. 47/2020; vgl. S. 121

angenommen. Dieser Wert wird in dieser Arbeit für die Umrechnung von Fahrzeugkilometern in Personenkilometer verwendet. Der Auslastungsgrad von Lastkraftwagen ist abhängig vom Gesamtgewicht und bewegt sich zwischen 0,33 und 15,44 Tonnen⁵⁷.

2.5 Zusammensetzung Reifenabrieb

Die Entstehung von Reifenabrieb wird in Kap. 2.3.3 erläutert. Reifenabrieb kann in Abhängigkeit von der Partikelgröße untergliedert werden in

- Mikroplastik
- Feinstaub
- Ultrafeinstaub, Nanopartikel.

Laut Prenner et al. (2021) wurden in Österreich im Jahr 2018 21.200 t Reifenabrieb in die Umwelt eingetragen, davon sind 6% mikroskalig (Partikelgröße zwischen 0,1 und 10 μm) und 0,3% nanoskalig (Partikelgröße kleiner als 0,1 μm)⁷².

2.6 Aktuelle Emissionen in Österreich

Für eine vereinfachte Berechnung werden in dieser Arbeit unter „Sonstige“ oder „Fahrzeuge mit sonstigem Antrieb“ alle Kraftfahrzeuge mit folgende Antriebsarten zusammengefasst:

- Hybrid Benzin
- Hybrid Diesel
- Plug-in Hybrid Benzin
- Plug-in Hybrid Diesel
- Flüssiggas
- Erdgas
- Benzin/Flüssiggas
- Benzin/Erdgas

Für sämtliche Berechnungen in dieser Arbeit werden außerdem Fahrzeuge mit Elektroantrieb und Fahrzeuge mit Brennstoffzelle zusammengefasst und nicht gesondert berücksichtigt. Sämtliche Emissionen, die sich auf Elektrofahrzeuge beziehen, werden ebenso für Fahrzeuge mit Brennstoffzelle angenommen.

2.6.1 Emissionen exkl. Reifen- und Bremsabrieb und Aufwirbelung - PKW

Laut Österreichischem Umweltbundesamt⁵⁷ werden folgende Emissionen, unterschieden nach Antriebsart und bezogen auf einen Besetzungsgrad von 1,14, pro Personenkilometer, ausgestoßen:

Tab. 2.2: Direkte Emissionen nach Antriebsart in g/Pkm⁵⁷

Antriebsart	CO ₂	NO _x	Partikel
Pkw-Durchschnitt B+D	145,6	0,53	0,008
Pkw Benzin	145,6	0,10	0,002
Pkw Diesel	147,0	0,74	0,010
BEV (Ö. Stromaufbringung inkl. Importen)	---	---	---
BEV (Ö. Stromproduktionspark)	---	---	---
BEV Ökostrom (Umweltzeichen 46 Strom)	---	---	---

Tab. 2.3: Indirekte Emissionen nach Antriebsart in g/Pkm⁵⁷

Antriebsart	CO ₂	NO _x	Partikel
Pkw-Durchschnitt B+D	62,7	0,14	0,022
Pkw Benzin	74,3	0,15	0,026
Pkw Diesel	58,2	0,12	0,020
BEV (Ö. Stromaufbringung inkl. Importen)	82,3	0,13	0,017
BEV (Ö. Stromproduktionspark)	75,1	0,12	0,016
BEV Ökostrom (Umweltzeichen 46 Strom)	45,4	0,09	0,016

Tab. 2.4: Gesamte Emissionen nach Antriebsart in g/Pkm⁵⁷

Antriebsart	CO ₂	NO _x	Partikel
Pkw-Durchschnitt B+D	208,3	0,67	0,030
Pkw Benzin	220,0	0,26	0,028
Pkw Diesel	205,2	0,86	0,030
BEV (Ö. Stromaufbringung inkl. Importen)	82,3	0,13	0,017
BEV (Ö. Stromproduktionspark)	75,1	0,12	0,016
BEV Ökostrom (Umweltzeichen 46 Strom)	45,4	0,09	0,016

Elektrofahrzeuge erzeugen gemäß Tab. 2.2 keine direkten Emissionen. Wie in Kap. 2 bereits erläutert, werden die Berechnungen aus Kap. 5 mit den gesamten Emissionen durchgeführt.

Die Angaben für Partikelemissionen in Tab. 2.2, Tab. 2.3 und Tab. 2.4 beziehen sich auf Feinstaub bzw. particulate matter exklusive Reifen- und Bremsabrieb und Aufwirbelung mit einer Partikelgröße von kleiner als 10 µm.

Die CO₂-Emissionen von Plug-in Hybrid-Fahrzeugen belaufen sich auf 117g/Fzkm⁷⁷. Mit einem Besetzungsgrad von 1,14 Personen/Pkw ergibt dies 102,63 g CO₂/Pkm. Für eine

⁷⁷ Transport & Environment, 2020, UK briefing: The plug-in hybrid con

vereinfachte Berechnung wird dieser Emissionswert für alle sonstigen Antriebsarten angenommen.

Die NO_x-Emissionen und Partikelemissionen für sonstige Antriebsarten werden durch Mittelung der NO_x-Emissionen und Partikelemissionen von HEV und PHEV berechnet, dabei wird der Besetzungsgrad von 1,14 Personen pro Pkw berücksichtigt.

Tab. 2.5: NO_x-Emissionen von Fahrzeugen mit sonstigem Antrieb in g/Fzkm⁷⁸ und der Mittelwert in g/Pkm

Antriebsart	HEV	HEV	PHEV	PHEV	Mittelwert (g/Pkm)
	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	
NO _x	0,145	0,37	0,13	0,30	0,20724

Tab. 2.6: Feinstaubmissionen von Fahrzeugen mit sonstigem Antrieb in g/Fzkm⁷⁹ und der Mittelwert in g/Pkm

Antriebsart	HEV	HEV	PHEV	PHEV Diesel	Mittelwert (g/Pkm)
	Benzin	Diesel	Benzin		
Feinstaub	0,0255	0,023	0,028	0,0265	0,02259

Für eine vereinfachte Berechnung werden diese Werte für alle sonstigen Antriebsarten angenommen. In Tab. 2.5 werden außerdem die höheren NO_x-Emissionen von Diesel-Hybridfahrzeugen verdeutlicht. In Tab. 2.7 werden die Emissionswerte für Fahrzeuge mit sonstigem Antrieb zusammengefasst.

Tab. 2.7: Zusammenfassung Emissionen von Fahrzeugen mit sonstigen Antrieben in g/Pkm

Antriebsart	CO ₂	NO _x	Partikel
Sonstige	102,63	0,2072	0,02259

2.6.2 Emissionen exkl. Reifen- und Bremsantrieb und Aufwirbelung – Lkw

Die Emissionen von leichten und schweren Nutzfahrzeugen wurden vom Österreichischen Umweltbundesamt ermittelt, die Ergebnisse werden für die Berechnungen in Kap. 6 angenommen und können Tab. 2.8 entnommen werden.

Tab. 2.8: Emissionen von schweren und leichten Nutzfahrzeugen mit Dieselantrieb in g/Tkm⁵⁷

Nutzfahrzeug	THG	CO ₂	NO _x	Partikel
LKW LNF (< 3,5 t)	908,2	872,6	4,05	0,145
LKW SNF (< 18 t)	377,4	361,2	1,25	0,037

⁷⁸ Fritz et al., Umweltbundesamt, 2016, Ökobilanz alternativer Antriebe; vgl. S. 37 (Abb. 7)

⁷⁹ Vgl. ebd. 39 (Abb. 8)

LKW SNF (> 18 t)	148,7	143,0	0,42	0,014
Sattelzüge (40 t)	89	66,5	0,11	0,005
Durchschnitt LKW SNF ($\geq 3,5$ t bis 40 t)	85,1	81,9	0,18	0,007
Durchschnitt gesamt	317,68	305,04	1,20	0,042

2.6.3 Emissionen von Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung - Pkw

Die Werte für den Reifenabrieb pro Personenkilometer werden Prenner et al. (2021) entnommen. Für die Berechnungen werden die Werte für TWP_{total} (Reifenabrieb) der Tabelle 1²³ entnommen und mit einem Besetzungsgrad von 1,14⁵⁷ auf Abrieb pro Personenkilometer umgerechnet. Die Werte für PC (passenger car) werden für diesel- und benzinbetriebene Fahrzeuge angenommen. Für die Berechnungen des Reifenabriebs von Elektrofahrzeugen in Kap. 5 wird der Reifenabrieb von PC BEV 100 angesetzt. Der Wert für sonstige Fahrzeuge wird aus dem Mittelwert von PC und PC BEV 100 berechnet.

Tab. 2.9: Reifenabrieb nach Antriebsart in g/Fzkm²³

Antriebsart	PC (passenger car)	PC BEV 100	PV BEV 300
Reifenabrieb	0,1250	0,1733	0,1295

Die Werte für die PM-Emissionen wurden vom Österreichischen Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt⁷¹, jene beziehen sich auf den Inlandsverkehr und den österreichischen Kraftstoff im Ausland.

Die Werte pro Fahrzeugkilometer werden mithilfe des Besetzungsgrades von 1,14 Personen/Pkw⁵⁷ in Werte pro Personenkilometer umgerechnet.

Tab. 2.10: Partikelemissionen nach Antriebsart in g/Fzkm und g/Pkm⁷¹

Antriebsart	PM _{0,1} in g/Fzkm.	PM _{0,1} in g/Pkm	PM _{1,0} in g/Fzkm.	PM _{1,0} in g/Pkm
Benzin	0,001584	0,001390	0,001980	0,001737
Diesel	0,001584	0,001390	0,001980	0,001737
	PM _{2,5} in g/Fzkm.	PM _{2,5} in g/Pkm	PM ₁₀ in g/Fzkm.	PM ₁₀ in g/Pkm
Benzin	0,017401	0,015264	0,031303	0,027459
Diesel	0,017401	0,015264	0,031303	0,027459

Die Partikelemissionen pro Personenkilometer von Elektrofahrzeugen müssen gesondert berechnet werden, da hier nur Daten über die gesamten Emissionen pro Jahr verfügbar sind.

Tab. 2.11: Partikelemissionen von Elektrofahrzeugen in t/a⁷¹

Antriebsart	PM _{0,1}	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀
Elektro	0,770123	0,962654	7,672761	14,10451

Die Partikelemissionen pro Personenkilometer werden gesondert gemäß Berechnungsvariante 1 und 2 berechnet. In Tab. 2.12 werden die gesamten Partikelemissionen von Elektro-Pkw durch die Fahrleistung von Elektro-Pkw im Jahr 2019 dividiert, um die Werte pro Personenkilometer zu erhalten. In Tab. 2.13 werden die gesamten Partikelemissionen durch den Bestand von Elektrofahrzeugen dividiert, um die Emissionen pro Fahrzeugkilometer zu erhalten. Durch Division durch den Besetzungsgrad von 1,14 Personen pro Pkw erhält man die Emissionen pro Personenkilometer.

Tab. 2.12: Partikelemissionen in g/Pkm (berechnet mit Fahrleistung nach Mobilitätsmasterplan⁷⁾)

Antriebsart	PM0,1	PM1,0	PM2,5	PM10
Elektro	0,001562	0,001952	0,015562	0,028607

Tab. 2.13: Partikelemissionen in g/Pkm (berechnet mit durchschnittlicher jährlicher Fahrleistung⁸⁰⁾)

Antriebsart	PM0,1	PM1,0	PM2,5	PM10
Elektro	0,001536	0,00192	0,0153	0,028126

Die Werte für die Partikelemissionen von Elektrofahrzeugen in Gramm pro Personenkilometer unterscheiden sich in Tab. 2.12 und Tab. 2.13 nur um ca. 1,71%.

Da für Kraftfahrzeuge mit sonstigem Antrieb keine Daten verfügbar sind, werden hier die gemittelten Emissionen von Diesel- bzw. Benzinfahrzeugen und Elektrofahrzeuge angenommen. Diese können Tab. 2.14 für Berechnungsvariante 1 und Tab. 2.15 für Berechnungsvariante 2 entnommen werden.

Tab. 2.14: Partikelemissionen von sonstigen Fahrzeugen in g/Pkm (berechnet mit Fahrleistung nach Mobilitätsmasterplan⁷⁾, Ausgangsdaten nach Umweltbundesamt⁷¹⁾)

Antriebsart	PM0,1	PM1,0	PM2,5	PM10
Sonstige	0,001476	0,001845	0,015413	0,028033

Tab. 2.15: Partikelemissionen von sonstigen Fahrzeugen in g/Pkm (berechnet mit durchschnittlicher jährlicher Fahrleistung⁸⁰⁾, Ausgangsdaten nach Umweltbundesamt⁷¹⁾)

Antriebsart	PM0,1	PM1,0	PM2,5	PM10
Elektro	0,001463	0,001828	0,015282	0,027793

Aufgrund mangelnder Daten für Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoff-Emissionen von Personenkraftwagen mit Elektroantrieb können hier keine Prognosen berechnet werden.

⁸⁰ Umweltbundesamt, 2019, EKZ Doku Verkehrsmittel

2.6.4 Emissionen von Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung – Lkw

Laut Prenner et al. (2021) erzeugt ein LDV (engl.: light duty vehicle) mit Verbrennungsmotor gesamt 0,70 g Reifenabrieb pro Kilometer. Ein LDV BEV 100 verursacht hingegen 1,0355 g/km. Die Emissionen eines HDV (engl.: heavy duty vehicle) liegen bei 1,2 g/km²³.

Die Abriebemissionen von Reifen, Bremsen, der Straße und die Aufwirbelungen mit Größen PM10 bis PM0,1 von leichten und schweren Nutzfahrzeugen wurden vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt und setzen sich aus den Emissionen des Inlandsverkehr und jenen des österreichischem Kraftstoffs im Ausland zusammen⁷¹. Die Werte können Tab. 2.16 entnommen werden, jene beziehen sich auf Gramm pro Fahrzeugkilometer.

Tab. 2.16: Partikelemissionen von schweren und leichten Nutzfahrzeugen in g/km⁷¹

Antriebsart	PM0,1	PM1,0	PM2,5	PM10
LNF Benzin	0,0018774286	0,0023467858	0,0175319754	0,0315697098
LNF Diesel	0,0018774286	0,0023467858	0,0175319754	0,0315697098
SNF Benzin (< 18 t)	0,0118005829	0,0147507286	0,1150568100	0,2111493130
SNF Diesel (< 18 t)	0,0118005829	0,0147507286	0,1150568100	0,2111493130
SNF (> 18 t)	0,0123670680	0,0154588350	0,1203189645	0,2209060065
Sattelzüge Diesel	0,0063809125	0,0079761406	0,0764346871	0,1348506475
Sattelzüge Elektro	0,0063809125	0,0079761406	0,0764346871	0,1348506475

2.6.5 Gegenüberstellung der Pkw-Emissionen nach Antriebsart

In Diagramm 2.5 sind die Emissionen von Personenkraftwagen nach Antriebsart dargestellt. Eine farbliche Unterteilung in Abgas- und Nicht-Abgasemissionen verdeutlicht den Effekt der Elektrifizierung. Während Abgasemissionen deutlich reduziert werden, nehmen Nicht-Abgasemissionen zu. Die CO₂-Emissionen werden aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit in kg/Pkm dargestellt, sämtliche weiteren in Diagramm 2.5 dargestellten Emissionen beziehen sich auf g/Pkm. Für eine vereinfachte Darstellung werden hier nur die PM-Emissionen von sonstigen Fahrzeugen gemäß Tab. 2.14 dargestellt.

In Diagramm 2.6 und Diagramm 2.7 werden die Emissionen untergliedert in Abgas- und Nicht-Abgasemissionen dargestellt. Diagramm 2.7 bezieht sich ebenso ausschließlich auf PM-Emissionen von sonstigen Fahrzeugen nach Berechnungsvariante 1 gemäß Tab. 2.14. Aufgrund mangelnder Datenlage werden die Abgasemissionen in Diagramm 2.5 und Diagramm 2.6 exklusive Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen dargestellt. Die Werte für „TWP“ ergeben sich durch die Subtraktion der vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellten Daten für die Partikelemissionen von Abrieb und Aufwirbelung⁷¹ von den Daten für den gesamten Reifenabrieb inkl. Feinstaub, Ultrafeinstaub und Mikroplastik laut Prenner et al. (2021). Die restlichen Emissionen werden in Kap. 2.6 erläutert.

Demnach weisen Dieselfahrzeuge die höchsten kumulierten Gesamtemissionen auf, gefolgt von Benzinfahrzeugen. Elektrofahrzeuge bilden das Schlusslicht. Zu beachten ist hier, dass CO₂-Emissionen in kg dargestellt sind.

Diagramm 2.5: Emissionen untergliedert nach Antriebsart

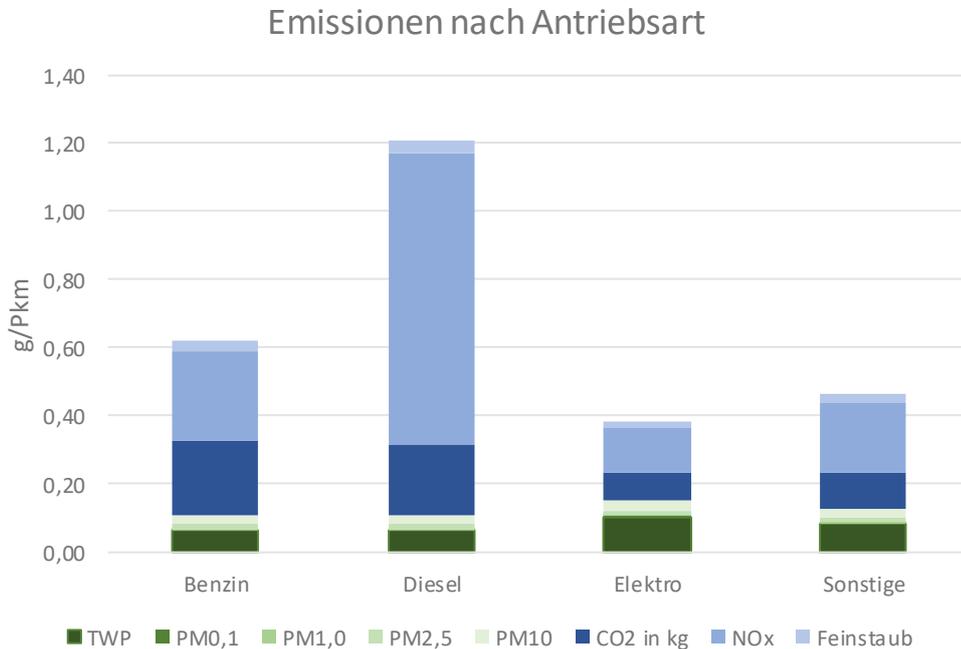
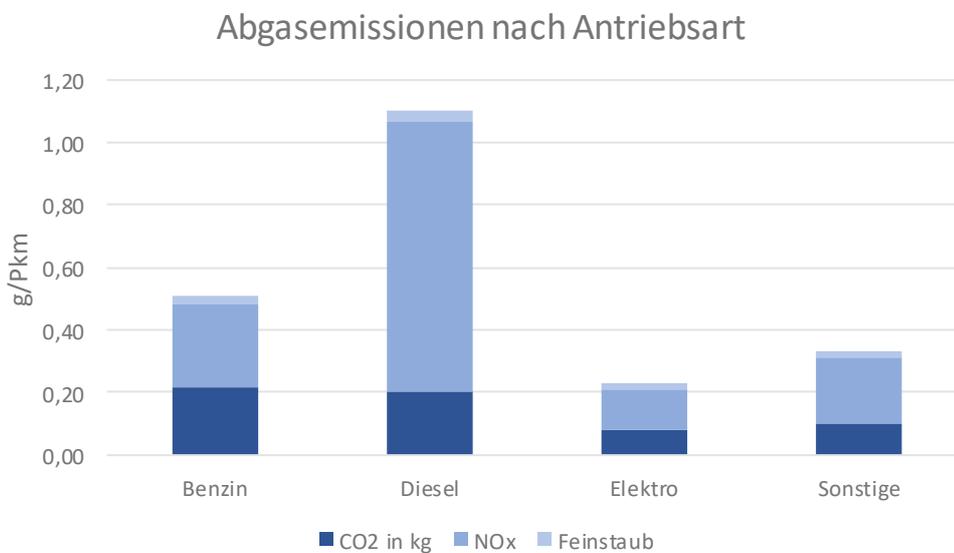


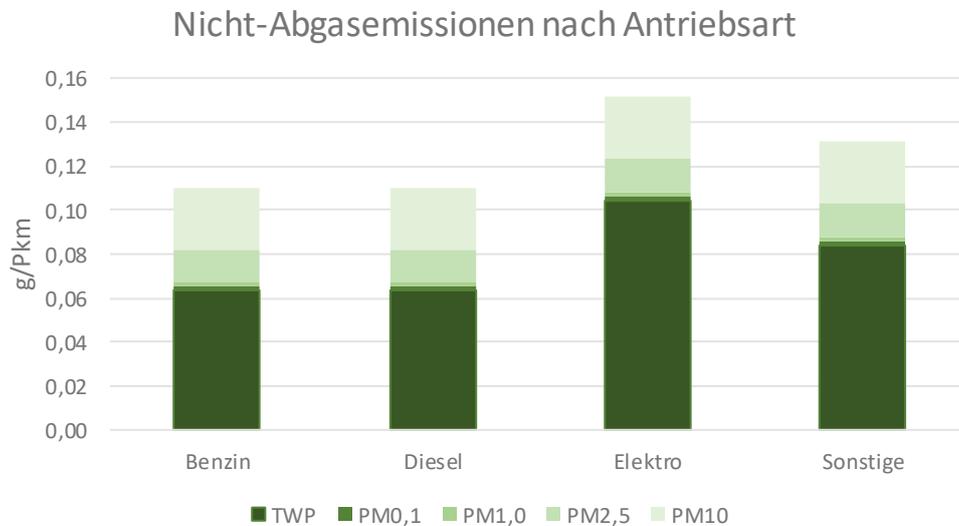
Diagramm 2.6: Abgasemissionen untergliedert nach Antriebsart⁵⁷



Bei der gesonderten Betrachtung der Nicht-Abgasemissionen relativiert sich der Vorteil der Elektrofahrzeuge bezüglich Abgasemissionen allerdings wieder. Hier liegen Elektrofahrzeuge mit ca. 0,15 g Nicht-Abgasemissionen/Pkm an erster Stelle, gefolgt von sonstigen Fahrzeugen

mit ca. 0,13 g/Pkm. Aufgrund der vereinfachenden Annahmen bezüglich der Emissionen von Benzin- und Dieselfahrzeugen, liegen jene auf gleichem Niveau bei ca. 0,11g/Pkm.

Diagramm 2.7: Nicht-Abgasemissionen untergliedert nach Antriebsart^{23, 71}



Nach Prenner et al. (2021) teilen sich die Partikelemissionen von Reifen-, Brems- und Straßenabrieb gemäß Diagramm 2.8, Diagramm 2.9 und Diagramm 2.10 auf. Die um ca. 70% geringeren Werte des Bremsabriebs von Elektrofahrzeugen könnten eine Folge der Rekuperation sein.

Diagramm 2.8: Partikelemissionen (PM10 – PM0,1) - Reifenabrieb²³

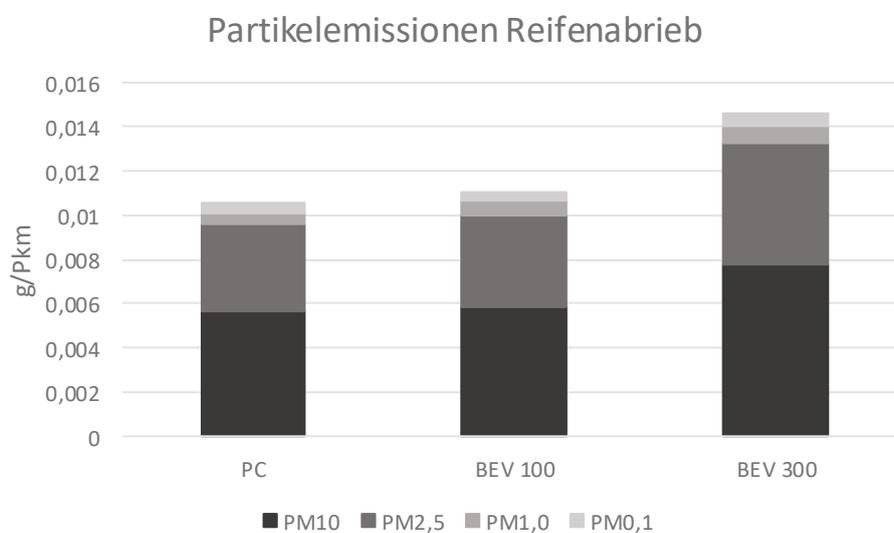
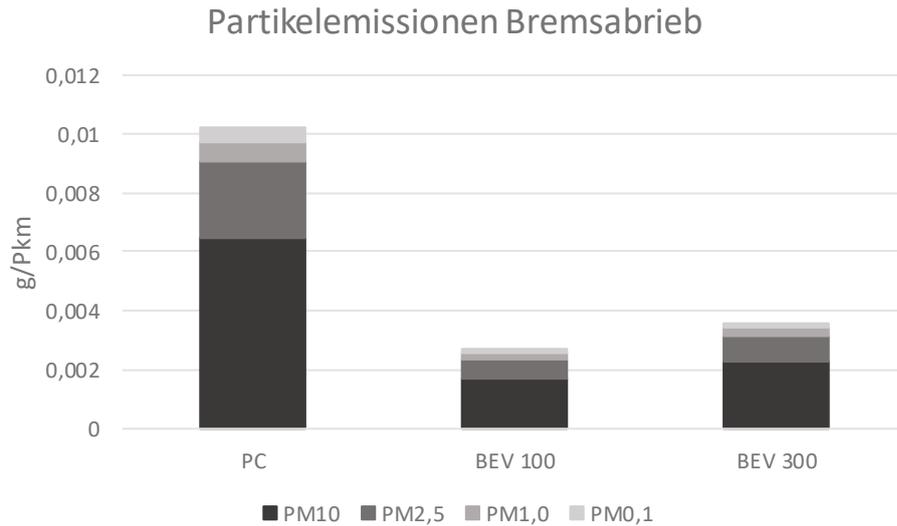
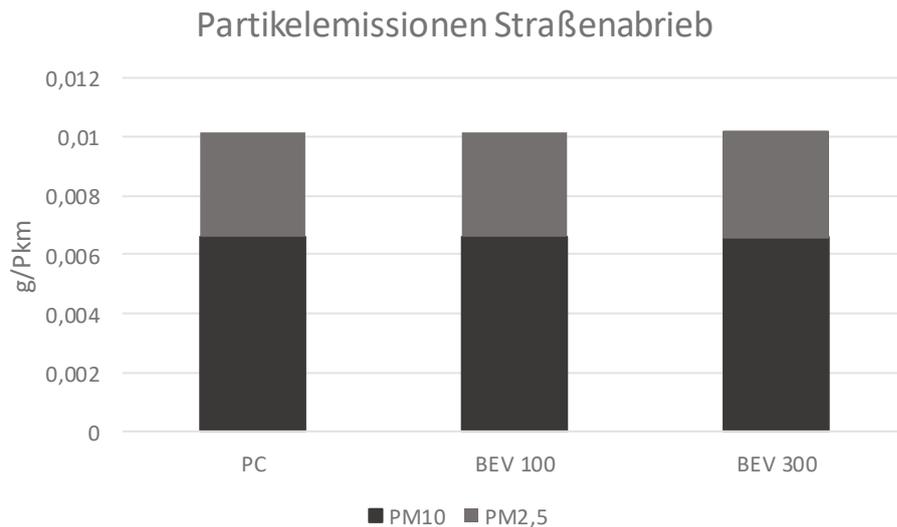


Diagramm 2.9: Partikelemissionen (PM10 – PM0,1) - Bremsabrieb²³

Der Straßenabrieb ist in dieser Aufstellung unabhängig von der Antriebsart und beläuft sich auf ca. 0,01g/Pkm.

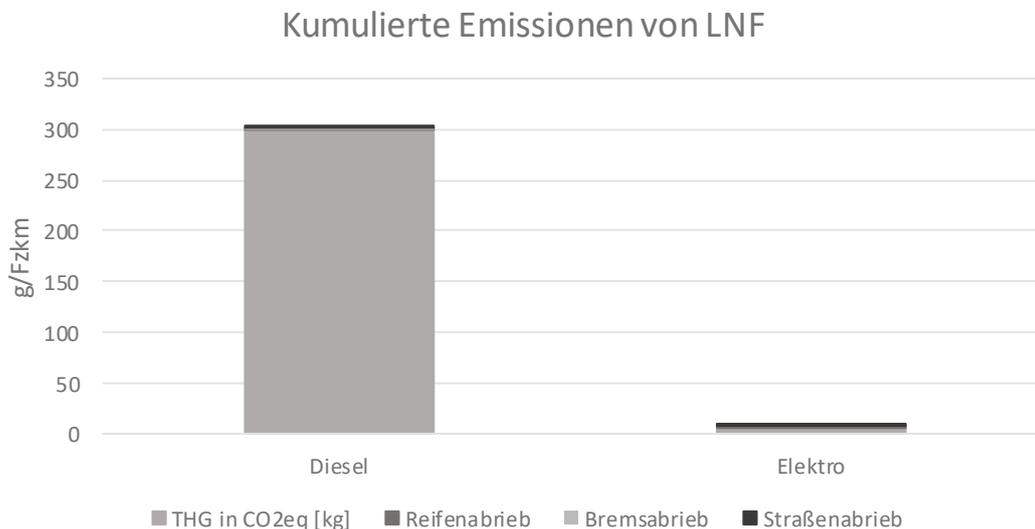
Diagramm 2.10: Partikelemissionen (PM10 – PM0,1) - Straßenabrieb²³

2.6.6 Gegenüberstellung der Emissionen von leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebsart

Die kumulierten Emissionen eines leichten Nutzfahrzeuges (bis 3,5 t Gesamtgewicht) sind in Diagramm 2.11 dargestellt. Die Abgasemissionen von leichten Nutzfahrzeugen, zusammengefasst unter THG in CO₂-Äquivalenten, überwiegen mit ca. 299,7 g/Fzkm (bzw. 908,2 g/Tkm mit einem Ausnutzungsgrad von 0,33 Tonnen)⁵⁷. Bei diesem Wert wird der Ausnutzungsgrad von 0,33 Tonnen von leichten Nutzfahrzeugen berücksichtigt. Der

Reifenabrieb mit 0,7 g Emissionen pro Kilometer ist der größte Emittent unter den Nicht-Abgasemissionen, Bremsabrieb liegt bei 0,012 g/Fzkm und Straßenabrieb bei 0,0015 g/Fzkm. Bei den leichten Nutzfahrzeugen mit Elektroantrieb überwiegen die Nicht-Abgasemissionen. Hier liegt der Reifenabrieb mit ca. 1,1 g/Fzkm an erster Stelle, gefolgt von Bremsabrieb mit 0,003 g/Fzkm und Straßenabrieb mit 0,0015 g/Fzkm.

Diagramm 2.11: Kumulierte Emissionen von leichten Nutzfahrzeugen^{57, 23}



3 Folgen von Schadstoffen für Umwelt und Gesundheit

3.1.1 Die Wirkung einzelner Schadstoffe

Viren können sich an Partikel anheften und mit jenen über die Luft transportiert werden. Während man diesbezüglich über Viren, die Menschen infizieren, noch nicht viel weiß, ist es erwiesen, dass Viren, die Bakterien infizieren, auf Partikeln über weite Strecken transportiert werden können⁸¹. In stark vom Sars-Coronavirus betroffenen Regionen könnte ein Zusammenhang zwischen Feinstaubbelastung und Infektionsraten bestehen⁸². Dabei können Feinstaubpartikel eine Art Transportmittel für Sars-CoV-2 darstellen und so eine Verbreitung des Virus begünstigen oder eine Infektion mit Sars-CoV-2 durch die Vorbelastung durch Feinstaub und damit einhergehender gesundheitlicher Beeinträchtigungen verheerender

⁸¹ Deutsches Umweltbundesamt, 2020, Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung

⁸² Deutsches Umweltbundesamt, 2020, Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung, zitiert nach EEA, 2020, Air quality in Europe

sein⁸³. Das Max-Planck-Institut beziffert den Anteil an Todesfällen an einer Sars-CoV2-Infektion, die auf Feinstaubexposition (PM_{2,5}) zurückzuführen ist, mit 26%⁸⁴. Dabei ist es jedoch schwierig zu definieren, ob der Todesfall auf die Infektion oder die Feinstaubbelastung zurückzuführen ist.

In der Umwelt haben Feinstaub bzw. die durch die Verbrennung des Kraftstoffs entstehenden Rußpartikel weitreichende Folgen. Dieses vor allem bei der Verbrennung des Dieselmotors entstehende Black Carbon wurde bereits in antarktischen Schnee und Eis nachgewiesen⁸⁵. Diese Verunreinigungen verändern das sehr hohe Albedo der Antarktis, führen zur Absorption von Sonnenstrahlen und dadurch zu rascherem Abschmelzen von Schnee und Eis⁸⁶. Black Carbon ist wie in Kap. 2.3.5 erwähnt auch in Reifen enthalten.

Kohlendioxid ist ein klimawirksames Treibhausgas, der Effekt von Treibhausgasen wird in Kap. 2.3.1 behandelt. CO₂ entsteht unter anderem im Körper und regelt die Atmung. Durch eine erhöhte Konzentration von CO₂ in der Luft werden die Atmung beschleunigt, die Bronchien erweitert, die Denkleistung herabgesetzt und Beeinträchtigungen der Wahrnehmung hervorgerufen⁸⁷.

Stickstoffdioxid ist ein Reizgas und kann durch eine geringe Wasserlöslichkeit tief in die Lunge vordringen und dort zu entzündlichen Reaktionen führen. Kurzzeitstudien belegten, dass erhöhte NO₂-Werte zu einer höheren Sterblichkeit führten, die vor allem auf Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen zurückzuführen waren. Stickstoffdioxid ist vor allem für Menschen mit Vorerkrankungen der Atemwege gefährlich⁸⁸. NO₂-Belastungen haben weitreichende Folgen und beeinflussen unter anderem das Geburtsgewicht und Lungenwachstum bei Kindern. Des Weiteren besteht der Verdacht, dass eine NO₂-Exposition zu Lungenkrebs führen kann. Die hier genannten Erkrankungen konnten allerdings auch bei

⁸³ Deutsches Umweltbundesamt, 2020, Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung, zitiert nach EEA, 2020, Air quality in Europe zitiert nach Tung et al. (2020) Particulate matter and SARS-CoV-2: A possible model of COVID-19 transmission

⁸⁴ Deutsches Umweltbundesamt, 2020, Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung, zitiert nach Pozzer et al. (2020), Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19

⁸⁵ Cordero et al. (2022), vgl. S. 2

⁸⁶ Vgl. ebd. 6

⁸⁷ Deutsches Umweltbundesamt, 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, vgl. S. 1362

⁸⁸ Schneider et al., 2018, Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland, vgl. S. 54

niedrigen NO₂-Belastungen festgestellt werden. Demnach ist nicht klar, ob NO₂ diese Erkrankungen hervorruft oder jene auch Folgen von anderen Schadstoffen sind⁸⁹.

3.1.2 Der Gesamteffekt der Schadstoffe

Da Luftschadstoffe wie Feinstaub, Ozon oder Stickstoffdioxid oft durch gemeinsame Quellen wie zum Beispiel Verbrennungsmotoren entstehen, wirken diese gleichzeitig und kumuliert auf den Körper. Gesundheitliche Langzeitfolgen, die auf die Wirkung einzelner Schadstoffe zurückgeführt werden, könnten dabei die Folge eines Schadstoffgemisches sein, für das einzelne Schadstoffe nur als Indikator gelten. Laut Peters et al. (2019) besteht für die kumulierende Wirkung von Schadstoffe bzw. den Gesamteffekt jener noch Forschungsbedarf⁹⁰.

3.1.3 Gesundheitliche Relevanz in Abhängigkeit von der Partikelgröße

Feinstaub kann aufgrund der geringen Partikelgröße eingeatmet werden. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer können sie in die Lunge eindringen und auch nicht mehr ausgeatmet werden⁹². Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von kleiner als 2,5 µm werden als lungengängig bezeichnet und können bis in die Lungenbläschen vordringen. Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 µm sind alveolengängig⁹¹. Dies bedeutet, dass sie über die Atmung in die Lungenbläschen⁹² und von dort bis in den Blutkreislauf gelangen können. Entzündungen der Atemwege oder Herz-Kreislaufkrankungen sind die Folge. Laut WHO sind Grenzwerte wenig zielführend, da Partikel dieser Größe bereits bei geringster Konzentration negative gesundheitliche Auswirkungen haben können⁹³. Anders verhält es sich bei Schwefel- oder Stickstoffdioxid. Hier hat das Unterschreiten von vorgegebenen Grenzwerten durchaus einen mindernden Effekt auf negative gesundheitliche Auswirkungen. Partikel sind nicht nur aufgrund ihrer geringen Größe gesundheitsschädlich, auf ihnen können sich außerdem weitere gesundheitsgefährdende Stoffe ablagern, wie beispielsweise polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, welche als kanzerogen gelten, bzw. Schwermetalle⁹². Da die „Transportpartikel“ beim Einatmen nicht gefiltert werden, gelangen auch diese Schadstoffe ungehindert in den Körper⁹⁴. Dadurch kann es zu entzündlichen Reaktionen kommen, die auf

⁸⁹ Schneider et al., 2018, Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland, vgl. S. 55

⁹⁰ Peters et al., 2019, Die Rolle der Luftschadstoffe für die Gesundheit, vgl. S. 4

⁹¹ Vortrag - Prenner et al. (2021) vom 06.12.2021

⁹² Deutscher Bundestag, 2018, Ultrafeinstaub, vgl. S. 5-6

⁹³ Ebd. vgl. 5, zitiert nach Cohen, A. J. et al (2004) in WHO „comparative Quantification of Health Risks“

⁹⁴ Ebd. vgl. 6

lange Sicht das Immunsystem schwächen können⁹⁵. Laut Deutschem Bundestag können dadurch „Chronische Lungenerkrankungen wie Bronchitis, Asthma oder COPD (chronisch obstruktive Lungenerkrankung, engl.: chronic obstructive pulmonary disease) [...] begünstigt werden, das Risiko für Lungenkrebs steigt.“⁹⁶

Ultrafeinstaub, also Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser von kleiner 0,1 µm, kann „sogar in Bindegewebe, Lymphknoten und in die Blutbahn vordringen.“⁹⁷ Des Weiteren konnte in einer Studie des Helmholtz Zentrums München nachgewiesen werden, dass Feinstaubexposition in Zusammenhang mit der Entwicklung von Typ-2-Diabetes steht⁹⁸.

4 Prognosen

Ziel dieser Arbeit ist es, die durch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte zu erwartenden Emissionen mittels Prognose der Fahrleistung und des Kfz-Bestandes bis zum Jahr 2040 zu berechnen. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse der Prognosen sind nur ungefähre Werte. Die Ergebnisse sind nicht gerundet, die genauen Zahlen sollen jedoch keine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen, sondern nur als ungefähre Richtwerte dienen.

4.1 Prognosen motorisierter Individualverkehr

Der Pkw-Bestand in Österreich hat seit 2000 von 4,1 Mio. Pkw⁹⁹ um 25% auf 5,13 Mio. Pkw im Jahr 2021 zugenommen. Der genaue Verlauf des Pkw-Bestandes in Österreich ist in Diagramm 4.1 dargestellt. Im Vergleich dazu stieg die Bevölkerungszahl um 11,50%. Die Motorisierung nahm um 12,38% von 511 Pkw pro 1000 Einwohner auf 575 Pkw pro 1000 Einwohner zu. Die Entwicklung des Bevölkerungswachstums und des Motorisierungsgrads sind in Diagramm 4.2 und Diagramm 4.3 dargestellt.

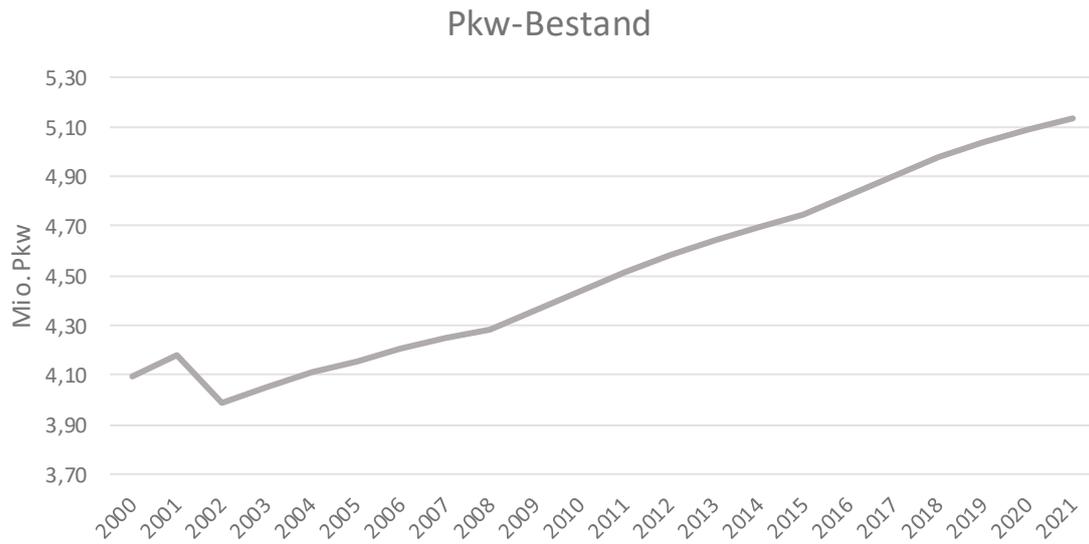
⁹⁵ Peters et al., 2019, Die Rolle der Luftschadstoffe für die Gesundheit vgl. S. 2

⁹⁶ Deutscher Bundestag, 2018, Ultrafeinstaub, S. 6

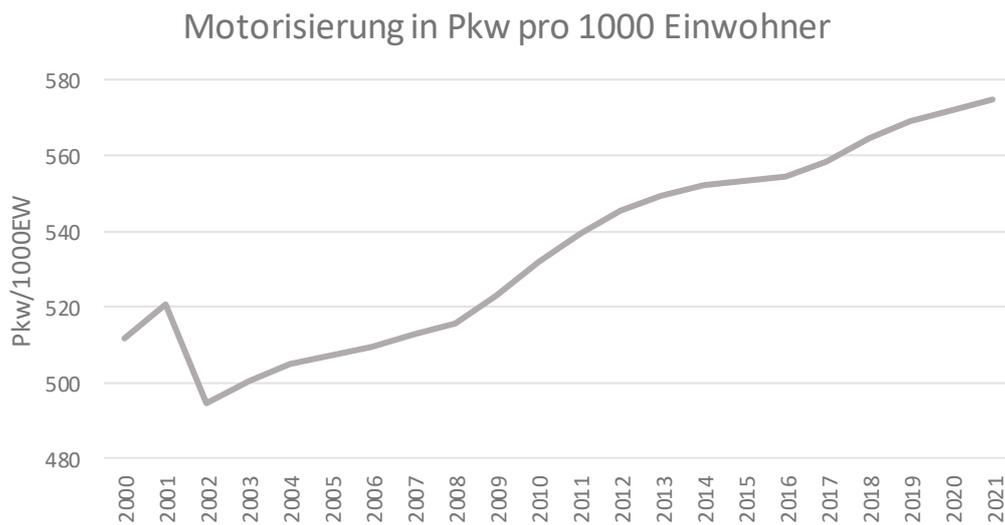
⁹⁷ Vgl. ebd. 5

⁹⁸ Deutscher Bundestag, 2018, Ultrafeinstaub, vgl. S. 6-7

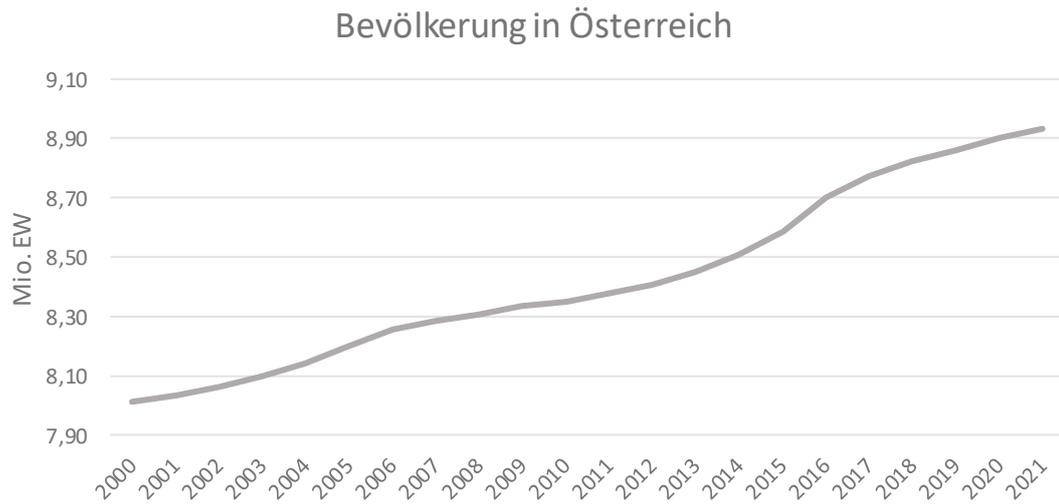
⁹⁹ WKO, 2021, WKO Statistik Kraftfahrzeuge

Diagramm 4.1: Österreichischer Pkw-Bestand seit 2000¹⁰⁰

Der Motorisierungsgrad wurde mittels Division des Pkw-Bestandes durch die jeweilige Bevölkerungszahl in diesem Jahr berechnet.

Diagramm 4.2: Motorisierung in Österreich seit 2000

¹⁰⁰ STATISTIK AUSTRIA, o.J., Kraftfahrzeuge Bestand

Diagramm 4.3: Bevölkerung in Österreich^{101, 102}

4.1.1 Prognose des Pkw-Bestandes, des Motorisierungsgrades und der Bevölkerung

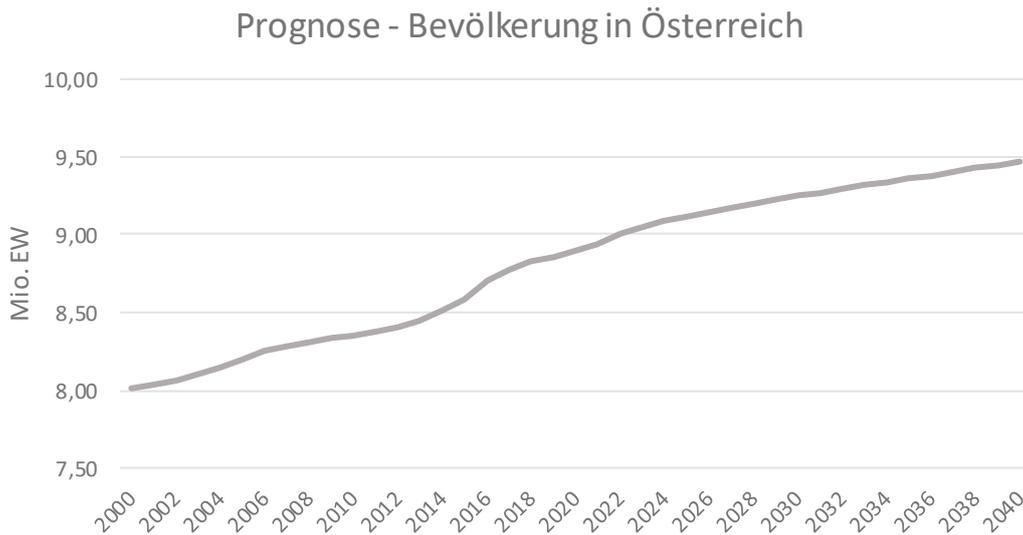
Ausgehend vom wachsenden Motorisierungsgrad und der steigenden Bevölkerungszahl wird in dieser Arbeit von einer Zunahme des Pkw-Bestandes ausgegangen.

Laut einer Hochrechnung von Statistik Austria¹⁰³ steigt die Bevölkerungszahl bis 2030 auf 9,25 Mio. Einwohner, dies entspricht einem Anstieg von 3,56%. Bis 2040 steigt die Zahl um weitere 2,37% auf 9,47 Mio. Einwohner. Die Prognose des Bevölkerungswachstums bis zum Jahr 2040 ist in Diagramm 4.4 dargestellt.

¹⁰¹ STATISTIK AUSTRIA, 2021, Bevölkerung

¹⁰² STATISTIK AUSTRIA, 2022, Bevölkerung nach Art und Geschlecht, erstellt am 15.02.2022

¹⁰³ STATISTIK AUSTRIA, 2021, Bevölkerungsprognose 2021, erstellt am 10.11.2021

Diagramm 4.4: Prognose des Bevölkerungswachstums in Österreich^{103,103}

Unter der Annahme, dass der Motorisierungsgrad ähnlich steigt wie die Bevölkerungszahl, werden in Tab. 4.1 die prozentuellen Zunahmen berechnet. Die Differenzen der prozentuellen Zunahmen der Bevölkerungszahl und des Motorisierungsgrades wird mit Hilfe der Differenz der prozentuellen Zunahmen von 2000 bis 2021 berechnet gemäß Formel (1) und (2).

$$\text{Differenz der Zunahmen bis 2030} = \frac{0,88\%}{11,50\%} * 3,56\% = 0,27\% \quad (1)$$

$$\text{Differenz der Zunahmen bis 2040} = \frac{0,88\%}{11,50\%} * 2,37\% = 0,18\% \quad (2)$$

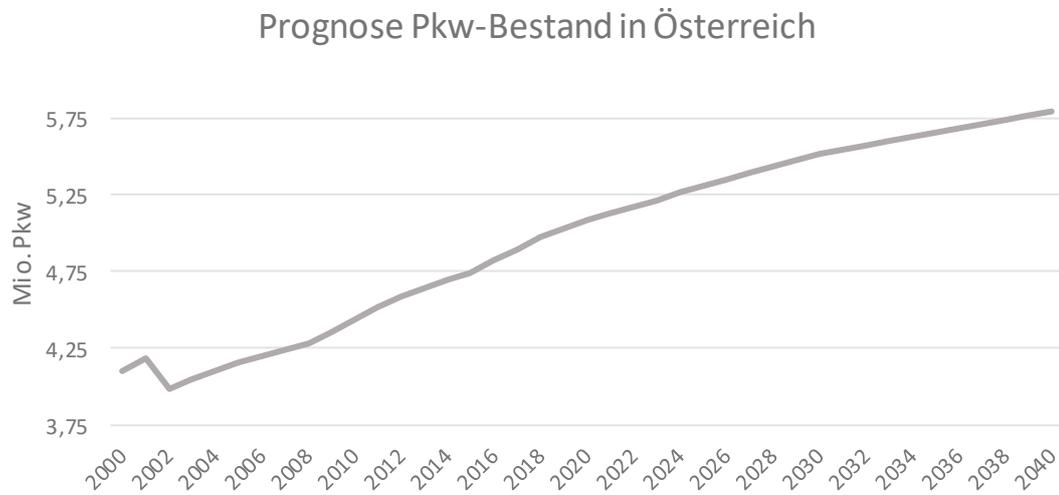
Tab. 4.1: Zunahme der Bevölkerungszahl und des Motorisierungsgrad

	Zunahme 2000 bis 2021	Zunahme bis 2030	Zunahme bis 2040
Bevölkerungszahl	11,50%	3,56%	2,37%
Differenz	0,88%	Ann.: 0,27%	Ann.: 0,18%
Motorisierungsgrad	12,38%	Ann.: 3,83%	Ann.: 2,55%
in %			
Motorisierungsgrad	575 Pkw/1000 EW	597 Pkw/1000 EW	612 Pkw/1000 EW

Mit Hilfe der Berechnungen in Tab. 4.1 kann nun der Motorisierungsgrad berechnet werden. Dieser ergibt für das Jahr 2030 597 Pkw pro 1000 Einwohner und für das Jahr 2040 612 Pkw pro 1000 Einwohner. Die Werte für die Jahre zwischen 2021 und 2030 und zwischen 2030 und 2040 werden linear hochgerechnet. Daraus wird nun eine Prognose für den Pkw-Bestand rückgerechnet. Für das Jahr 2030 ergibt sich somit ein prognostizierter Pkw-Bestand von 5,52 Mio. Pkw und für das Jahr 2040 von 5,80 Mio. Pkw. Die Bestände für die Jahre zwischen 2021

und 2030 und zwischen 2030 und 2040 werden linear hochgerechnet. Der prognostizierte Pkw-Bestand bis 2040 ist in Diagramm 4.5 dargestellt.

Diagramm 4.5: Prognose des Pkw-Bestands in Österreich



4.1.2 Prognose der Pkw - Fuhrparkzusammenstellung

Der Pkw-Bestand aufgeteilt nach Antriebsart ist in Diagramm 4.6 und Diagramm 4.7 dargestellt. Für eine vereinfachte Berechnung werden die klimaneutralen Antriebsarten Elektro und Brennstoffzelle zusammengefasst. Im Jahr 2021 gab es insgesamt 55 Fahrzeuge mit Brennstoffzelle und 76.539 Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Diagramm 4.6: Pkw-Bestand Benzin und Diesel 2004-2021¹⁰⁰

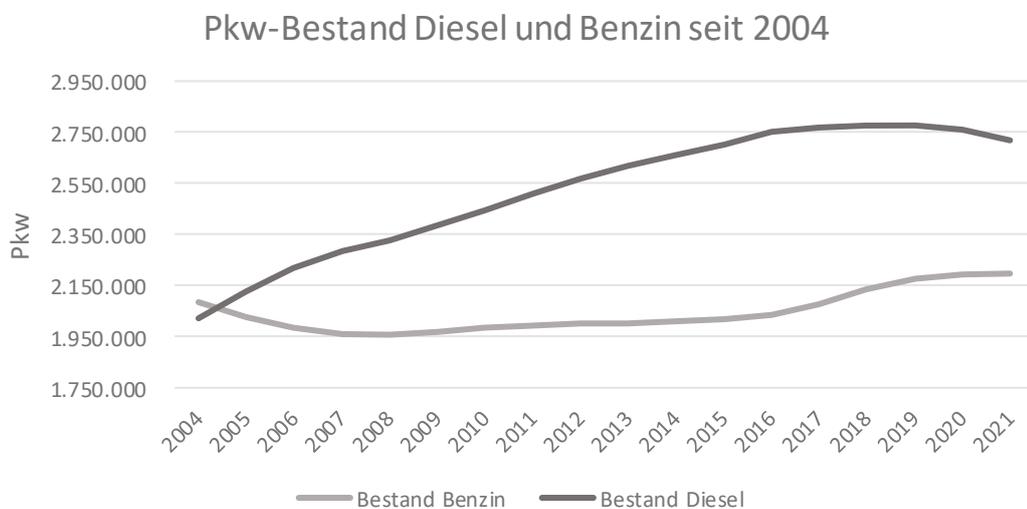
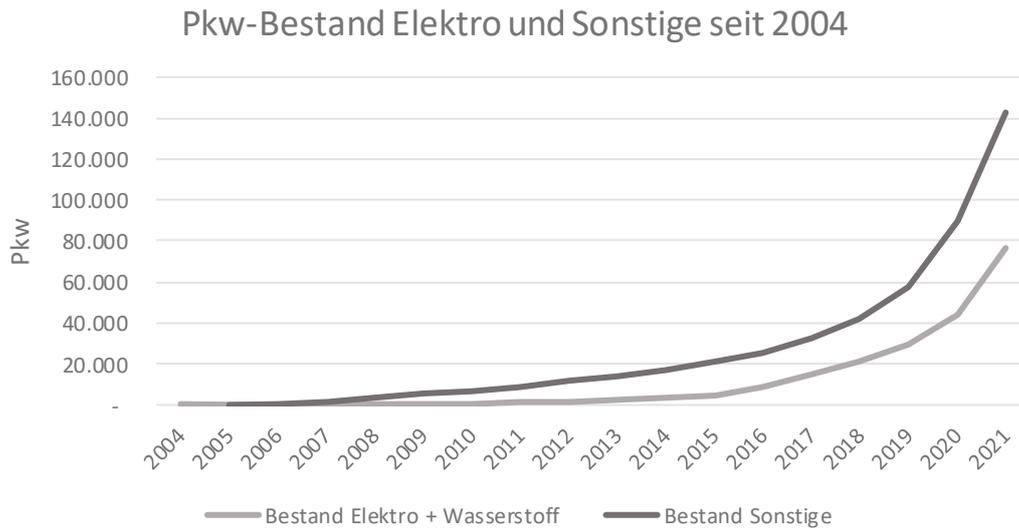


Diagramm 4.7: Pkw-Bestand Elektro + Wasserstoff und Sonstige 2004-2021¹⁰⁰

Gemäß Kap. 2.1 soll ab dem Jahr 2040 der gesamte Pkw-Fuhrpark aus Elektrofahrzeugen bzw. Kraftfahrzeugen mit klimaneutralem Antrieb bestehen. Der ÖAMTC hat im Expertenbericht Mobilität & Klimaschutz 2030¹⁰⁴ für ein Szenario, welches regulative Maßnahmen vorsieht, prognostiziert, dass der Anteil an Fahrzeugen mit Elektro- und Brennstoffzellenantrieb 32% betragen muss, damit dieses Ziel für 2040 erreicht werden kann. Der Anteil von Hybrid- und sonstigen Antrieben ergibt laut ÖAMTC 21%. Die restlichen 47% werden in Anlehnung an das Verhältnis von Diesel- zu Benzinfahrzeugen in den Jahren 2004 bis 2021 auf Fahrzeuge mit Diesel- und Benzinantrieb aufgeteilt, dies ergibt einen Anteil an Dieselfahrzeugen von 27% und einen Anteil an Benzinfahrzeugen von 20%.

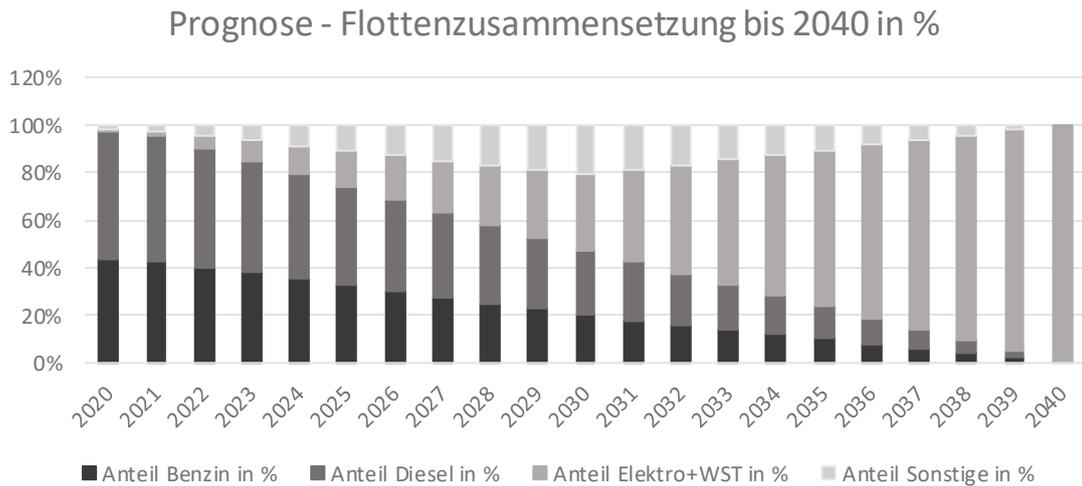
Tab. 4.2: Anteile der einzelnen Antriebsarten am Gesamtbestand im Jahr 2030¹⁰⁴

Antriebsart	Benzin	Diesel	Elektro + WST	Sonstige
Anteil in Prozent	20%	27%	32%	21%

Im Jahr 2040 nehmen die Anteile benzin- und dieselpetriebener sowie sonstiger Fahrzeuge weiter ab bis auf 0% und der Anteil der Elektro- und Wasserstofffahrzeuge zu auf 100%. Die Werte für die Jahre zwischen 2021 bis 2030 und 2030 bis 2040 werden linear hochgerechnet, die prozentuelle Aufteilung des Fuhrparks bis 2040 ist in Diagramm 4.8 dargestellt.

¹⁰⁴ ÖAMTC, 2018, Expertenbericht Mobilität & Klimaschutz 2030, vgl. S. 69

Diagramm 4.8: Prognose der Aufteilung des österreichischen Fuhrparks bis 2040



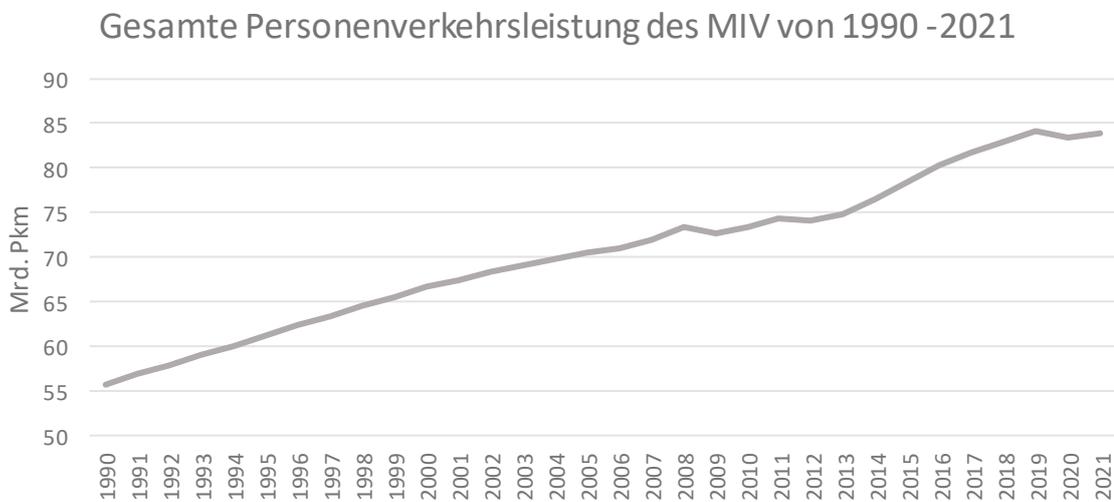
4.1.3 Prognose der Pkw - Fahrleistung

Um Abgas- und Nicht-Abgasemissionen für die nächsten 20 Jahre quantifizieren zu können, muss des Weiteren die Fahrleistung prognostiziert werden. Dies wird mittels zwei unterschiedlicher Varianten durchgeführt.

Variante 1 - Berechnung nach Mobilitätsmasterplan 2030

Die in Österreich gesamt zurückgelegten Personenkilometer sind seit 1990 um 49% gestiegen und in Diagramm 4.9 dargestellt.

Diagramm 4.9: Fahrleistung 1990 - 2021¹



Für Variante 1 wird die Fahrleistung auf Basis des Mobilitätsmasterplans 2030 prognostiziert. Für das Jahr 2040 wird laut Mobilitätsmasterplan 2030 eine Fahrleistung von

62 Mrd. Pkm⁷ angenommen. Um die Fahrleistung bis 2040 zu berechnen, wird mangels vorhandener Daten die Fahrleistung bis 2021 geschätzt. Hier wird eine plausible prozentuelle Änderung anhand der Änderungen von Vorjahren unter Berücksichtigung der Abnahme der Fahrleistung aufgrund der Coronapandemie angenommen. Die Berechnung wird in Tab. 4.3 näher erläutert.

Tab. 4.3: Zunahme Bevölkerung und Motorisierungsgrad von 2018 bis 2021

Jahr	Fahrleistung in Pkm	Prozentuelle Veränderung
2018	83,00 Mrd. ¹	+1,467
2019	84,16	Ann.: +1,400
2020	83,49	Ann.: -0,800
2021	83,82	Ann.: +0,400

Für 2021 ergibt dies eine Fahrleistung von ca. 83,82 Mrd. Pkm. Für die Jahre zwischen 2021 und 2040 wird eine lineare Abnahme der Fahrleistung angenommen. Die Prognose der Fahrleistung bis 2040 ist in Diagramm 4.10 dargestellt. Die Prognose der jährlichen pro Kopf Fahrleistung in Österreich kann Diagramm 4.11 entnommen werden. Diese sinkt von ca. durchschnittlich 9.400 km pro Jahr auf ca. 6.500 km. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 30,2%. Hier gilt anzumerken, dass eine Reduktion der Personenverkehrsleistung mit Personenkraftwagen gleichsam eine Verlagerung auf andere Verkehrsträger bedeutet und die dadurch wiederum steigenden Emissionen dieses Verkehrsträgers in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Diagramm 4.10: Prognose der Personenverkehrsleistung des MIV (Pkw) in Österreich bis 2040 nach Variante 1

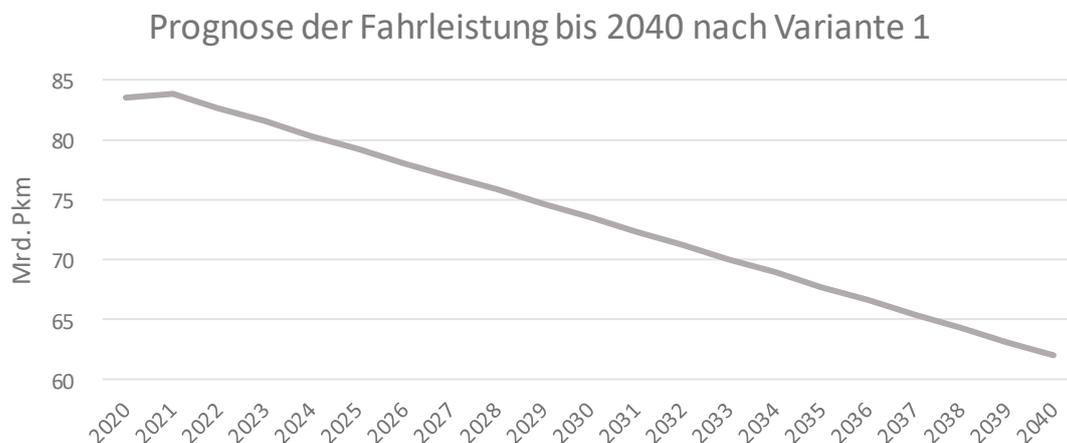
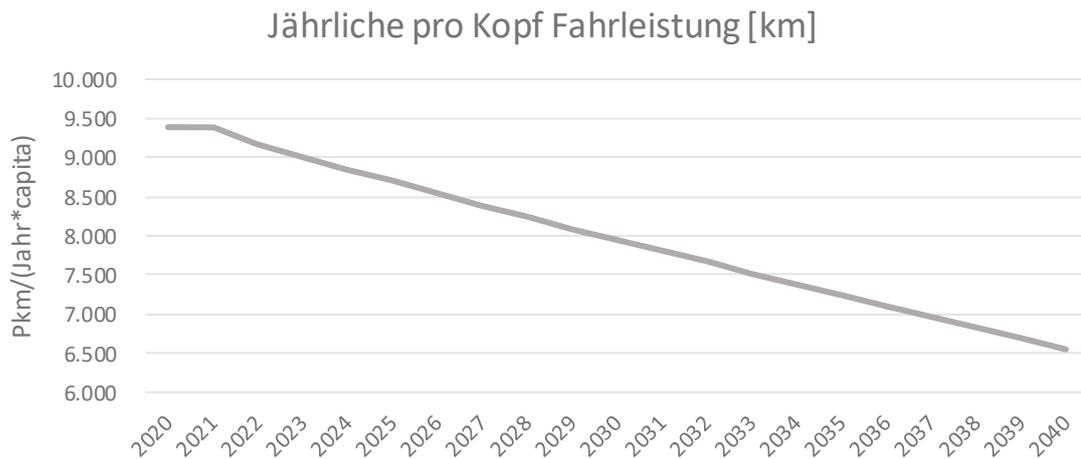


Diagramm 4.11: Jährliche pro Kopf Fahrleistung (Pkw) bis 2040 nach Variante 1

Variante 2 – „Business as usual“ mit Berechnung nach der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung nach Antriebsart

Das Österreichische Umweltbundesamt hat die durchschnittliche Fahrleistung pro Jahr und Pkw nach Antriebsart für das Bezugsjahr 2019 ermittelt⁸⁰. Die Daten beziehen sich auf ein „Normalfahrzeug“. Demnach legt ein Pkw mit Benzinantrieb 10.300 km pro Jahr zurück, ein Pkw mit Dieselantrieb 16.800 km und ein Elektrofahrzeug 14.900 km. Dabei ist die Zusammensetzung des Strommix für die durchschnittliche jährliche Fahrleistung nicht von Bedeutung⁸⁰. Um ein Ergebnis für die Fahrleistung von Fahrzeugen mit sonstigen Antrieben zu erhalten, werden die oben angeführten Werte gemittelt, dies ergibt eine Fahrleistung von durchschnittlich 14.000 km pro Jahr.

Um die Berechnungen vergleichbar zu machen, werden diese Werte unter Berücksichtigung des Besetzungsgrades von 1,14 Personen pro Pkw⁵⁷ in Personenkilometer umgerechnet. Die jeweiligen Fahrleistungen in Personenkilometern sind in Tab. 4.4 zusammengefasst.

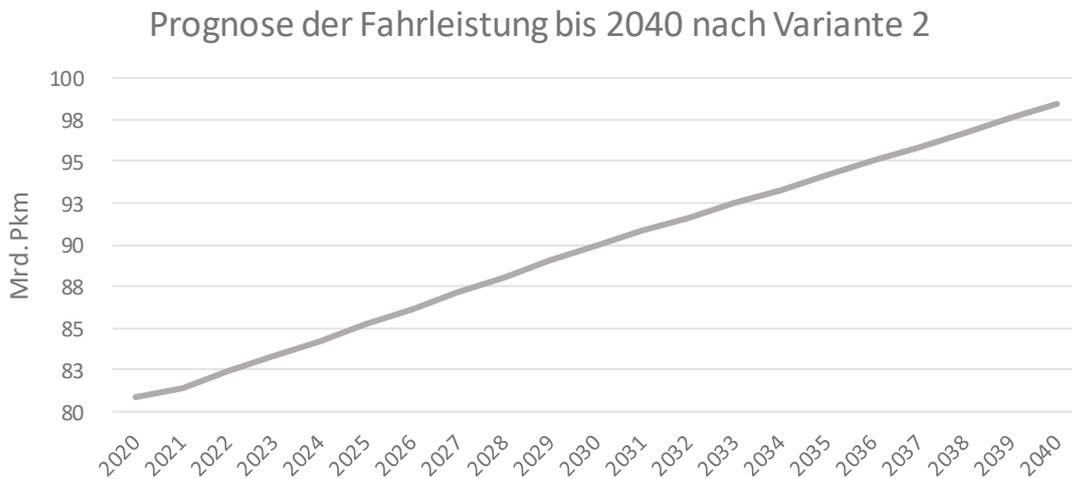
Tab. 4.4: Durchschnittliche jährliche Fahrleistung in Personenkilometern nach Antriebsart⁸⁰

Jahr	Antriebsart	Fahrleistung in Pkm
2019	Benzin	11.742
2019	Diesel	19.152
2019	Elektro	16.986
2019	Sonstige	15.960

Die in Tab. 4.4 angeführten Fahrleistungen werden mit den in Kap. 4.1.2 berechneten Beständen der unterschiedlichen Antriebsarten multipliziert und aus diesen antriebsspezifischen Fahrleistungen die Summe gebildet. Dies ergibt für das Jahr 2040 eine prognostizierte Fahrleistung von ca. 98,45 Mrd. Personenkilometern, um 58,79% mehr als die

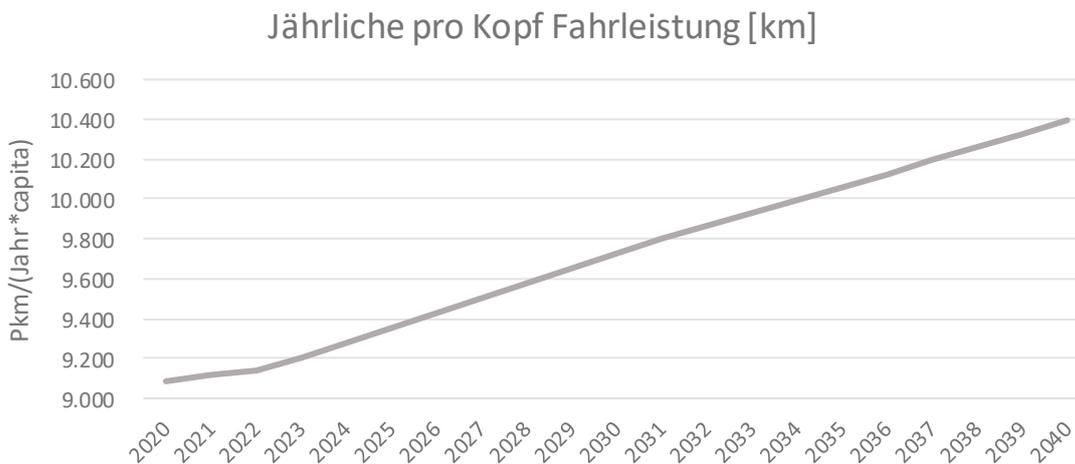
im Mobilitätsmasterplan 2030 für das Jahr 2040 angesetzte Personenfahrleistung des MIV. Der Verlauf der prognostizierten Fahrleistung ist in Diagramm 4.12 dargestellt.

Diagramm 4.12: Prognose der Fahrleistung in Personenkilometer bis 2040



Die durchschnittliche jährliche pro-Kopf-Fahrleistung steigt nach Berechnungsvariante 2 von ca. 9.100 km auf ca. 10.400 km. Dies entspricht einer Zunahme von ca. 14,4%.

Diagramm 4.13: Jährliche pro Kopf Fahrleistung in Österreich bis 2040



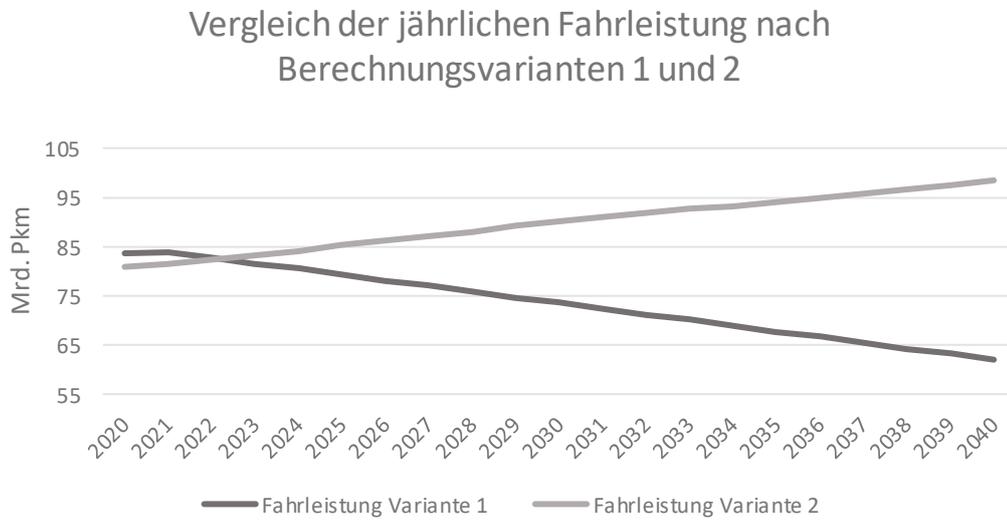
4.1.4 Vergleich Variante 1 und Variante 2

In Variante 1 wird von dem Ziel, die Fahrleistung bis 2040 auf 62 Mrd. Personenkilometern zu senken, ausgegangen. Dies ist laut Mobilitätsmasterplan 2030 mit begleitenden regulativen Maßnahmen und einem Gesamtkonzept für den Verkehrssektor möglich¹⁰⁵. Variante 2 bezieht

¹⁰⁵ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 48-52

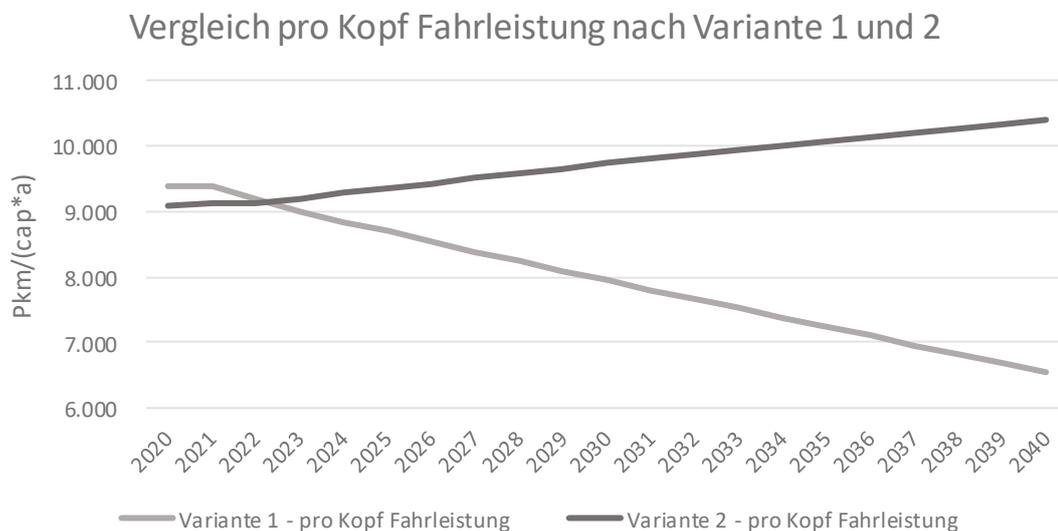
sich auf eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung mit Bezugsjahr 2019⁸⁰. Die gesamte Fahrleistung in Personenkilometer in Österreich wird mittels dieser Zahlen hochgerechnet unter der Annahme, dass diese bis 2040 konstant bleiben. Beide Verläufe der Fahrleistung sind zum Vergleich in Diagramm 4.14 dargestellt.

Diagramm 4.14: Vergleich der jährlichen Fahrleistung nach Berechnungsvarianten 1 und 2



Die durchschnittliche jährliche pro Kopf Fahrleistung beider Varianten unterscheidet sich im Jahr 2040 um 58,8%. Der Verlauf beider pro Kopf Fahrleistungen ist in Diagramm 4.15 dargestellt.

Diagramm 4.15: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen pro Kopf Fahrleistung nach Berechnungsvariante 1 und 2



4.2 Prognose der Emissionen pro Personenkraftfahrzeug

Die EU-CO₂-Zielwertvorgaben wurden in den letzten Jahren stark gesenkt²⁴. Das Emissionsziel für 2021 betrug 95 g CO₂/km¹⁰⁶. Diese Flottengrenzwerte beziehen sich allerdings auf die gemittelten CO₂-Emissionen aller in der EU in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge. Einzelne Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor können daher einen höheren CO₂-Ausstoß aufweisen¹⁰⁷. Für die Berechnungen in Kap. 5 wird daher davon ausgegangen, dass die Emissionswerte für CO₂ bei Kraftfahrzeugen ohne klimaneutralem Antrieb bis 2040 konstant bleiben.

4.3 Prognose des Lkw-Fuhrparks

Im Mobilitätsmasterplan 2030 wurde mittels Backcasting der Zeitpunkt von klimaneutralem Neuzulassungen rückgerechnet. Die Berechnungen ergaben, dass sämtliche Neuzulassungen von schweren Nutzfahrzeugen mit einem Gesamtgewicht von weniger als 18 Tonnen ab 2030 klimaneutral sein müssen, ab 2035 gilt dies für Lastkraftfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von über 18 Tonnen¹⁰⁸ und ab 2030 für leichte Nutzfahrzeuge mit weniger als 3,5 Tonnen Gesamtgewicht¹⁰⁹.

Im Jahr 2021 waren mit Stichtag 31. Dezember 567.860 Nutzfahrzeuge in Österreich zugelassen¹¹⁰. Der Großteil mit 493.387 davon waren Nutzfahrzeuge der Klasse N1 (< 3,5 t Gesamtgewicht). Unter der Annahme, dass eine zusätzliche Transportleistung von anderen Verkehrsträgern aufgenommen werden kann und daher keine Zunahme des Lkw-Bestandes notwendig ist, wird für das Jahr 2040 ein Lkw-Bestand von ca. 570.000 Lkw angenommen. Für eine vereinfachte Berechnung und aufgrund mangelnder Emissionsdaten wird außerdem angenommen, dass sämtliche im Jahr 2021 zugelassenen Sattelzüge bis 2040 von Lastkraftwagen der Klasse N3 ersetzt werden. Die Zusammenstellung des Lkw-Fuhrparks bis 2040 ist in Diagramm 4.16 dargestellt.

¹⁰⁶ BMK, o.J., Mobilität – CO₂-Monitoring von Personenkraftwagen

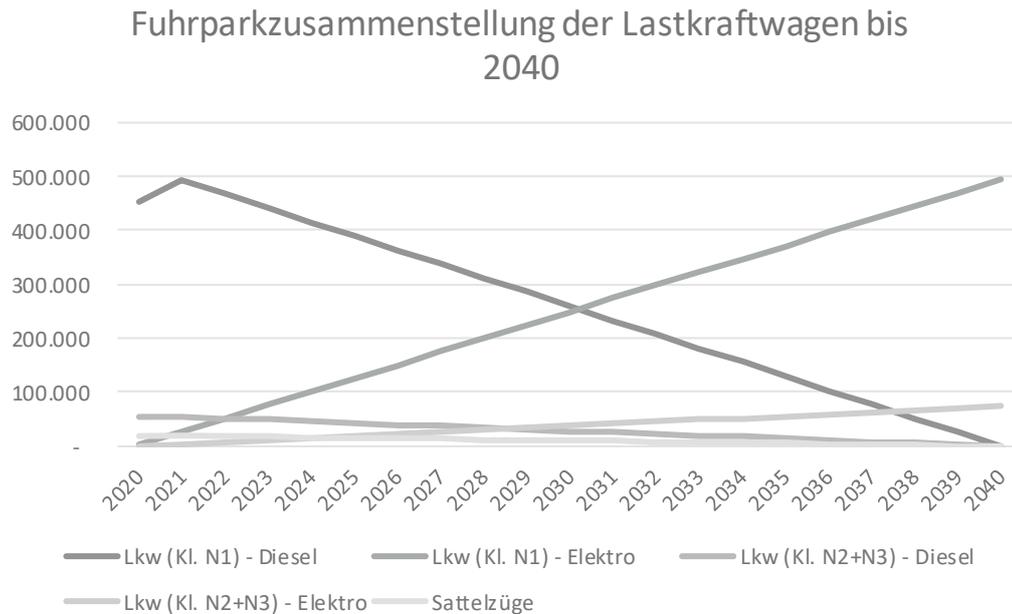
¹⁰⁷ BMU (D), 2020, Das System der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, vgl. S.

1

¹⁰⁸ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 41

¹⁰⁹ Vgl. ebd. 37

¹¹⁰ STATISTIK AUSTRIA, Kraftfahrzeuge – Bestand, Fahrzeugbestand am 31. Dezember 2021

Diagramm 4.16: Prognose der Fuhrparkzusammenstellung der Lastkraftwagen bis 2040

4.4 Prognose der Güterverkehrsleistung

Laut Mobilitätsmasterplan 2030 soll die Güterverkehrsleistung auf der Straße bis 2040 von 60 Mrd. Tonnenkilometer auf ca. 59 Mrd. Tonnenkilometer abnehmen mit gleichzeitiger Zunahme des Transports von Gütern auf der Schiene von 23 auf 35 Mrd. Tonnenkilometer. Der Transport von Gütern auf dem Wasserweg wird nach dieser Berechnung annähernd gleich bleiben bei ca. 2,5 Mrd. Tonnenkilometer¹¹¹.

4.5 Prognose des österreichischen Strommix

Da gemäß Kap. 2.2 ab dem Jahr 2030 der in Österreich verbrauchte Strom zu 100% aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt werden soll, wird für die Berechnungen der gesamten CO₂- und NO_x-Emissionen von Elektrofahrzeugen ab diesem Jahr ein geringerer Wert für die CO₂- und NO_x-Emissionen pro Personenkilometer angenommen. Diese werden den Daten des Österreichischen Umweltbundesamtes⁵⁷ entnommen und belaufen sich auf 45,5 g CO₂/Pkm bzw. 0,09 g NO_x/Pkm. Die CO₂- und NO_x-Emissionen von Elektrofahrzeugen in Abhängigkeit vom Strommix sind in Tab. 4.5 dargestellt.

Tab. 4.5: CO₂- und NO_x-Emissionen von Elektrofahrzeugen

Jahr	g CO ₂ /Pkm	g NO _x /Pkm
BEV – österreichische Stromaufbringung inkl. Importen	82,3	0,13

¹¹¹ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 12, Abb. 4

BEV – österreichischer Stromproduktionspark	75,1	0,12
BEV Ökostrom – Umweltzeichen 46 Strom	45,5	0,09

5 Berechnung der Pkw-bezogenen Emissionen bis 2040

5.1 Verwendete Berechnungsdaten

5.1.1 CO₂-Emissionen

Folgende Werte werden für die CO₂-Emissionen pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.1: Angesetzte CO₂-Emissionen in g/Pkm⁵⁷

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	220,00	205,20	82,30	102,63
Ab 2030	220,00	205,20	45,50	102,63

5.1.2 NO_x-Emissionen

Folgende Werte werden für die NO_x-Emissionen pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.2: Angesetzte NO_x-Emissionen in g/Pkm⁵⁷

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,26	0,86	0,13	0,21
Ab 2030	0,26	0,86	0,09	0,21

5.1.3 Feinstaubemissionen (exkl. Abrieb und Aufwirbelungen)

Folgende Werte werden für die Feinstaubemissionen pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.3: Angesetzte Feinstaubemissionen in g/Pkm⁵⁷

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,032	0,034	0,016	0,023
Ab 2030	0,032	0,034	0,016	0,023

5.1.4 Reifenabrieb

Folgende Werte werden für den Reifenabrieb pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.4: Angesetzter Reifenabrieb in g/Pkm²³

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,110	0,110	0,152	0,131
Ab 2030	0,110	0,110	0,152	0,131

5.1.5 PM_{0,1} Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert

Folgende Werte werden für die kraftstoffbedingten PM_{0,1}-Emissionen pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.5: Angesetzte PM_{0,1}-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,00139	0,00139	0,00156	0,00148
Ab 2030	0,00139	0,00139	0,00156	0,00148

Tab. 5.6: Angesetzte PM_{0,1}-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung in Variante 2

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,00139	0,00139	0,00154	0,00146
Ab 2030	0,00139	0,00139	0,00154	0,00146

5.1.6 PM_{1,0} Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert

Folgende Werte werden für die kraftstoffbedingten PM_{1,0}-Emissionen pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.7: Angesetzte PM_{1,0}-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,00174	0,00174	0,00195	0,00184
Ab 2030	0,00174	0,00174	0,00195	0,00184

Tab. 5.8: Angesetzte PM_{1,0}-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,00174	0,00174	0,00192	0,00183
Ab 2030	0,00174	0,00174	0,00192	0,00183

5.1.7 PM_{2,5} Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert

Folgende Werte werden für die kraftstoffbedingten PM_{2,5}-Emissionen pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.9: Angesetzte PM_{2,5}-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,01526	0,01526	0,01556	0,01541
Ab 2030	0,01526	0,01526	0,01556	0,01541

Tab. 5.10: Angesetzte PM_{2,5}-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,01526	0,01526	0,01530	0,01528
Ab 2030	0,01526	0,01526	0,01530	0,01528

5.1.8 PM₁₀ Emissionen aus Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung kumuliert

Folgende Werte werden für die kraftstoffbedingten PM₁₀-Emissionen pro Personenkilometer angesetzt:

Tab. 5.11: Angesetzte PM₁₀-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,02746	0,02746	0,02861	0,02803
Ab 2030	0,02746	0,02746	0,02861	0,02803

Tab. 5.12: Angesetzte PM₁₀-Emissionen in g/Pkm⁷¹ mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

Jahr	Benzin	Diesel	Elektro	Sonstige
Bis 2030	0,02746	0,02746	0,02813	0,02779
Ab 2030	0,02746	0,02746	0,02813	0,02779

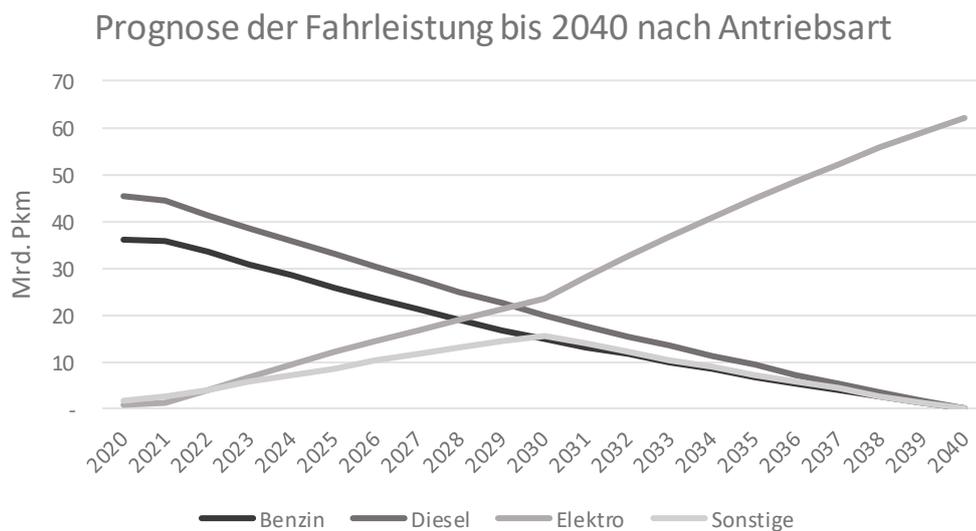
5.2 Ergebnisse

5.2.1 Ergebnisse der Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

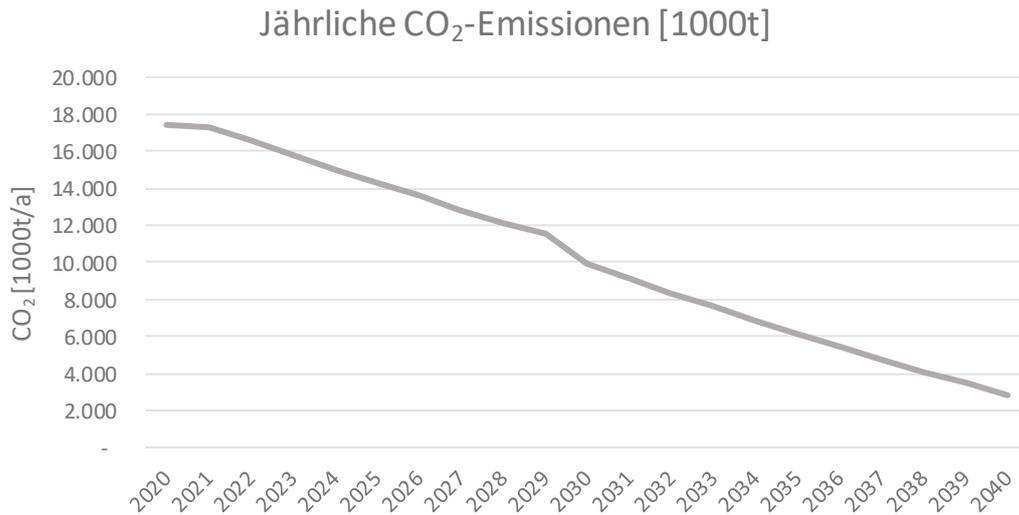
Durch die Verringerung der Fahrleistung des MIV auf ca. 62 Mrd. Personenkilometern und die gleichzeitige Elektrifizierung bis zum Jahr 2040, können die Abgasemissionen reduziert werden. Die Verläufe sind aufgrund der Linearität der Abnahme der Verkehrsleistung und dem Fortschreiten der Elektrifizierung bis 2040 ebenso linear. Für die Berechnung der jährlichen gesamten Abgasemissionen wird die in Kap. 4.1.3 prognostizierte Fahrleistung mit den Ergebnissen der Fuhrparkzusammenstellung in Diagramm 4.8 multipliziert, um die jeweilige Fahrleistung nach Antriebsart zu erhalten. Diese Ergebnisse werden mit den Emissionswerten

pro Kilometer gemäß Kap. 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3 berechnet. Die Berechnungen beziehen sich auf Personenkilometer, es wird von einem Besetzungsgrad von 1,14 Personen pro Pkw ausgegangen. Die Prognose der Fahrleistung nach Antriebsart ist in Diagramm 5.1 dargestellt. Da die Berechnungsvariante 1 vorsieht, dass der Anteil an Fahrzeugen mit sonstigem Antrieb noch bis 2030 zunimmt und danach sukzessive durch Elektrofahrzeuge ersetzt wird, nimmt auch die Fahrleistung bis 2030 zu und sinkt anschließend bis 2040 auf null. Die Fahrleistung von Benzin- und Dieselfahrzeugen nimmt bis 2040 linear ab, während die Fahrleistung von Elektrofahrzeugen bis 2040 linear auf die im Mobilitätsmasterplan 2030 angesetzten 62,0 Mrd. Personenkilometer steigt.

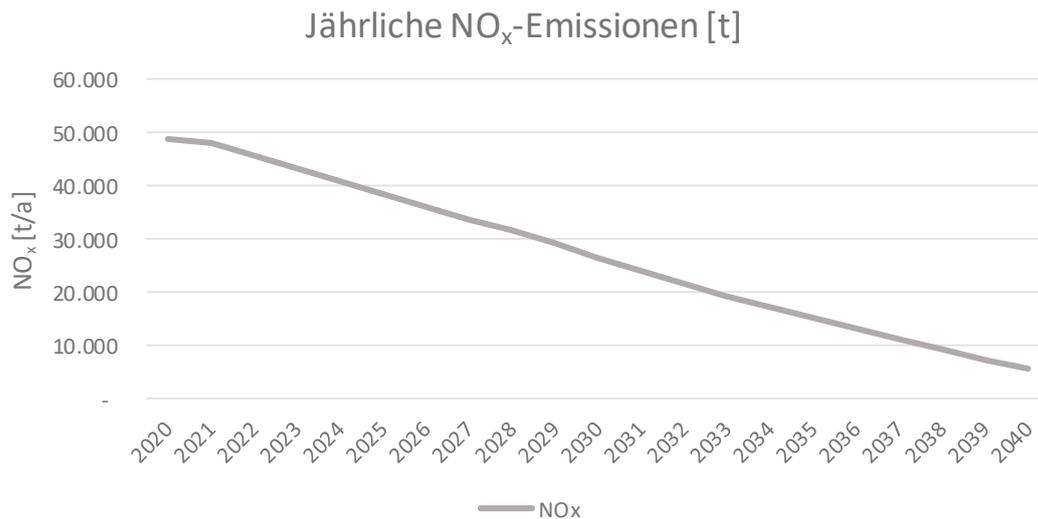
Diagramm 5.1: Prognose der Fahrleistung bis 2040 untergliedert nach Antriebsart



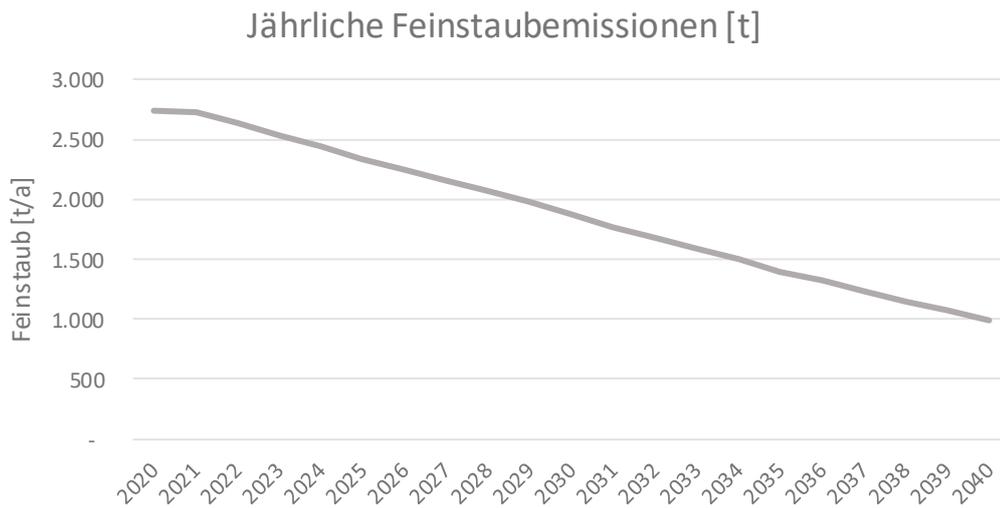
Die jährlichen CO₂-Emissionen im Jahr 2040 betragen in etwa 2,82 Mio. t CO₂ pro Jahr. Im Vergleich zu ca. 17,4 Mio. t CO₂-Emissionen im Jahr 2020 ergibt dies eine Reduktion von 83,8%.

Diagramm 5.2: Prognose der jährlichen CO₂-Emissionen [1000t]

Die jährlichen Stickstoffemissionen können durch Verringerung der Fahrleistung und Elektrifizierung der Fahrzeugflotte bis 2040 von ca. 48.700 t NO_x-Emissionen um ca. 88,5% reduziert werden und betragen im Jahr 2040 ca. 5.600 t NO_x.

Diagramm 5.3: Prognose der jährlichen NO_x-Emissionen [t]

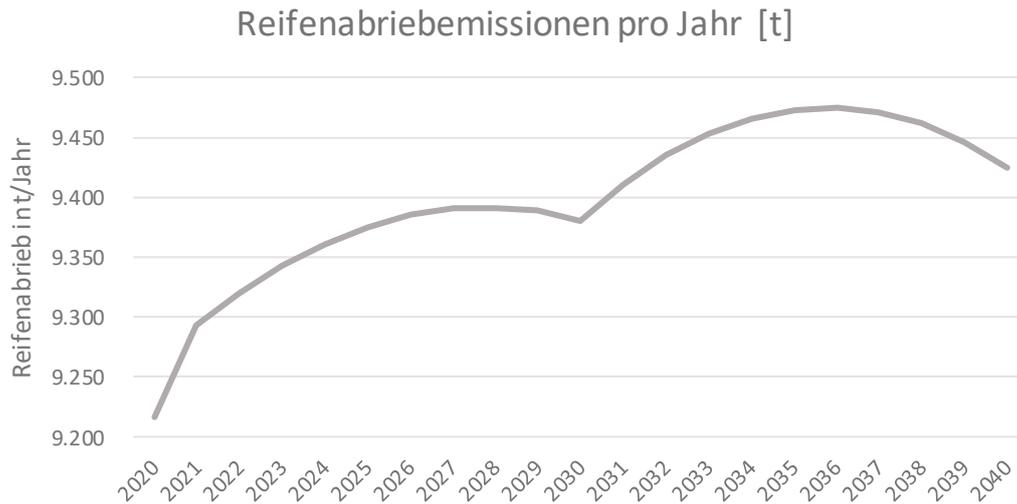
Auch die Feinstaubemissionen exkl. Abrieb und Aufwirbelung nehmen nach dieser Prognose bis 2040 linear um 63,8% ab und belaufen sich im Jahr 2040 auf 992 t, während sie im Jahr 2020 noch bei ca. 2.737 t lagen.

Diagramm 5.4: Prognose der jährlichen Feinstaubemissionen [t]

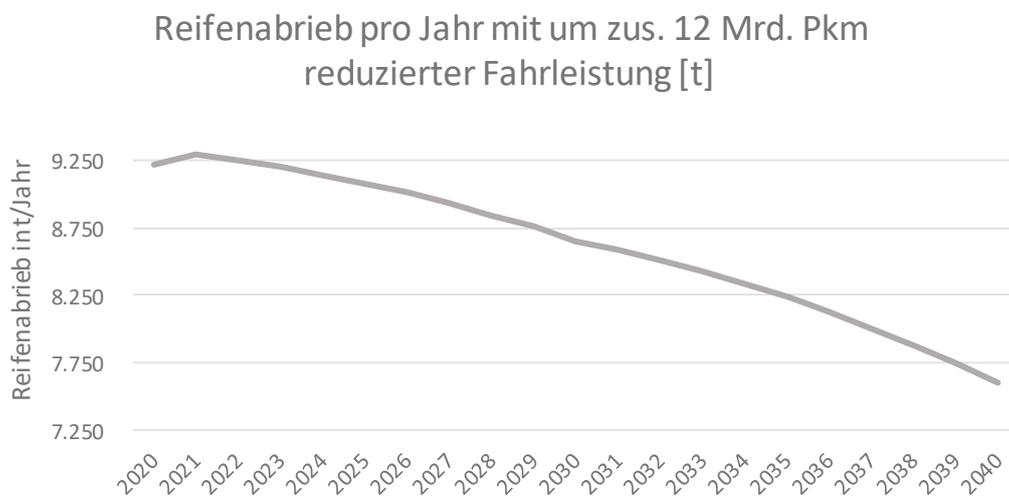
5.2.2 Ergebnisse der Nicht-Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

Für die Berechnung der jährlichen Nicht-Abgasemissionen wird gemäß Diagramm 5.1 die jeweilige Fahrleistung nach Antriebsart berechnet und diese mit den Emissionswerten pro Personenkilometer gemäß Tab. 5.4 bis Tab. 5.11 multipliziert.

Der Verlauf des jährlichen Reifenabriebs unterscheidet sich hierbei von den restlichen Verläufen der Abgas- und Nicht-Abgasemissionen. Bis zum Jahr 2029 nimmt der jährliche Reifenabrieb zu, danach sinkt dieser wieder bis zum Jahr 2030 und steigt ab 2031 wieder. Im Jahr 2040 liegt der Wert des Reifenabriebs über jenem von 2020. Bis 2040 steigt der Reifenabrieb mit Bezugsjahr 2020 um 2,26%, mit Bezugsjahr 2030 um 4,71%. Ein Grund für den erneuten Anstieg könnte sein, dass ab 2030 der Anteil der Elektrofahrzeuge erstmals überwiegt. Durch den um 38,6% höheren Reifenabrieb von Elektrofahrzeugen (bezogen auf den Reifenabrieb von Benzin- bzw. Dieselfahrzeugen) und den ab 2030 höheren Anteil der Verkehrsleistung, nimmt der Reifenabrieb ab diesem Zeitpunkt erneut zu.

Diagramm 5.5: Prognose des Reifenabriebs pro Jahr [t]

Damit der jährliche Reifenabrieb einen ähnlichen Verlauf aufweist wie die restlichen in diesen Berechnungen betrachteten Emissionen, müsste die Fahrleistung um weitere 12 Mrd. Personenkilometer auf 50 Mrd. bis zum Jahr 2040 reduziert werden. Der Verlauf dieses jährlichen Reifenabriebs kann Diagramm 5.6 entnommen werden. Hierbei könnte der Reifenabrieb bis 2040 um ca. 17,5% reduziert werden mit Basisjahr 2020.

Diagramm 5.6: Jährlicher Reifenabrieb bei einer Reduktion der Fahrleistung auf 50 Mrd. Pkm

Die gesamten jährlichen PM_{0,1}- bis PM₁₀-Emissionen aus dem Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und den Aufwirbelungen können durch die Reduktion der Fahrleistung verringert werden. Die PM_{0,1}- und PM_{1,0}-Emissionen nehmen bis zum Jahr 2040 um jeweils 16,7% ab, die PM_{2,5}-Emissionen um 24,3% und die PM₁₀-Emissionen um 22,7%.

Diagramm 5.7: Prognose der PM0,1-Emissionen pro Jahr [t]

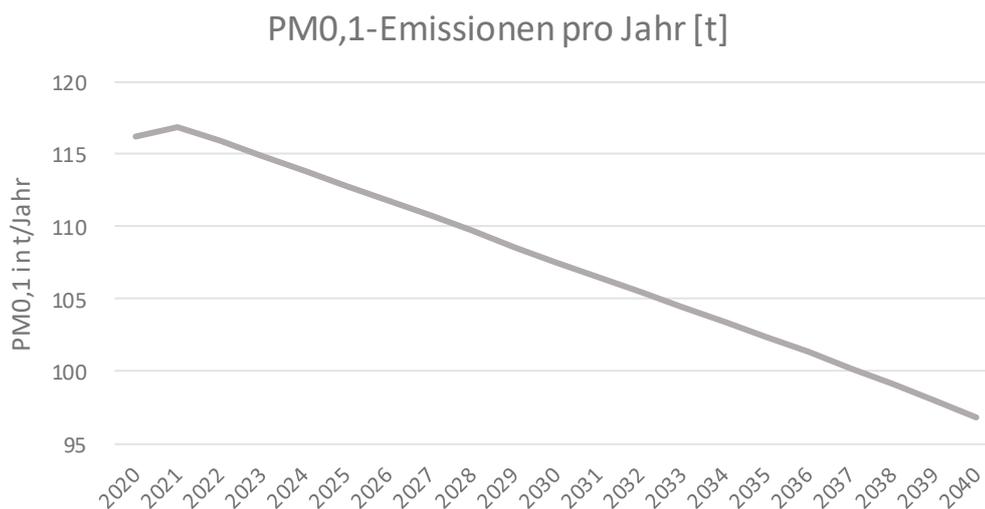


Diagramm 5.8: Prognose der PM1,0-Emissionen pro Jahr [t]

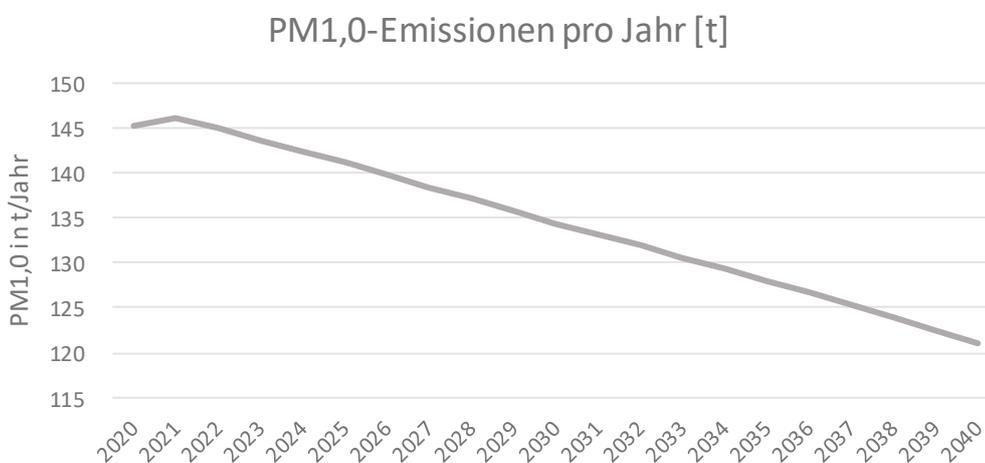


Diagramm 5.9: Prognose der PM2,5-Emissionen pro Jahr [t]

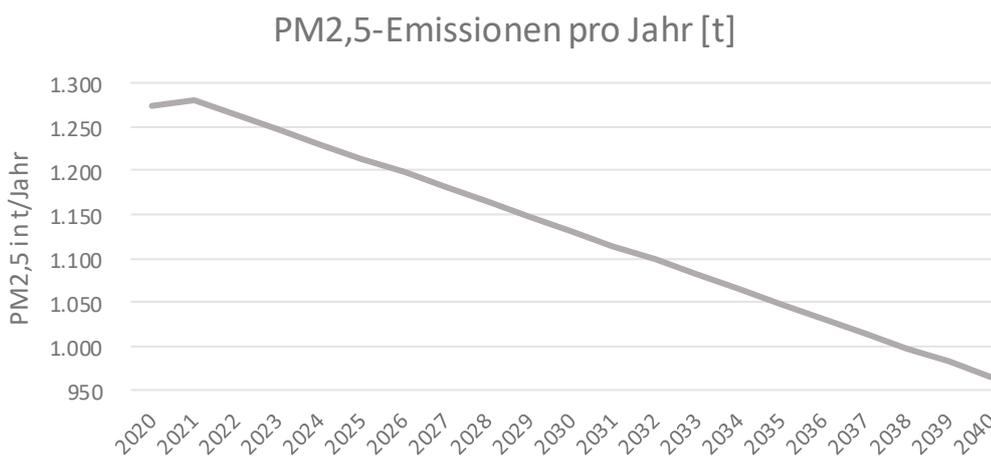
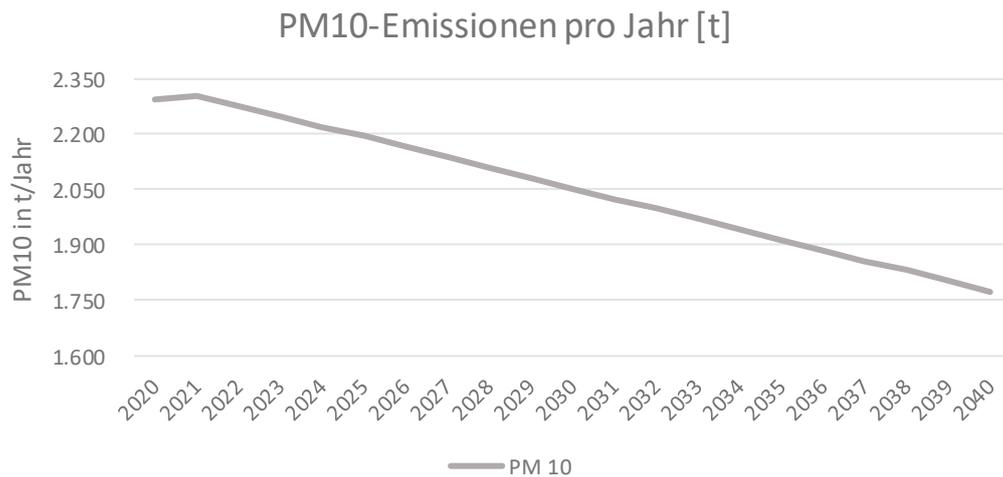
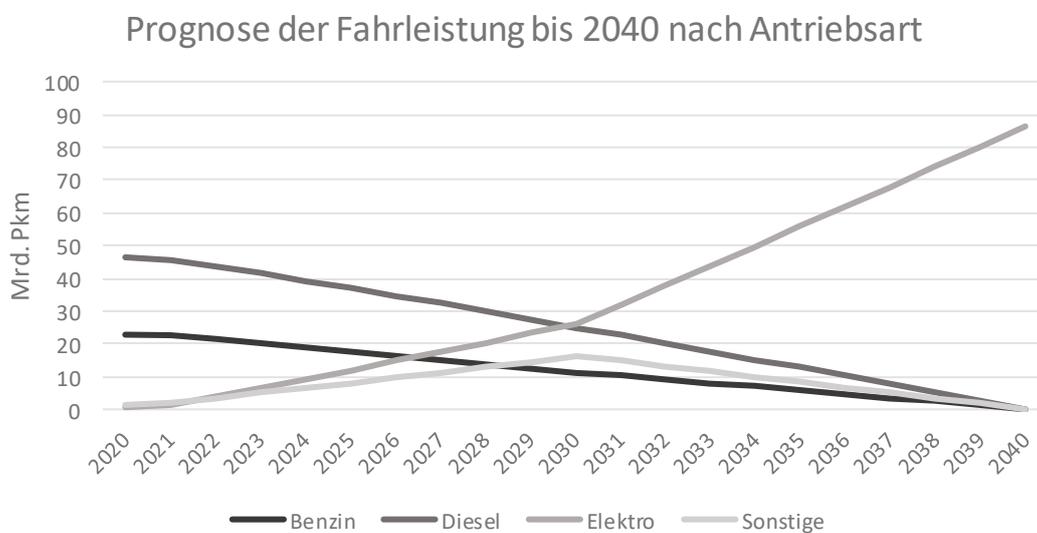


Diagramm 5.10: Prognose der PM10-Emissionen pro Jahr [kg]

5.2.3 Ergebnisse der Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

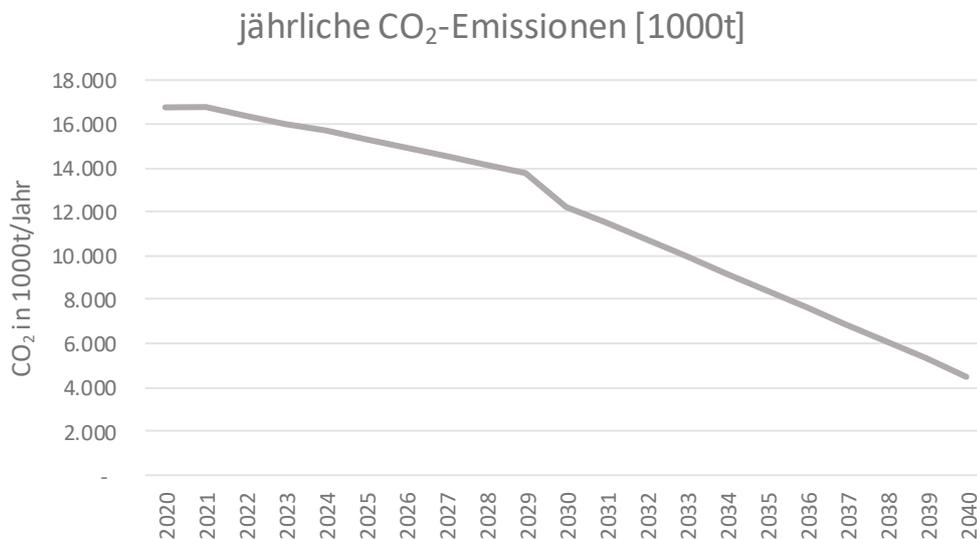
Für die Berechnung der Abgasemissionen wird die Fahrleistung nach Berechnungsvariante 2 herangezogen und die jeweiligen Anteile der unterschiedlichen Antriebsarten an der Gesamtfahrleistung berechnet. Hierfür werden die prozentuellen Anteile gemäß Diagramm 4.8 verwendet und mit den in Kap. 4.1.3 angeführten fahrzeugabhängigen Personenkilometern multipliziert. Hierbei nimmt die Fahrleistung um ca. 22% bis zum Jahr 2040 zu. Die Fahrleistungen nach den unterschiedlichen Antriebsarten sind in Diagramm 5.11 dargestellt.

Diagramm 5.11: Prognose der Fahrleistung bis 2040 nach Antriebsart - Variante 2

Durch die Elektrifizierung des österreichischen Fuhrparks bis 2040 können nach dieser Berechnung die jährlichen CO₂-Emissionen um 73,3% auf 4,48 Mio. t CO₂ reduziert werden.

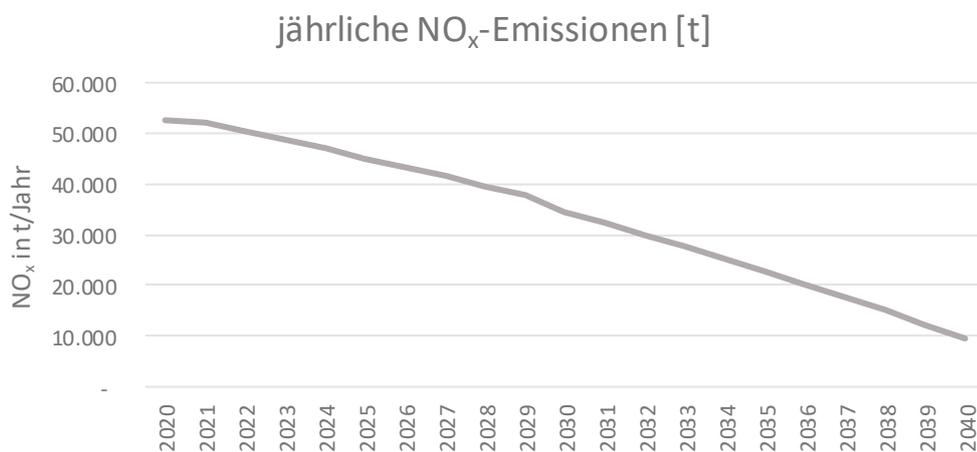
Der Knick im Verlauf ergibt sich durch die Annahme, dass ab 2030 der Energiebedarf von Elektrofahrzeugen zu 100% mit Ökostrom abgedeckt wird.

Diagramm 5.12: Prognose der jährlichen CO₂-Emissionen [t]

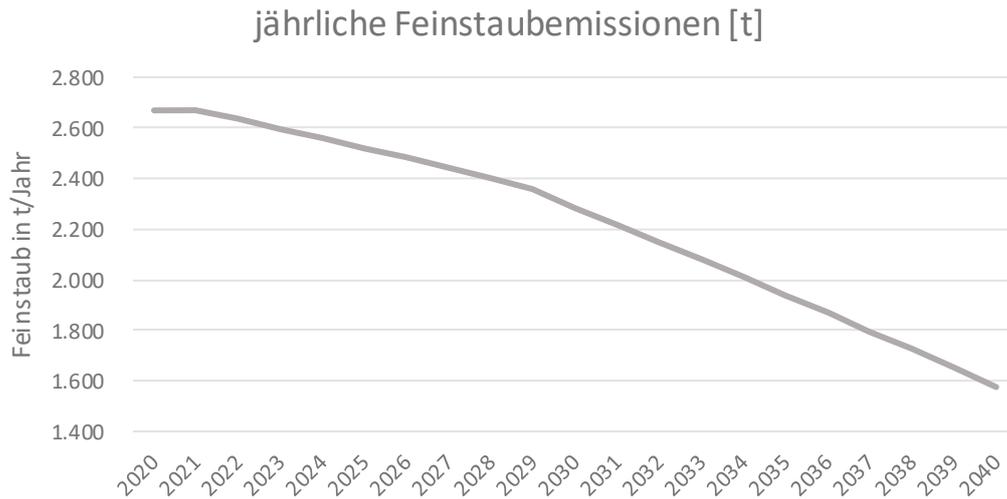


Auch die jährlichen NO_x-Emissionen nehmen aufgrund der Umstellung auf Elektroantriebe bis 2040 auf ca. 8.900 t ab, dies entspricht einer Reduktion von 83,2%.

Diagramm 5.13: Prognose der jährlichen NO_x-Emissionen [t]

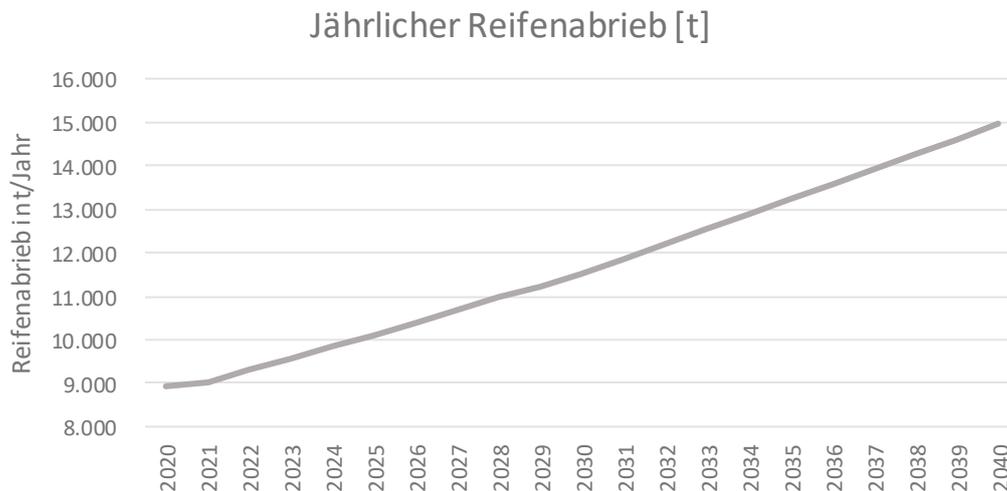


Die Feinstaubemissionen exklusive der Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung nehmen von ca. 2.700 t im Jahr 2020 auf 1.600 t im Jahr 2040 ab. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 41%.

Diagramm 5.14: Prognose der jährlichen Feinstaubmissionen [t]

5.2.4 Ergebnisse der Nicht-Abgasemissionen mittels Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

Aufgrund der Zunahme der Fahrleistung bis 2040 nehmen sämtliche in dieser Arbeit betrachteten Abriebemissionen zu. Der Reifenabrieb steigt bis 2040 von einem jährlichen Abrieb von 8.900 t um ca. 68% auf ca. 15.000 t.

Diagramm 5.15: Prognose des jährlichen Reifenabriebs [t]

Im Gegensatz zur Berechnungsvariante 1 nehmen auch sämtliche durch Abrieb und Aufwirbelung verursachten PM-Emissionen zu. Die PM_{0,1}- und PM_{1,0}-Emissionen nehmen bis 2040 um ca. 34,3% zu, die PM_{2,5}-Emissionen um 22,0% und die PM₁₀-Emissionen um 24,6%. Die Entwicklung der jährlichem PM-Emissionen können Diagramm 5.16, Diagramm 5.17, Diagramm 5.18 und Diagramm 5.19 entnommen werden.

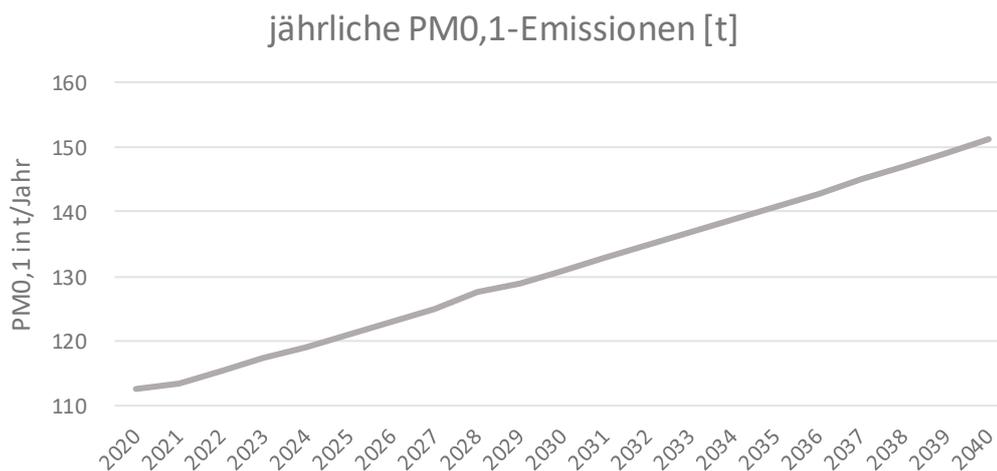
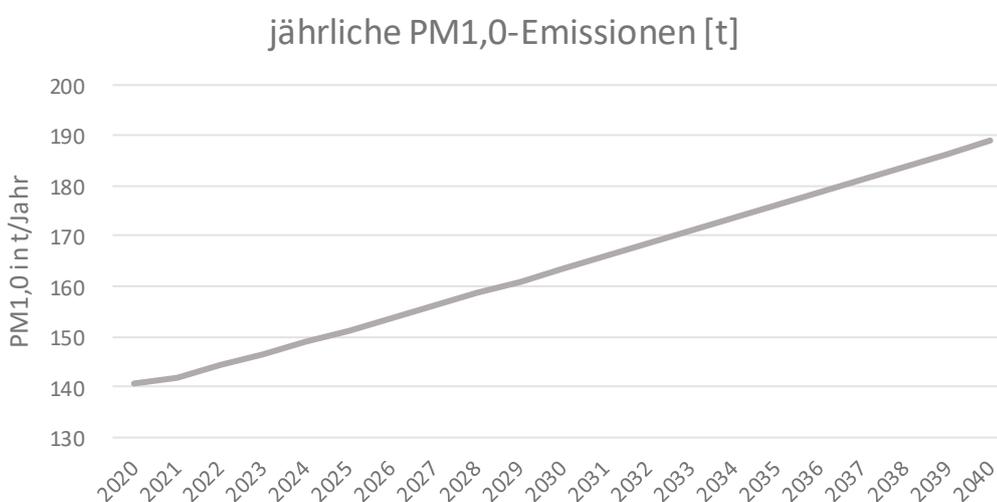
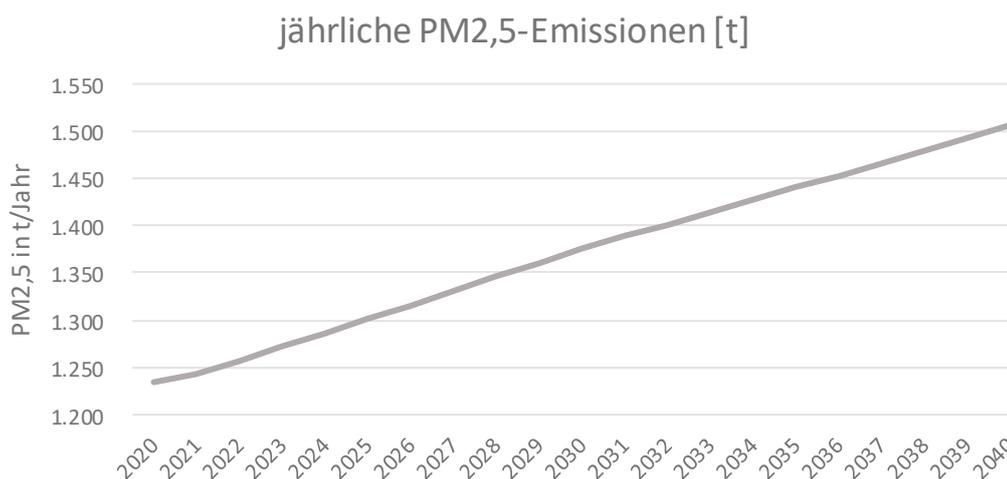
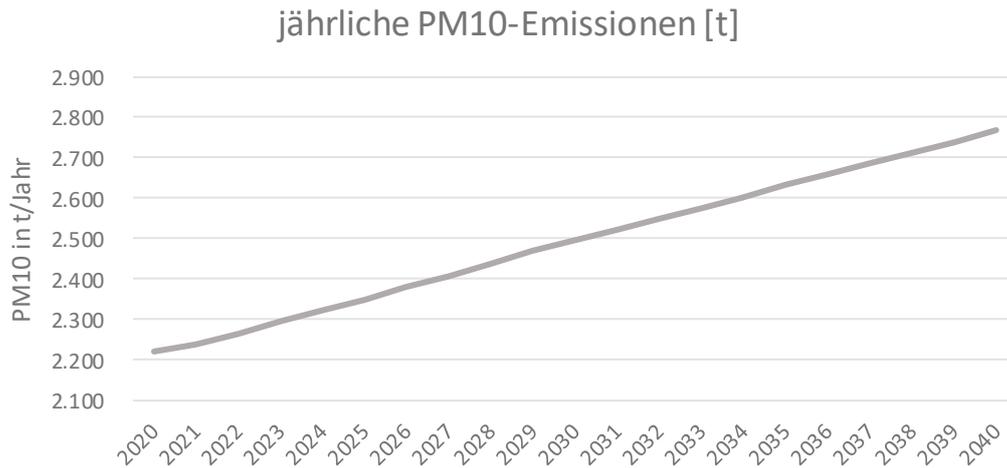
Diagramm 5.16: Prognose der jährlichen PM_{0,1}-Emissionen [t]**Diagramm 5.17: Prognose der jährlichen PM_{1,0}-Emissionen [t]****Diagramm 5.18: Prognose der jährlichen PM_{2,5}-Emissionen [t]**

Diagramm 5.19: Prognose der jährlichen PM10-Emissionen [t]

5.3 Vergleich der Ergebnisse

Die unterschiedlichen Ergebnisse je nach Berechnungsvariante der Fahrleistung sind in Tab. 5.13 gegenübergestellt.

Tab. 5.13: Vergleich der Emissionsberechnungen mit Fahrleistung nach Berechnungsvariante 1 und 2

	Variante 1	Variante 2	Unterschied [%]
Fahrleistung 2020 [Pkm]	83,5 Mrd.	80,9 Mrd.	-3,14%
Fahrleistung 2040 [Pkm]	62,0 Mrd.	98,5 Mrd.	+58,79%
CO ₂ -Emissionen 2040 [1000t]	2.821	4.480	+58,79%
NO _x -Emissionen 2040 [t]	5.580	8.861	+58,79%
Feinstaubemissionen 2040 [t]	992	1.575	+58,79%
Reifenabrieb 2040 [t]	9.425	14.966	+58,79%
PM _{0,1} -Emissionen 2040 [t]	97	151	+56,12%
PM _{1,0} -Emissionen 2040 [t]	121	189	+56,12%
PM _{2,5} -Emissionen 2040 [t]	965	1.506	+56,12%
PM ₁₀ -Emissionen 2040 [t]	1.774	2.769	+56,12%

Hier ist bereits erkennbar, dass es zur effizienten Reduktion der Abgasemissionen zusätzlich zur Elektrifizierung eine erhebliche Verringerung der Personenverkehrsleistung auf der Straße bedarf. Durch die Reduktion der Fahrleistung können sämtliche Abgas- und Nicht-Abgasemissionen um fast 60% noch weiter verringert werden.

Nach Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1 kommt es durch die Elektrifizierung des Fuhrparks zu einer Erhöhung des Reifenabriebs. Die prozentuellen Veränderungen können Tab. 5.14 entnommen werden.

Tab. 5.14: Vergleich der Emissionen im Jahr 2020 und 2040 – Berechnung nach Variante 1

Variante 1	2020	2040	Änderung [%]
Fahrleistung [Pkm]	83,5 Mrd.	62,0 Mrd.	-33,68%
CO ₂ -Emissionen [1000t]	17.425	2.821	-83,81%
NO _x -Emissionen [t]	48.710	5.580	-88,54%
Feinstaubemissionen [t]	2.737	992	-63,76%
Reifenabrieb [t]	9.216	9.425	+2,26%
PM _{0,1} -Emissionen [t]	116	97	-16,70%
PM _{1,0} -Emissionen [t]	145	121	-16,70%
PM _{2,5} -Emissionen [t]	1.275	965	-24,31%
PM ₁₀ -Emissionen [t]	2.294	1.774	-22,69%

Bei einer Zunahme der Fahrleistung nach Berechnungsvariante 2 können durch die Elektrifizierung sämtliche in diesen Berechnungen berücksichtigten Abgasemissionen reduziert werden, durch die Elektrifizierung nehmen allerdings die Nicht-Abgasemissionen zu. Die prozentuellen Zu- bzw. Abnahmen der Emissionen können Tab. 5.15 entnommen werden.

Tab. 5.15: Vergleich der Emissionen im Jahr 2020 und 2040 – Berechnungen nach Variante 2

Variante 2	2020	2040	Änderung [%]
Fahrleistung [Pkm]	80,9 Mrd.	98,5 Mrd.	+21,74%
CO ₂ -Emissionen [1000t]	16.757	4.480	-73,27%
NO _x -Emissionen [t]	52.594	8.861	-83,15%
Feinstaubemissionen [t]	2.669	1.575	-40,98%
Reifenabrieb [t]	8.929	14.966	+67,61%
PM _{0,1} -Emissionen [t]	113	151	+34,29%
PM _{1,0} -Emissionen [t]	141	189	+34,29%
PM _{2,5} -Emissionen [t]	1.234	1.506	+22,03%
PM ₁₀ -Emissionen [t]	2.222	2.769	+24,64%

Anzumerken ist hier, dass eine Gewichtung der einzelnen Emissionen nach ihrer Toxizität nicht vorgenommen wird, diese aber bei der Beurteilung der Folgen der Emissionen in Abhängigkeit ihrer Menge berücksichtigt werden müsste.

6 Berechnung der Lkw-bezogenen Emissionen bis 2040

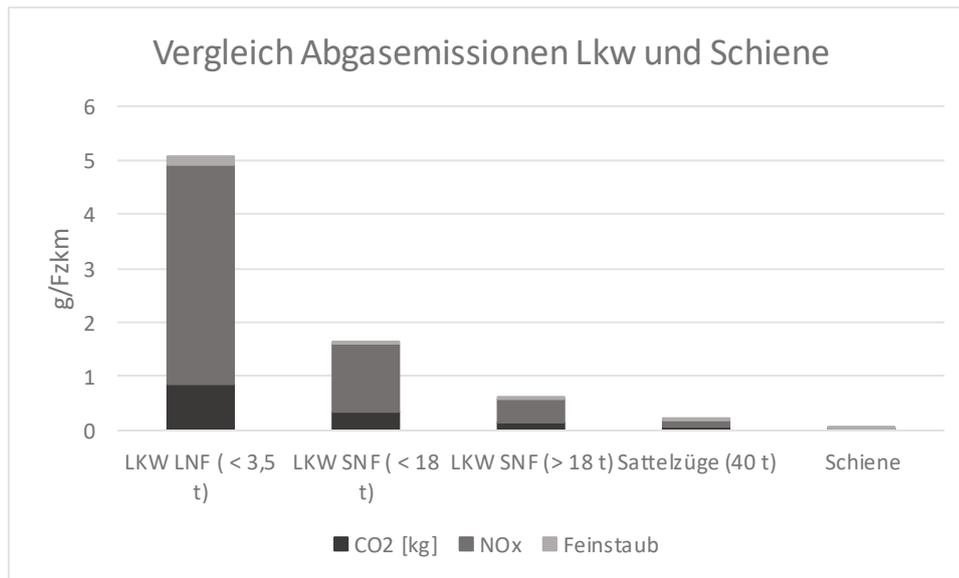
6.1 Reduktion der Abgasemissionen durch Umlagerung der Transportleistung

Unter der Annahme, dass gemäß Mobilitätsmasterplan 2030 die Transportleistung auf der Straße bis 2040 um 1,0 Mrd. Tonnenkilometer abnimmt, während die notwendige Transportleistung von zusätzlichen 12 Mrd. Tonnenkilometern vom Schienengüterverkehr aufgefangen wird¹¹¹, können dadurch bereits Abgasemissionen eingespart werden. Für die Berechnung der Einsparung von CO₂, NO_x und Partikel exkl. Abrieb wird der in Tab. 2.8 ermittelte Durchschnitt aller Emissionswerte angesetzt, diese werden in Tab. 6.1 erneut angeführt. Die Emissionswerte des Güterverkehrs auf der Schiene können ebenso Tab. 6.1 entnommen werden.

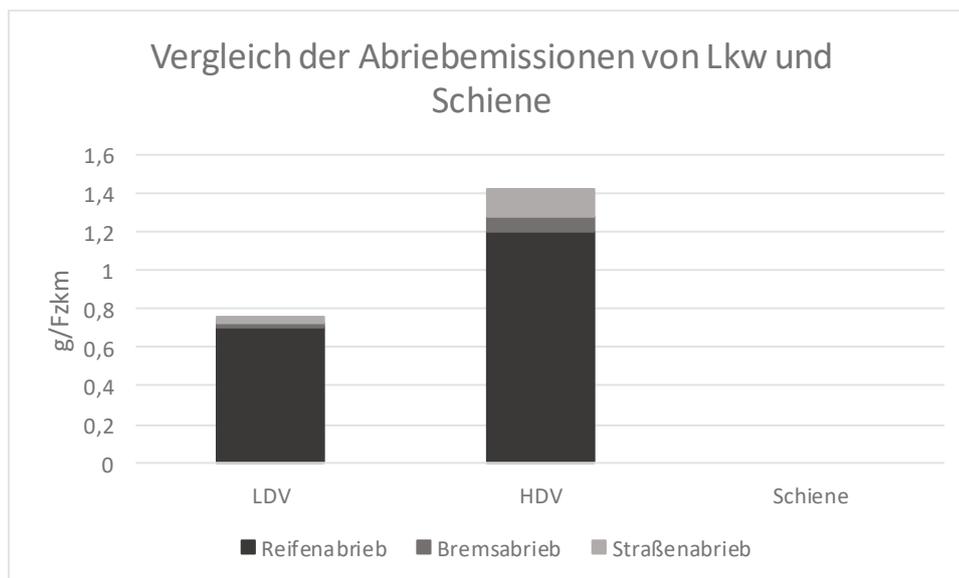
Tab. 6.1: Angesetzte Emissionen des Schienen- und Straßengüterverkehrs in g/Tkm

Verkehrsträger	THG	CO ₂ [g/Tkm]	NO _x [g/Tkm]	Partikel exkl.
	[g CO ₂ eq/Tkm]			Abrieb [g/Tkm]
Straße	317,68	305,04	1,202	0,0416
Schiene	5,0	3,1	0,02	0,001

Zum Vergleich werden die Abgasemissionen unterschiedlicher Lastkraftwagen und der Schiene in Diagramm 6.1 dargestellt. Für eine bessere Darstellung werden die CO₂-Emissionen in kg/Tkm dargestellt. Leichte Nutzfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von weniger als 3,5 t weisen die größten kumulierten Emissionswerte auf. Diese Darstellung verdeutlicht das große Einsparpotential von Abgasemissionen durch die Verlagerung der Transportleistung auf die Schiene.

Diagramm 6.1: Vergleich der Abgasemissionen von Lastkraftwagen und Schiene⁵⁷

Die Reifen-, Brems- und Straßenabriebemissionen von LDV und HDV werden in Diagramm 6.2 dargestellt. Aufgrund mangelnder Daten von Abriebemissionen der Schiene können diese in dieser Aufstellung nicht dargestellt werden.

Diagramm 6.2: Vergleich der Abriebemissionen von LDV, HDV und Schiene²³

Die Umlagerung der bis 2040 um 11 Mrd. Tkm steigenden Transportleistung auf die Schiene verhindert kumulierte CO₂-Emissionen von ca. 3,6 Mio. t, kumulierte NO_x-Emissionen von ca. 14.200 t und kumulierte Partikelemissionen von ca. 490 t. Der Eintrag von ca. 3,7 Mio. t CO₂eq kumulierter Treibhausgasemissionen könnte ebenso vermieden werden. Wenn die zusätzliche Transportleistung von 11 Mrd. Tonnenkilometer bis 2040 vom Straßengüterverkehr

aufgenommen wird, sind die kumulierten CO₂-Emissionen dieser Transportleistung ca. neun Mal so hoch. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tab. 6.2 und Tab. 6.3 dargestellt

Tab. 6.2: Berechnung der Emissionseinsparungen

Verkehrsträger	Zu-/Abnahme Transportleistung [Mrd. Tkm]	CO ₂ [t]	NO _x [t]	Partikel exkl. Abrieb [t]
Schiene	+12,0	+37.200	+240	+12
Straße	-1,0	-305.040	-1.202	-41,6
Gesamt	+11,0	-267.840	-962	-29,4
Straße	+11,0	+3.355.440	+13.222	+457
Differenz	---	3.623.280	14.184	487,2

Tab. 6.3: Berechnung der Emissionseinsparungen (THG)

Verkehrsträger	Zu-/Abnahme Transportleistung [Mrd. Tkm]	THG [t CO ₂ eq]
Schiene	+12,0	+60.000
Straße	-1,0	-315.880
Gesamt	+11,0	-255.880
Straße	+11,0	3.474.680
Differenz	---	3.730.560

6.2 Reduktion der Treibhausgasmissionen durch Elektrifizierung der Lkw-Flotte

Gemäß Mobilitätsmasterplan 2030 soll auch die österreichische Lkw-Flotte sukzessive auf Elektroantrieb umgestellt werden. Die Ziele und Meilensteine bezüglich der Umstellung sind in Kap. 2.1.2 erläutert. Unter der Annahme, dass auch die Lkw-Flotte bis 2040 vollständig elektrifiziert ist, kann eine Prognose der Reduktion der Abgasemissionen erstellt werden. Die Abgasemissionswerte für die Berechnung werden Tab. 2.8 entnommen, diese beziehen sich nur auf die THG-Emissionen in g CO₂eq/Tkm.

Das Österreichische Umweltbundesamt hat die durchschnittliche Fahrleistung von Lastkraftwagen der Kategorie LNF (leichte Nutzfahrzeuge), SNF (schwere Nutzfahrzeuge) sowie Sattelzügen ermittelt⁸⁰. Die Werte sind Tab. 6.4 zu entnehmen.

Tab. 6.4: Durchschnittliche Fahrleistung von Lastkraftfahrzeugen⁸⁰

Lastkraftfahrzeug	Fahrleistung [km]	Lastkraftfahrzeug	Fahrleistung [Fzkm]
Lkw LNF	17.900	Sattelzug	76.900

Lkw SNF < 18 t	89.900	Durchschnitt SNF (</> 18 t)	78.400
Lkw SNF > 18 t	66.900	Durchschnitt SNF	74.500

Mit den Auslastungsgraden der einzelnen Lastkraftfahrzeugkategorien kann nun die jeweilige Transportleistung in Tonnenkilometer berechnet werden. Die Auslastungsgrade sind in Tab. 6.8 zusammengefasst. Aufgrund der abweichenden Untergliederung des Umweltbundesamtes von jener von Statistik Austria werden sämtliche Lastkraftwagen der Kategorie SNF < 18 t und SNF > 18 t unter Lkw Kl. N2+N3 zusammengefasst, dieser Auslastungsgrad wird daher gemittelt. Die Untergliederungsweise von Statistik Austria ist in Tab. 6.5 dargestellt, jene vom Österreichischen Umweltbundesamt in Tab. 6.6.

Tab. 6.5: Untergliederung von Lastkraftfahrzeugen nach Statistik Austria¹¹⁰

Lastkraftfahrzeug	Beschreibung
Lkw LNF (< 3,5 t)	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von < 3,5 t
Lkw SNF (< 12 t)	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von < 12 t
Lkw SNF (> 12 t)	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von > 12 t
Sattelzüge	---

Tab. 6.6: Untergliederung von Lastkraftfahrzeugen nach Österreichischem Umweltbundesamt⁸⁰

Lastkraftfahrzeug	Beschreibung
Lkw LNF (< 3,5 t) D	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von < 3,5 t und Dieselmotor
Lkw SNF (< 18 t) D	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von < 18 t und Dieselmotor
Lkw SNF (> 18 t) D	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von > 18 t und Dieselmotor
Sattelzüge D	Sattelzüge mit einem Gesamtgewicht von 40 t und Dieselmotor

Tab. 6.7: Zusammenfassung der Untergliederung für Berechnungen

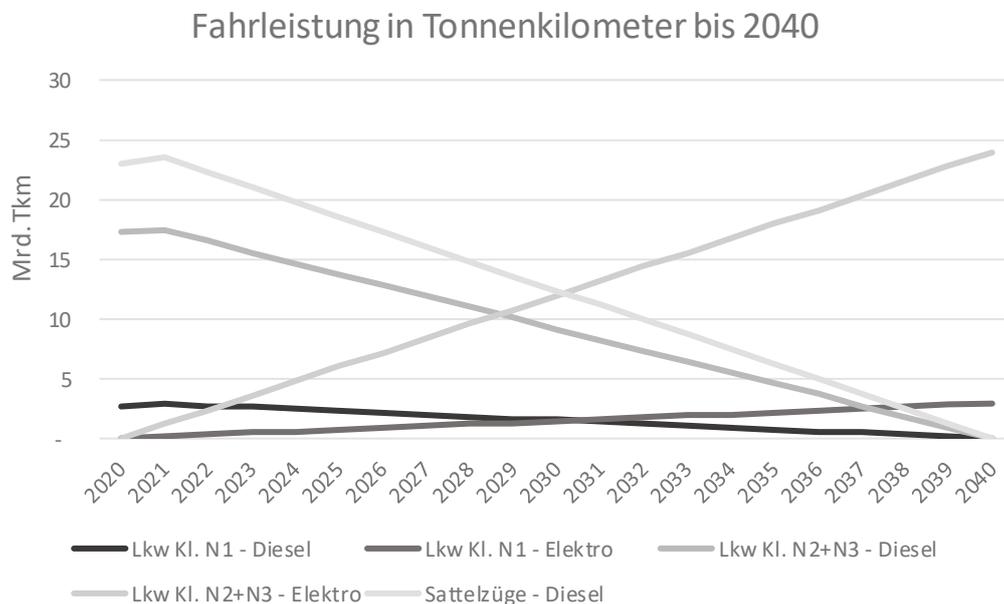
Lastkraftfahrzeug	Beschreibung
Lkw Kl. N1	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von < 3,5 t
Lkw Kl. N2+N3	Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von < 18 t und > 18 t
Sattelzüge (40 t)	Sattelzüge mit einem Gesamtgewicht von 40 t

Tab. 6.8: Auslastungsgrade der einzelnen Lastkraftfahrzeuge⁸⁰

Lastkraftfahrzeug nach UWB	Auslastungsgrad	Lastkraftfahrzeug für Berechnungen	Auslastungsgrad für Berechnungen
Lkw LNF (< 3,5)	0,33	Lkw Kl.1	0,33
Lkw SNF (< 18 t)	1,58	Lkw Kl. N2+N3	4,07
Lkw SNF (> 18 t)	6,57	Sattelzug	15,44
Sattelzug	15,44		

Die Transportleistung in Tonnenkilometer der jeweiligen Kategorie von Lastkraftwagen ist in Diagramm 6.3 dargestellt. Dafür wird von der in Kap. 4.3 ermittelten Prognose des Lkw-Bestandes bzw. der Fuhrparkzusammensetzung bis 2040 ausgegangen unter Berücksichtigung der in Tab. 6.8 zusammengefassten Auslastungsgrade.

Diagramm 6.3: Prognose der Fahrleistung in Tonnenkilometer



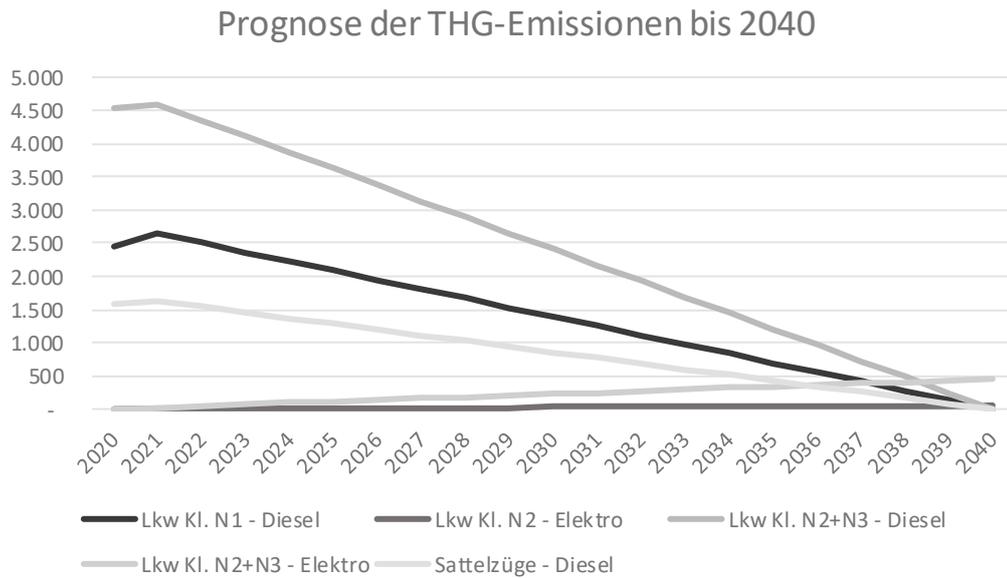
Die zur Berechnung der THG verwendeten Werte sind in Tab. 6.9 zusammengefasst. Die Emissionswerte für Lastkraftwagen mit Elektroantrieb werden dem VCÖ Factsheet entnommen und jeweils für Lkw Kl. N1 – Elektro und Lkw Kl. N2+N3 – Elektro angenommen⁴³.

Tab. 6.9: THG-Emissionen von Lastkraftwagen^{80, 43}

Lastkraftfahrzeug	THG – Emissionen in g CO ₂ eq/Tkm
Lkw Kl. N1 – Diesel	908,20
Lkw Kl. N1 – Elektro	19,00
Lkw Kl. N2+N3 – Diesel	263,05
Lkw Kl. N2+N3 – Elektro	19,00
Sattelzug	69,00

Nach dieser Berechnung können die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen bis 2040 um 94% auf ca. 0,5 Mio. t CO₂eq/Tkm reduziert werden. Die Prognose der THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten bis 2040 ist in Diagramm 6.4 dargestellt.

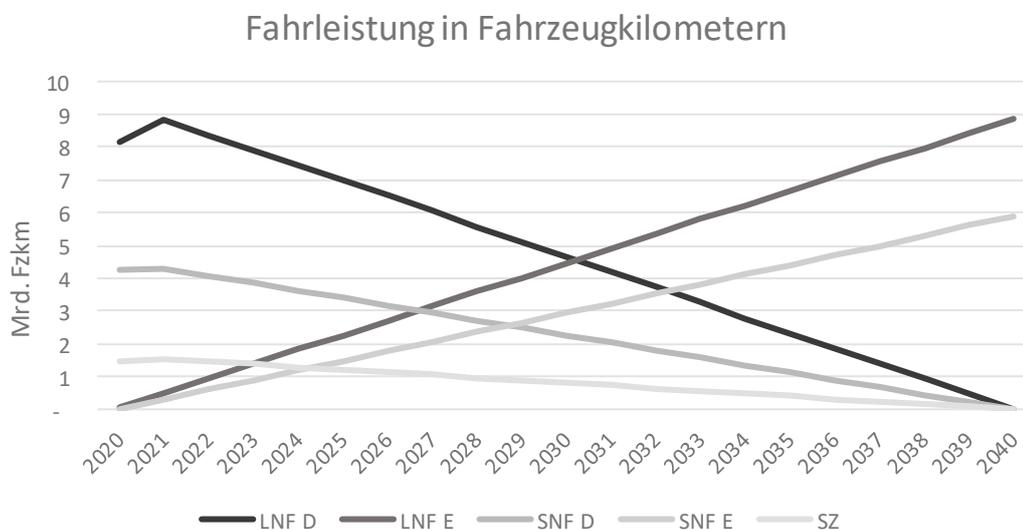
Diagramm 6.4: Prognose der THG-Emissionen in 1000t CO₂eq/Tkm



6.3 Entwicklung des Reifenabriebs durch Elektrifizierung der Lkw-Flotte

Der Reifenabrieb des Straßengüterverkehrs wird mit der Fahrleistung in Fahrzeugkilometer und den Werten für Reifenabrieb von leichten und schweren Nutzfahrzeugen gemäß Prenner et al. (2021) ermittelt. Die Verkehrsleistung in Fahrzeugkilometer wird gemäß der in Kap. 4.3 ermittelten Prognose des Lkw-Bestandes bzw. der Fuhrparkzusammensetzung bis 2040 berechnet. Der Verlauf der Verkehrsleistung kann Diagramm 6.5 entnommen werden.

Diagramm 6.5: Fahrleistung in Fahrzeugkilometer nach Gesamtgewicht und Antriebsart



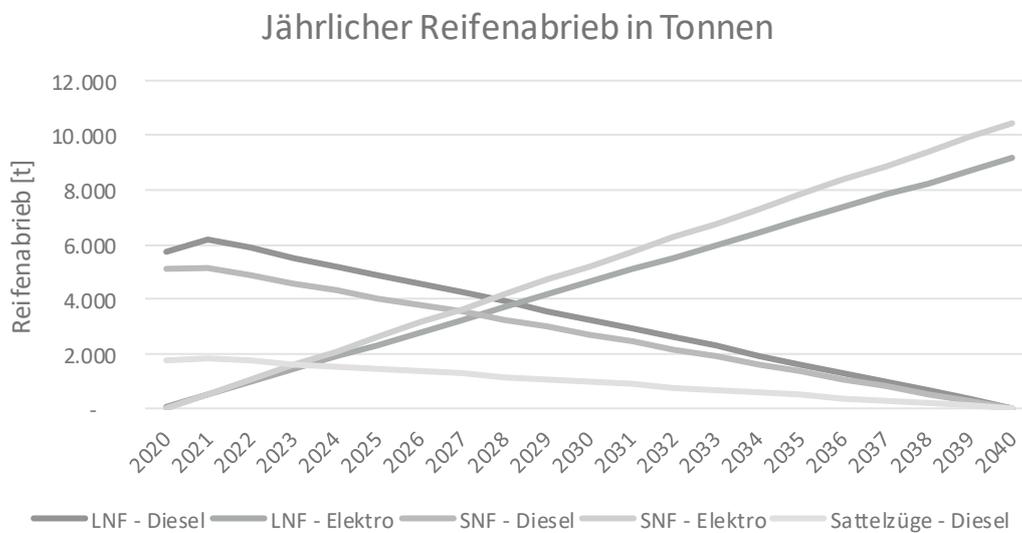
Da für den Reifenabrieb von schweren Nutzfahrzeugen mit Elektroantrieb keine Daten über Reifenabrieb vorhanden sind, werden diese mit den Daten des Reifenabriebs von leichten Nutzfahrzeugen berechnet. Leichte Nutzfahrzeuge mit Elektroantrieb produzieren ca. 48% mehr Reifenabrieb als jene mit Verbrennungsmotor. Dies wird auch für schwere Nutzfahrzeuge angenommen und so ein Reifenabrieb von 1,775 g/Fzkm berechnet. Für Sattelzüge wird der Reifenabrieb von schweren Nutzfahrzeugen mit Verbrennungsmotor angenommen. Die Werte für den Reifenabrieb nach Gesamtgewicht und Antriebsart können Tab. 6.10 entnommen werden.

Tab. 6.10: Reifenabrieb von Nutzfahrzeugen in g/Fzkm

Lastkraftfahrzeug	Reifenabrieb in g/Fzkm
Lkw Kl. N1 – Diesel / LNF D	0,7000
Lkw Kl. N1 – Elektro / LNF E	1,0355
Lkw Kl. N2+N3 – Diesel / SNF D	1,2000
Lkw Kl. N2+N3 – Elektro / SNF E	Ann.: 1,7751
Sattelzug	Ann.: 1,2000

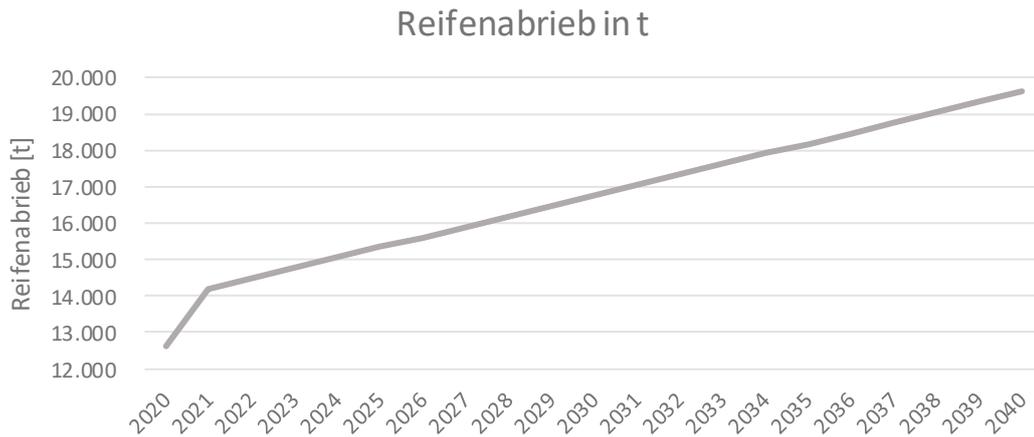
Durch Multiplikation der Straßengüterverkehrsleistung in Fahrzeugkilometer mit dem jeweiligen Reifenabrieb kann der jährliche Reifenabrieb berechnet werden. Der Verlauf des jährlichen Reifenabriebs ist in Diagramm 6.6 dargestellt.

Diagramm 6.6: Jährlicher Reifenabrieb in Tonnen nach Gesamtgewicht und Antriebsart



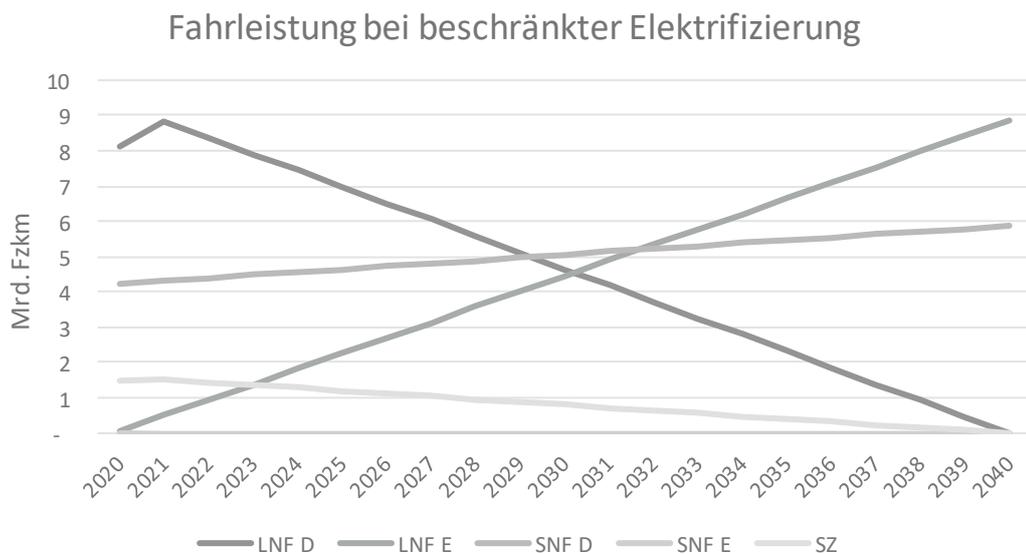
Der gesamte Reifenabrieb ist in Diagramm 6.7 dargestellt. Dieser nimmt bis 2040 um 55,3% zu und liegt bei ca. 19.600 t.

Diagramm 6.7: Gesamter jährlicher Reifenabrieb des Straßengüterverkehrs in t



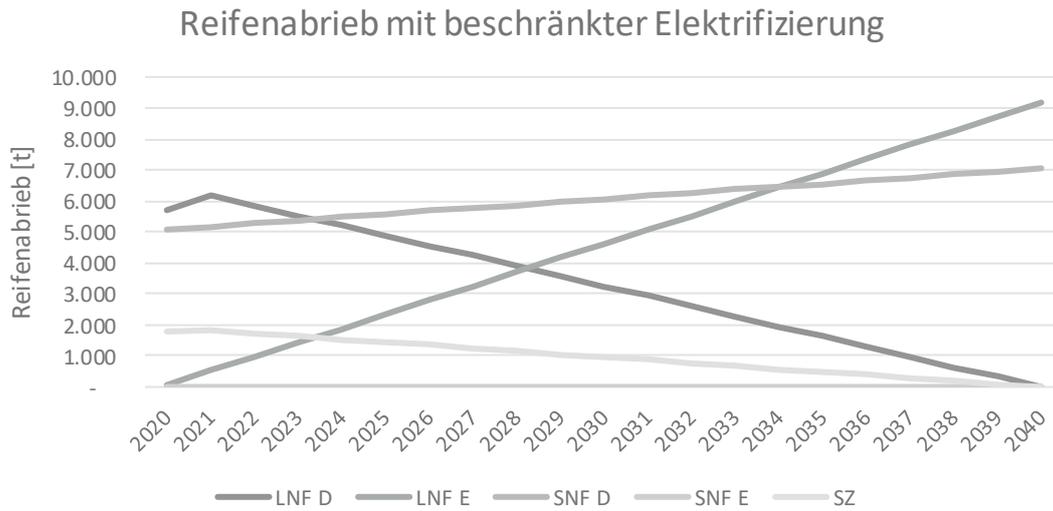
Unter der Annahme, dass nur der Bestand an leichten Nutzfahrzeugen bis 2040 vollständig elektrifiziert wird und sämtliche schwere Nutzfahrzeuge bis 2040 weiterhin mit Verbrennungsmotor angetrieben werden, kann die Zunahme des Reifenabriebs reduziert werden. Die Fahrleistung nach Gesamtgewicht und Antriebsart in diesem Fall ist in Diagramm 6.8 dargestellt.

Diagramm 6.8: Fahrleistung des Straßengüterverkehrs bei beschränkter Elektrifizierung bis 2040



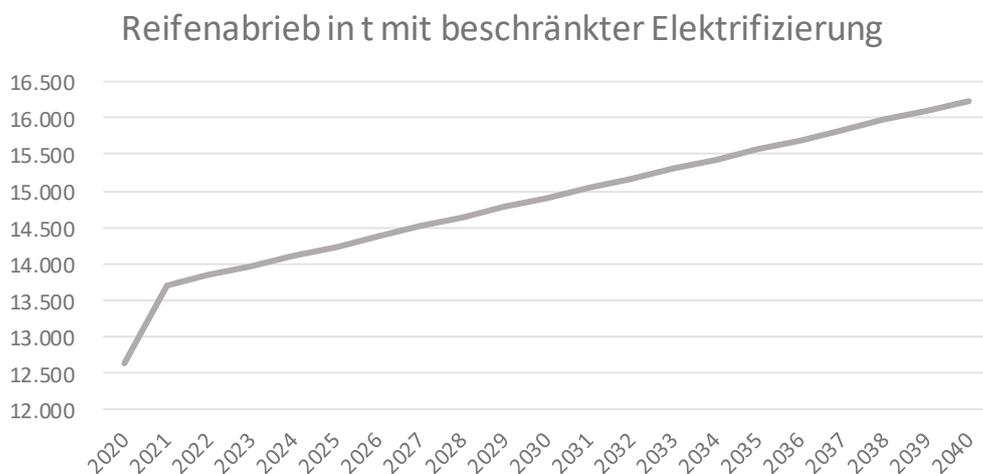
Durch Multiplikation der Fahrleistung nach Gesamtgewicht und Antriebsart mit beschränkter Elektrifizierung gemäß Diagramm 6.8 mit den Abriebwerten gemäß Tab. 6.10 kann der jährliche Reifenabrieb nach Antriebsart und Gesamtgewicht berechnet werden, dieser kann Diagramm 6.9 entnommen werden.

Diagramm 6.9: Reifenabrieb in t nach Gesamtgewicht und Antriebsart mit beschränkter Elektrifizierung



Der Verlauf des gesamten jährlichen Reifenabriebs ist in Diagramm 6.10 dargestellt. Mit beschränkter Elektrifizierung liegt der Reifenabrieb im Jahr 2040 bei ca. 16.200 t. Dies entspricht einer Zunahme von 28,50%. Die vollständige Elektrifizierung der Lkw-Flotte bewirkt demnach eine nahezu doppelt so große Erhöhung des Reifenabriebs.

Diagramm 6.10: Reifenabrieb in t mit beschränkter Elektrifizierung



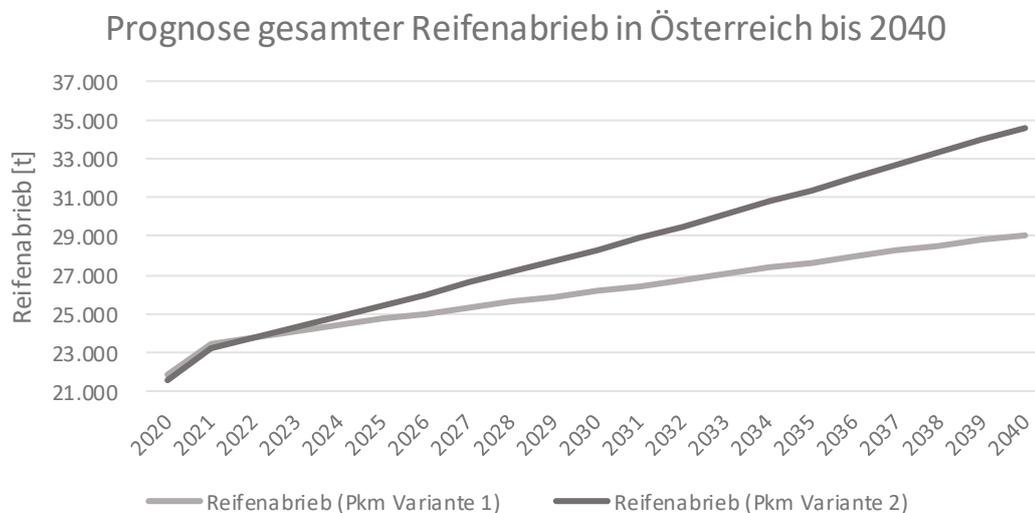
Mittels dieser Berechnungen wird gezeigt, dass die Elektrifizierung zwar eine Reduktion der Abgasemissionen bewirkt, jedoch dadurch Nicht-Abgasemissionen, wie der Reifenabrieb, erhöht werden.

6.3.1 Gegenüberstellung des Pkw- und Lkw-Reifenabriebs

Im Jahr 2020 lag der von Personenkraftwagen erzeugte Reifenabrieb bei ca. 9.000 t. Der Straßengüterverkehr verursachte im Jahr 2020 ca. 12.500 t Reifenabrieb. In Summe ergibt dies 21.500 t Reifenabrieb. Prenner et al. (2021) beziffert den Reifenabrieb im Jahr 2018 in Österreich mit 21.200 t⁶⁵.

Im Jahr 2040 könnte der Reifenabrieb bereits bei ca. 19.600 t liegen, der Personenverkehr könnte im Jahr 2040 ca. 15.000 t nach Berechnungsvariante 2 verursachen. Insgesamt ergibt dies einen Reifenabrieb von 34.600 t im Jahr 2040. Der Verlauf des Reifenabriebs von Lkw und Pkw ist in Diagramm 6.11 dargestellt. Dabei wird der Abrieb von Pkw nach Berechnungsvariante 1 und 2 unterschieden.

Diagramm 6.11: Prognose des gesamten Reifenabriebs von Personen- und Lastkraftwagen bis 2040 nach Berechnungsvariante



7 Kumulierende Pkw-Emissionen

Emissionen werden nach der Entstehung nicht sofort abgebaut, sondern kumulieren. Dies führt zu unumkehrbaren Prozessen innerhalb der Erdatmosphäre¹¹².

Der anthropogene Treibhauseffekt wird durch die Emission von klimawirksamen Gasen verstärkt⁵¹. Die durch das Kyoto-Protokoll definierten Treibhausgas sind in Kap. 2 gelistet.

Während bei anthropogen erzeugtem Kohlendioxid ca. die Hälfte bereits nach einigen Jahrzehnten durch physikalische und biochemische Prozesse abgebaut ist, verweilt der restliche Teil noch lange in der Atmosphäre, nach 1000 Jahren sind noch 15% bis 40% vorhanden. Auch nach einem Stopp der Netto-CO₂-Emissionen würde sich die Temperatur der

Erdoberfläche lange Zeit nicht ändern¹¹². Ein Hauptverursacher von CO₂ ist, wie in Kap. 5.1.1 ersichtlich, der Verkehr, aber auch die Wärmeerzeugung, Haushalte und Kleinverbraucher erzeugen einen großen Teil des anthropogenen Kohlendioxids¹¹³.

Die Verweildauer von Methan ist wesentlich kürzer und beträgt laut Deutschem Umweltbundesamt ca. 12,4 Jahre, allerdings hat dieses Gas ein 25-mal größeres Treibhauspotenzial als CO₂. Die Landwirtschaft, Kläranlagen und Deponien zählen zu den Hauptverursachern¹¹³.

Distickstoffoxid (N₂O) ist erst nach ca. 121 Jahren in der Atmosphäre vollständig abgebaut und hat ein 298-mal so großes Treibhauspotenzial wie CO₂.

Der über Jahrhunderte andauernder Eintrag dieser klimawirksamen Gase in die Atmosphäre und eine Abbauproduktzeit von teils mehreren Hundert Jahren führen dazu, dass sich der bereits fortgeschrittene Klimawandel nicht umkehren lässt¹¹².

Neben Treibhausgasen kumuliert auch Mikroplastik in der Umwelt. Man unterscheidet zwischen primärem Mikroplastik, das gezielt für unterschiedliche Einsatzgebiete produziert wird, und sekundärem Mikroplastik, das ein Abbauprodukt ist. Letzteres entsteht durch Verwitterungsprozesse von Plastik, bei welchen dieses zu kleineren Teilchen zersetzt wird¹¹⁴. Mikroplastik kann von Organismen nicht vollständig zerlegt werden, lediglich die Teilchengröße wird mit der Zeit verringert¹¹⁵.

7.1 Effekt der Elektrifizierung

Um den Effekt der Elektrifizierung quantifizieren zu können, werden die Emissionswerte mit und ohne Elektrifizierung vergleichend dargestellt. Für die Variante ohne Elektrifizierung wird angenommen, dass das Verhältnis der Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebsarten unter Berücksichtigung einer in Kap. 4.1.1 definierten Zunahme des Pkw-Bestandes konstant bleibt. Die Ergebnisse sind in Diagramm 7.1 dargestellt. Dabei wird ebenso der Effekt der kumulierenden Emissionen berücksichtigt.

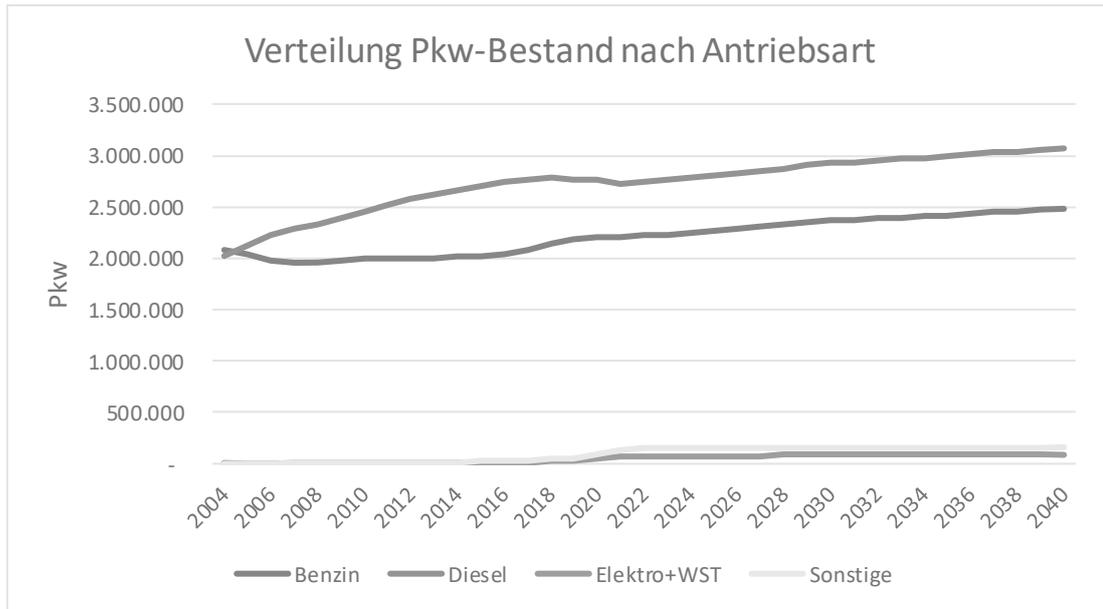
¹¹² IPCC, 2014, Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen, vgl. S. WGI 27

¹¹³ Deutsches Umweltbundesamt, 2021, Die Treibhausgase

¹¹⁴ Liebmann, Österreichisches Umweltbundesamt, 2015, Mikroplastik in der Umwelt, vgl. S 11

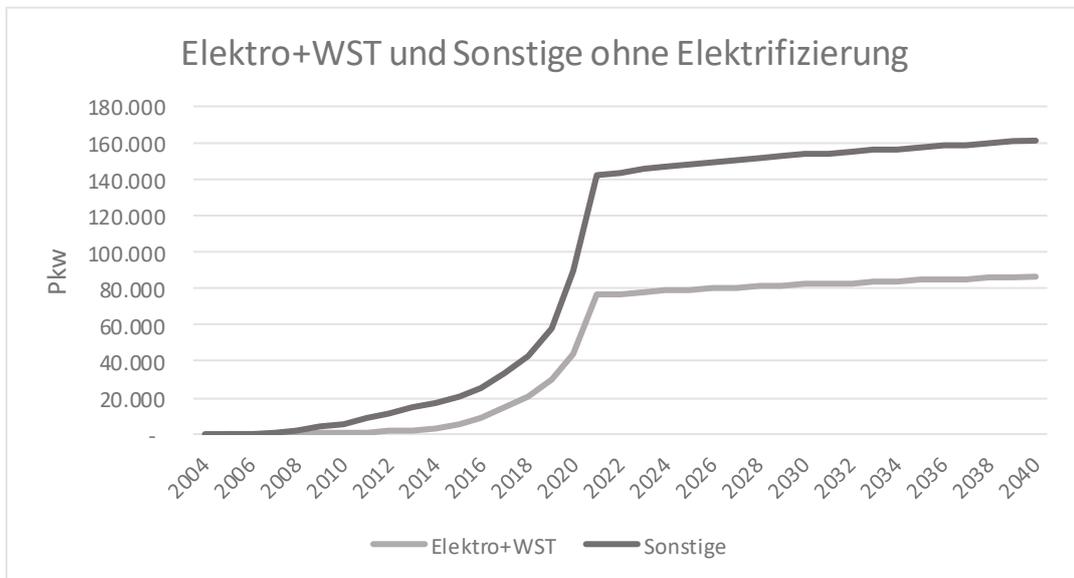
¹¹⁵ Deutsches Umweltbundesamt, 2017, Verrottet Plastik gar nicht oder nur sehr langsam?

Diagramm 7.1: Verteilung des Pkw-Bestands auf die unterschiedlichen Antriebsarten ohne Elektrifizierung



Hier wird davon ausgegangen, dass die Zunahme der Fahrzeuge mit Elektro- und Brennstoffzellenantrieb von ca. 72% (2020 auf 2021) auf 0,8% (2021 auf 2022) sinkt und sich bei diesem Wert einpendelt bzw. ab dem Jahr 2030 auf eine jährliche Zunahme von 0,50% weiter sinkt. Dieser Verlauf ist in Diagramm 7.2 dargestellt.

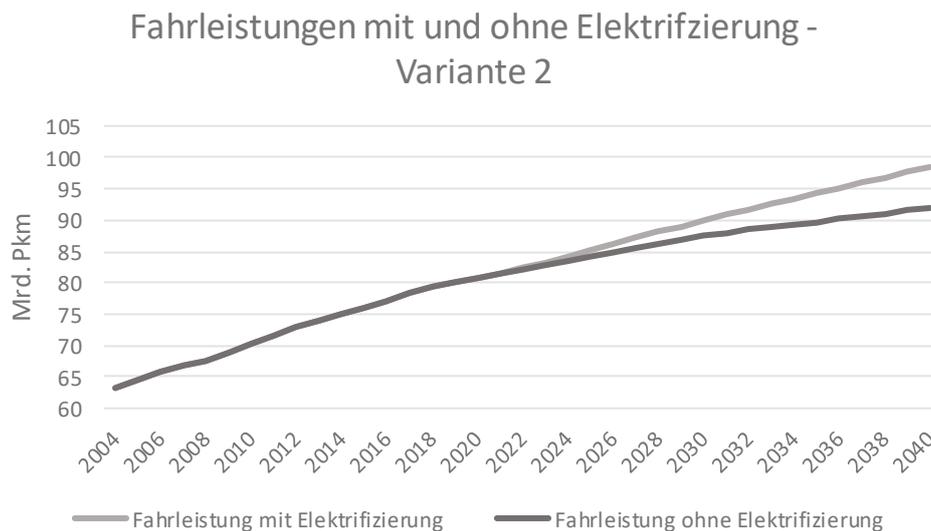
Diagramm 7.2: Verteilung des Pkw-Bestands auf die unterschiedlichen Antriebsarten ohne Elektrifizierung



Für die Berechnung wird von den Werten in Tab. 5.1 ausgegangen. Die Emissionen werden für beide Berechnungsvarianten der Fahrleistung (siehe Kap. 4.1.3) ermittelt.

Die Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1 liefert für den Fall Elektrifizierung die gleiche Fahrleistung wie für den Fall ohne Elektrifizierung, da die Fahrleistung hier dem Mobilitätsmasterplan entnommen wird. Aufgrund der je nach Antriebsart unterschiedlichen Fahrleistung ergibt die Berechnung der Gesamtfahrleistung nach Variante 2 für den Fall ohne Elektrifizierung eine reduzierte Fahrleistung. Die Fahrleistungen mit und ohne Elektrifizierung nach Berechnungsvariante 2 sind in Diagramm 7.3 vergleichend dargestellt. Die Fahrleistung ohne Elektrifizierung unterscheidet sich von jener mit Elektrifizierung um ca. 6,6%.

Diagramm 7.3: Vergleich der Fahrleistungen mit und ohne Elektrifizierung nach Variante 2



7.1.1 Abgasemissionen

Im Jahr 2040 ist der jährliche CO₂-Ausstoß des motorisierten Individualverkehrs ohne Elektrifizierung (mit Bezug auf Personenkraftwagen) um 70,85% höher als der CO₂-Ausstoß des MIV mit Elektrifizierung. Der Verlauf der jährlichen CO₂-Emissionen ist in Diagramm 7.4 dargestellt. Durch die Reduktion der Fahrleistung werden die CO₂-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung reduziert.

Unter der Annahme, dass bis 2040 noch kein seit 2004 anthropogen emittiertes CO₂ abgebaut wurde, können die kumulierten Emissionen durch die Elektrifizierung durch Aufsummieren berechnet werden. Durch die Elektrifizierung können die kumulierten CO₂-Emissionen um 18,1% reduziert werden. Nach den Berechnungen der Variante 1 sind die CO₂-Emissionen bis 2021 gestiegen. Die Maßnahmen des Mobilitätsmasterplans 2030 beziehen sich auf die Jahre nach dem Erscheinungsjahr 2021¹¹⁶. Erst ab dem Jahr 2022 wird mit einer

¹¹⁶ BMK, 2021, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 64

abnehmenden Fahrleistung gerechnet. In Diagramm 7.5 wird die Trägheit des CO₂-Abbaus verdeutlicht.

Diagramm 7.4: Vergleich der jährlichen CO₂-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

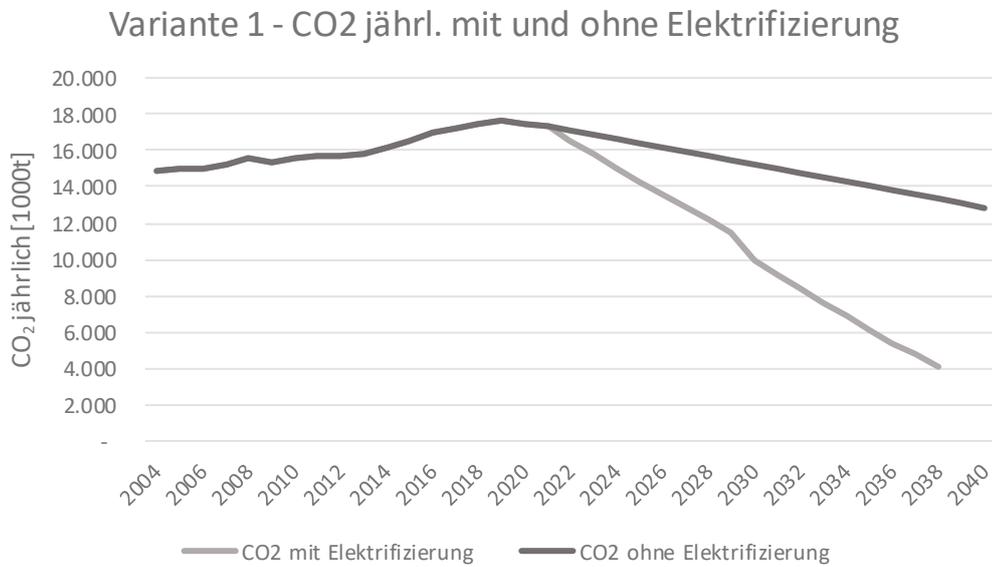
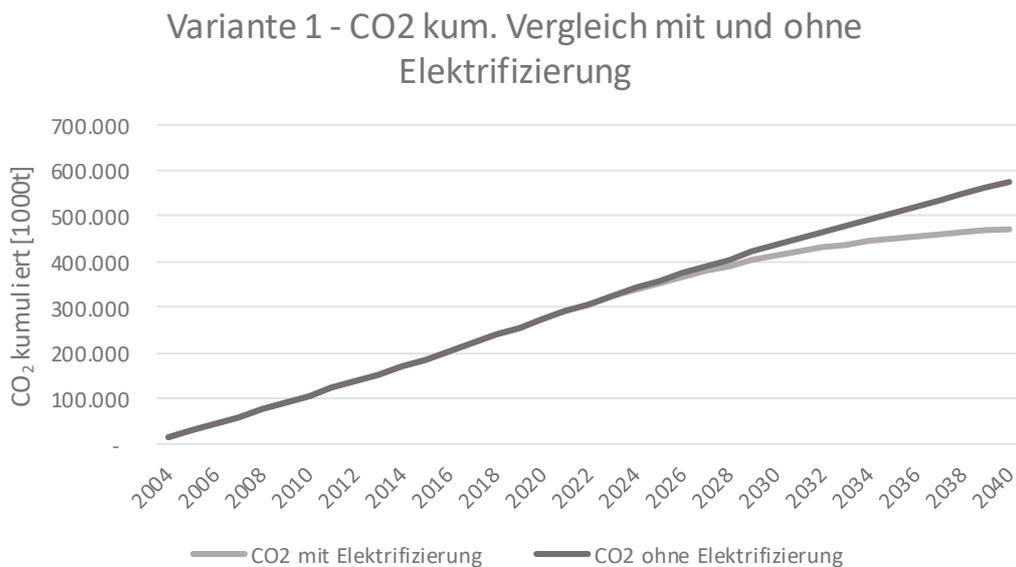


Diagramm 7.5: Vergleich der kumulierten CO₂-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1



Die Berechnung nach Variante 2 verdeutlicht in Bezug auf CO₂-Emissionen neben der Elektrifizierung die Notwendigkeit der Verringerung der Fahrleistung. In Diagramm 7.6 sind die Verläufe der jährlichen CO₂-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung des österreichischen

Fuhrparks dargestellt. Ohne Elektrifizierung und Reduzierung der Fahrleistung kann der CO₂-Ausstoß nicht reduziert werden, dieser steigt bis 2040 um 41,3%. Durch die Elektrifizierung ist eine Einsparung der jährlichen CO₂-Emissionen von 76,2% möglich.

Diagramm 7.6: Vergleich der jährlichen CO₂-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

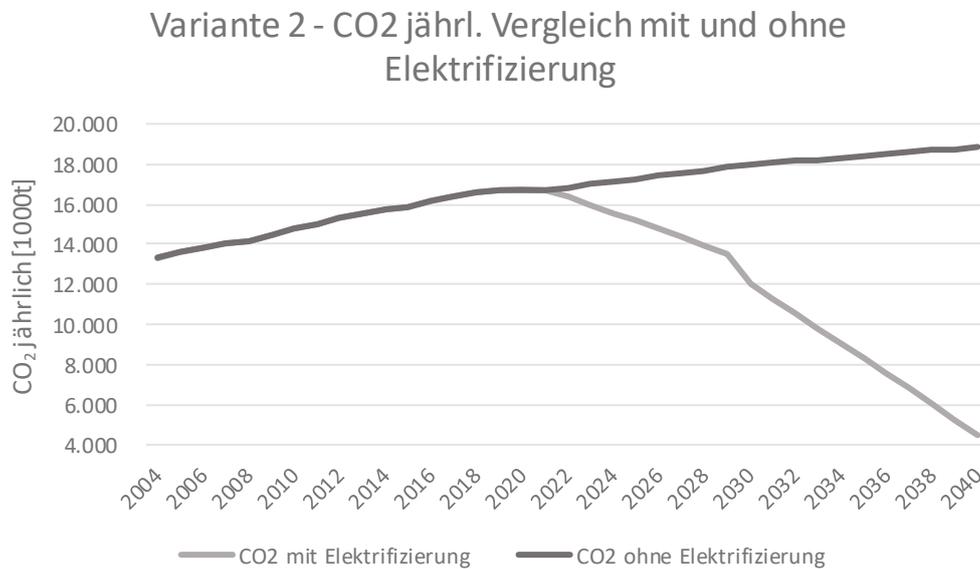
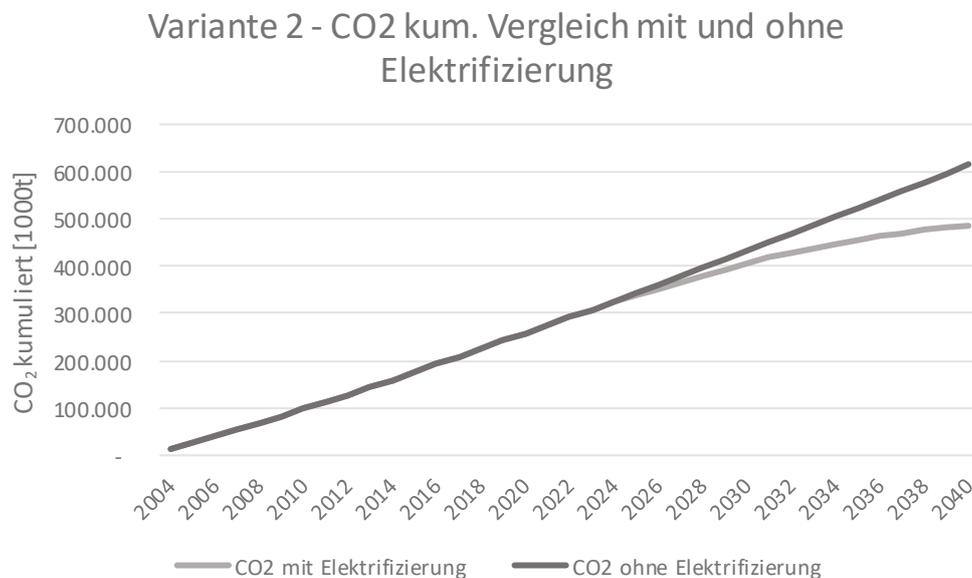


Diagramm 7.7: Vergleich der kumulierten CO₂-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



Auch die jährlichen NO_x-Emissionen können durch die Reduktion der Fahrleistung im Fall Elektrifizierung um 85,6% und im Fall ohne Elektrifizierung um 8,3% reduziert werden. Durch

die Elektrifizierung kann bis 2040 der Eintrag in die Umwelt von 321.000 t NO_x verhindert werden.

Diagramm 7.8: Vergleich der jährlichen NO_x-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

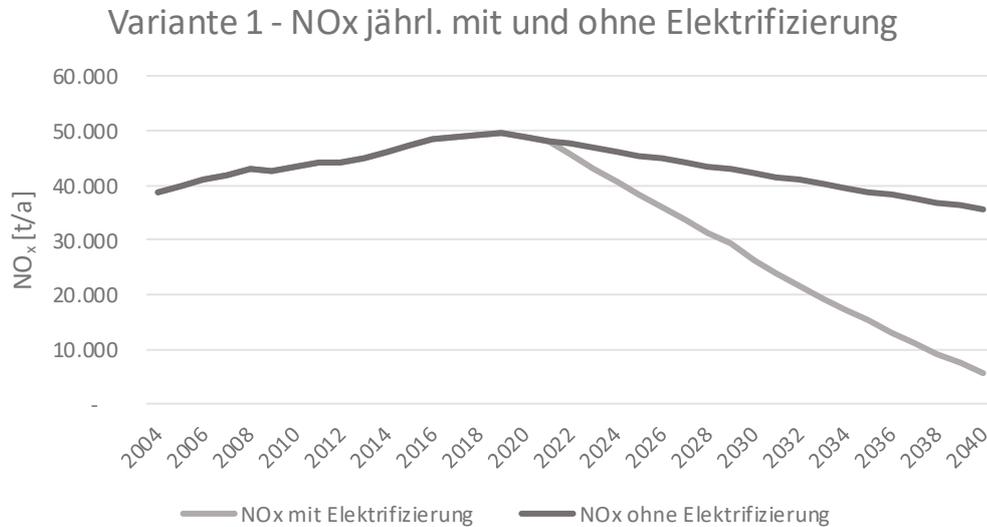
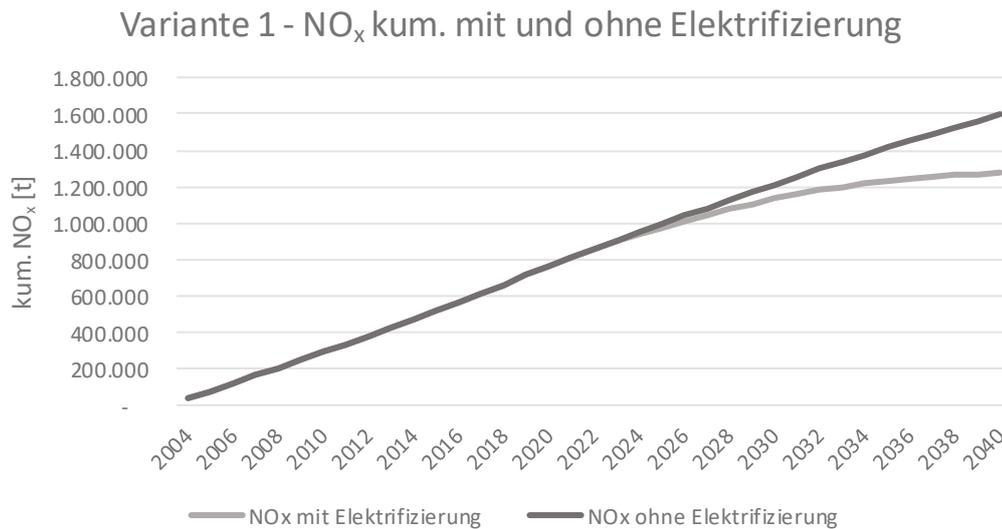
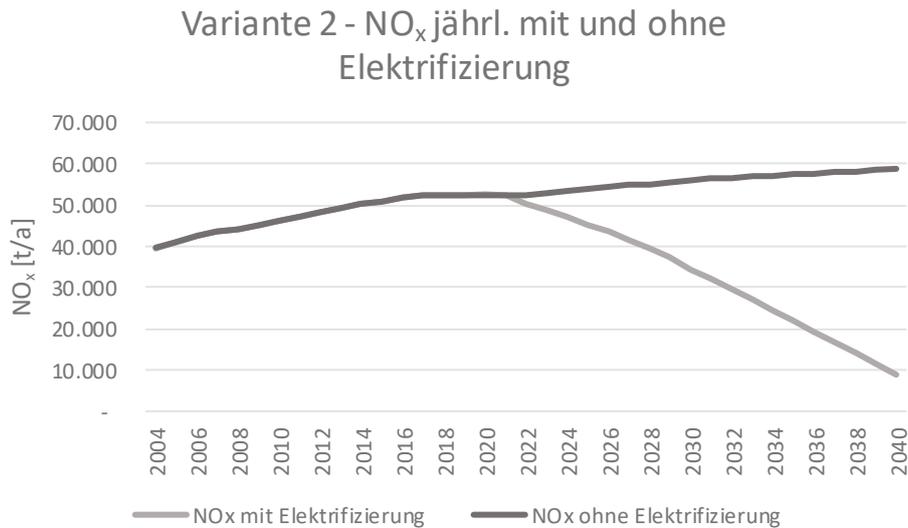


Diagramm 7.9: Vergleich der kumulierten NO_x-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1



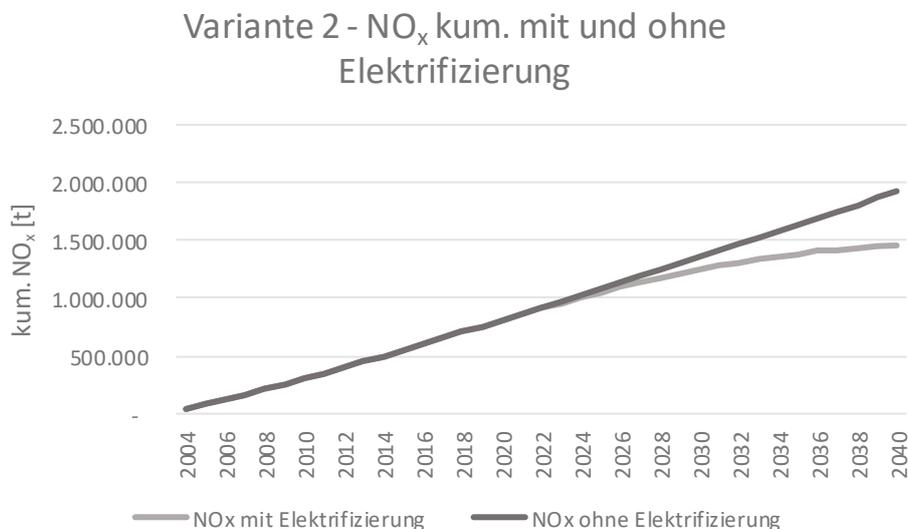
Variante 2 verdeutlicht wiederum die Notwendigkeit der Fahrleistungsreduktion, da ohne keine Reduktion der NO_x-Emissionen möglich ist. Mit Elektrifizierung ist bis 2040 (Basisjahr 2021) eine Reduktion der jährlichen Emissionen von 83,0% möglich, ohne nehmen die Emissionen um 12,8% zu.

Diagramm 7.10: Vergleich der jährlichen NO_x-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



Durch die Elektrifizierung kann die Zunahme der kumulierten NO_x-Emissionen von 6,4% auf 0,6% reduziert werden. Insgesamt kann durch die Elektrifizierung eine Einsparung der kumulierten NO_x-Emissionen von 24,4% erzielt werden bezogen auf die Emissionen ohne Elektrifizierung.

Diagramm 7.11: Vergleich der kumulierten NO_x-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



Der durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen jährlich entstehende Feinstaub kann durch die Elektrifizierung um 47,8% reduziert werden und der kumulierte Feinstaub bis 2040 um 15,63% bezogen auf die Feinstaubemissionen ohne Elektrifizierung. Durch die sinkende

Fahrleistung im MIV sinken auch die jährlichen Feinstaubemissionen mit und ohne Elektrifizierung.

Diagramm 7.12: Vergleich der jährlichen Feinstaubemissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

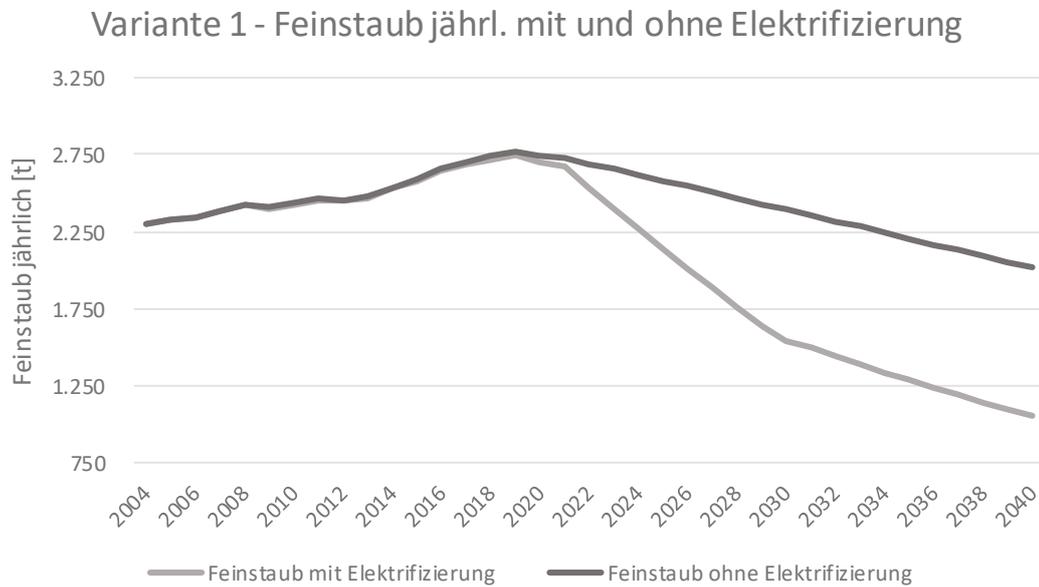
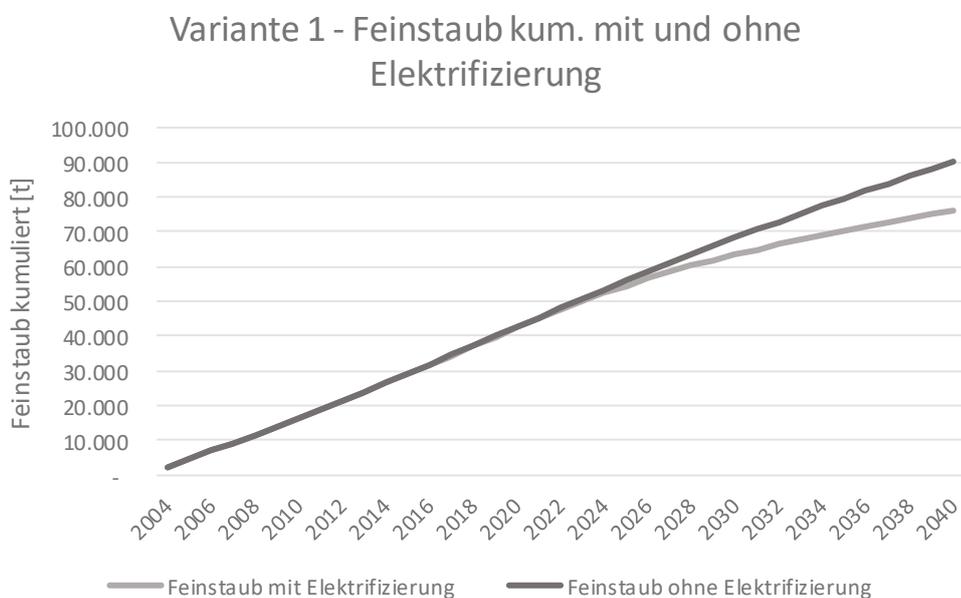


Diagramm 7.13: Vergleich der kumulierten Feinstaubemissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1



Durch die Elektrifizierung kann trotz steigender Fahrleistung bis 2040 der Feinstaubeintrag in die Umwelt reduziert werden, ohne Elektrifizierung würde dieser bis 2040 stetig wachsen, bis zum Jahr 2040 entspricht dies einer Zunahme von 43,3% (Basisjahr 2004). Durch die Elektrifizierung ist bis 2040 eine Einsparung von ca. 12,6 t kumuliertem Feinstaub erzielbar, dies entspricht einer Reduktion von 12,9%.

Diagramm 7.14: Vergleich der jährlichen Feinstaub-Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

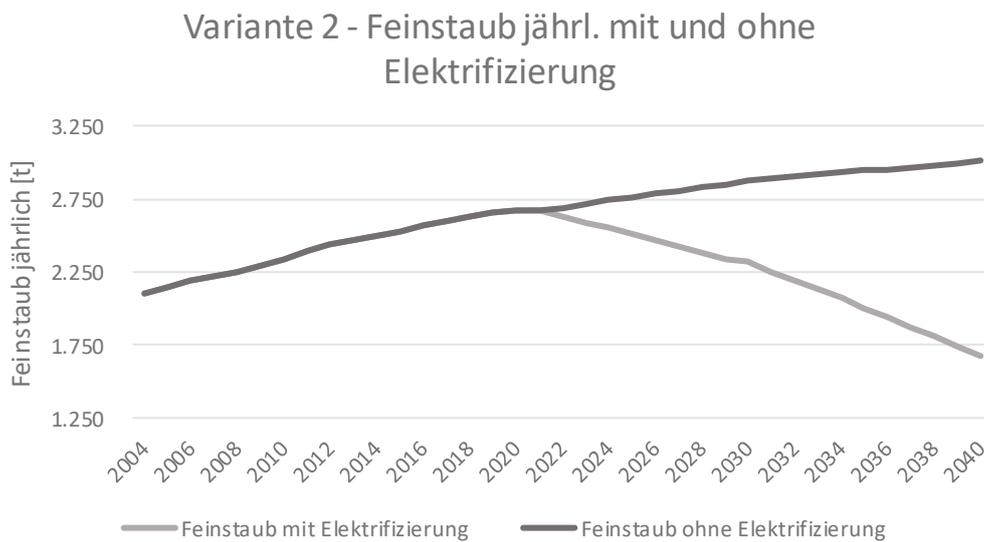
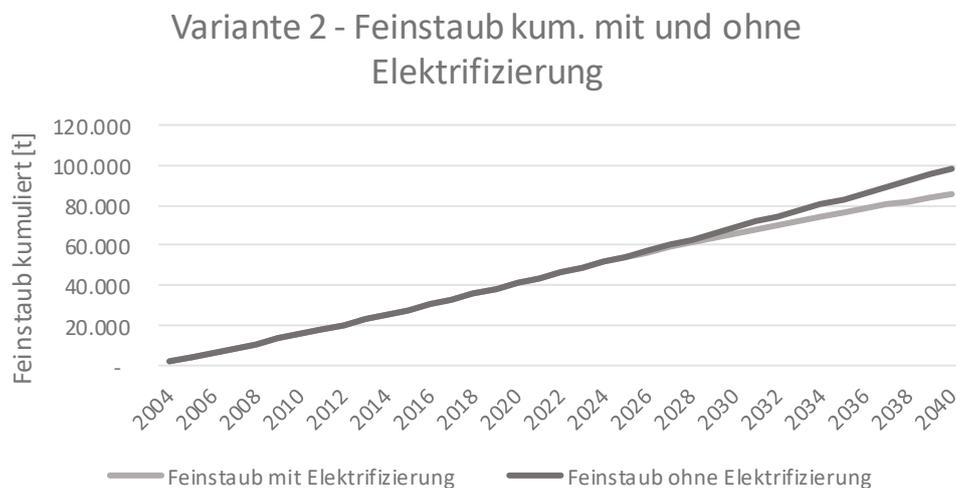


Diagramm 7.15: Vergleich der kumulierten Feinstaub-Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



7.1.2 Nicht-Abgasemissionen

Für die Berechnung des Reifenabriebs werden die Werte aus Prenner et al. (2021) herangezogen. Die Werte für PC (passenger car) werden für benzin- und dieselbetriebene Kraftfahrzeuge eingesetzt, der Wert für BEV100 (batteryelectric vehicle) für Elektrofahrzeuge und der Wert für Fahrzeuge mit sonstigen Antrieben wird aus dem Mittelwert von Diesel- bzw. Benzinfahrzeugen und Elektrofahrzeugen berechnet. Die Ergebnisse der pro Fahrzeug- bzw. Personenkilometer erzeugten Reifenabriebemissionen sind in Tab. 7.1 zusammengefasst.

Tab. 7.1: Angesetzter Reifenabrieb in g/km und g /Pkm²³

Antriebsart	g/Fzkm	g/Pkm
PC	0,1250	0,1096
PC (BEV100)	0,1733	0,1520
PC (BEV300)	0,1295	0,1136
Benzin	Ann.: 0,1250	Ann.: 0,1096
Diesel	Ann.: 0,1250	Ann.: 0,1096
Elektro	Ann.: 0,1733	Ann.: 0,1520
Sonstige	Ann.: 0,1492	Ann.: 0,1308

Die Abnahme des Reifenabriebs ohne Elektrifizierung liegt an der Abnahme der Fahrleistung bis 2040. Durch die Elektrifizierung kann trotz Abnahme der Fahrleistung keine Reduktion des Reifenabriebs erzielt werden, dieser nimmt bis 2040 um 1,66% zu (Bezugsjahr 2021). Der Verläufe des jährlichen und des kumulierten Reifenabriebs bis 2040 sind in Diagramm 7.16 und Diagramm 7.17 dargestellt. Durch die Elektrifizierung kommt es zu einem Mehreintrag von Reifenabrieb bis 2040 von ca. 25 t.

Diagramm 7.16: Vergleich des jährlichen Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

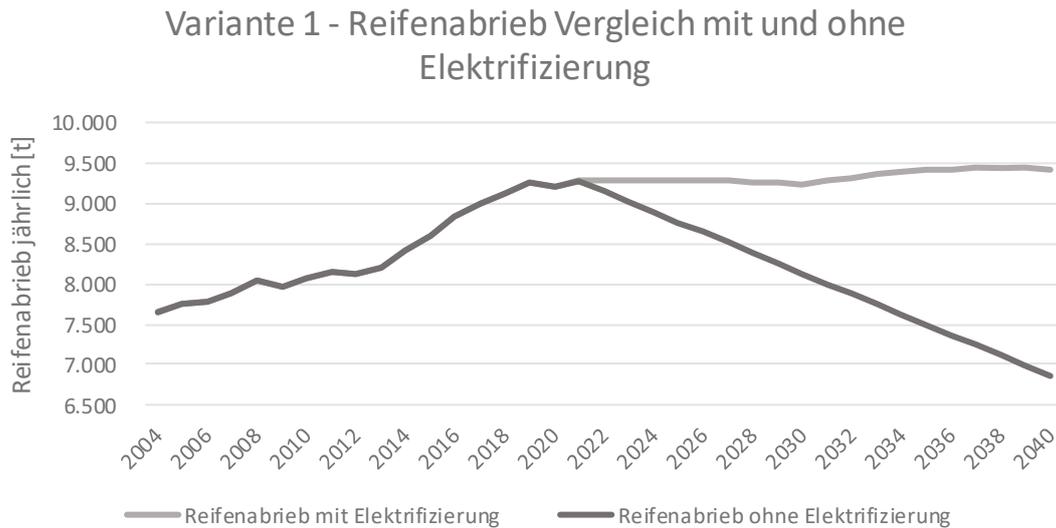
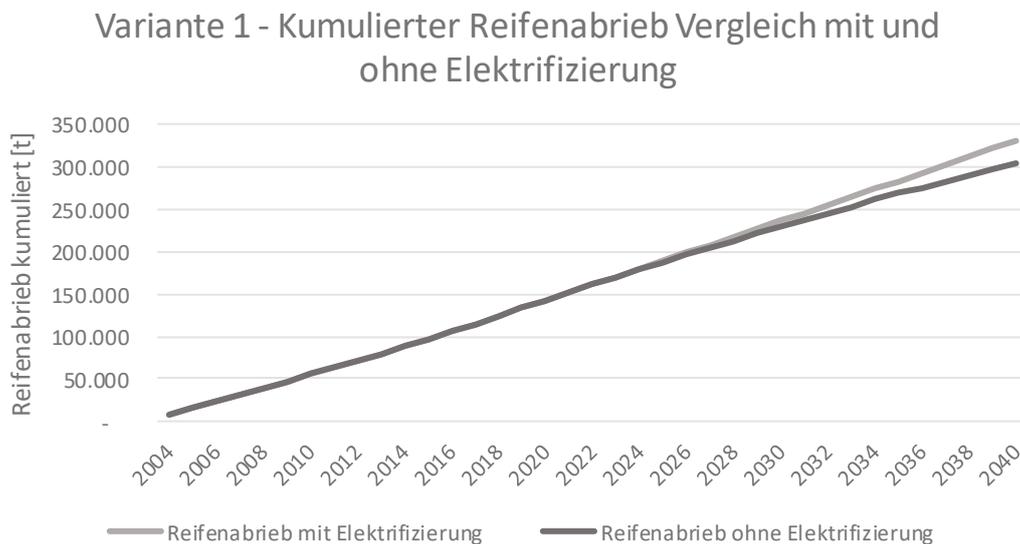


Diagramm 7.17: Vergleich des kumulierten Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1



Die Berechnungsvariante 2 verdeutlicht wiederum die Notwendigkeit der Fahrleistungsreduktion. In beiden Fällen nimmt der Reifenabrieb bis 2040 weiter zu, ohne Elektrifizierung um 12,90% und mit Elektrifizierung um 66,12% (Basisjahr 2021). Die Verläufe sind in Diagramm 7.18 und Diagramm 7.19 dargestellt. Durch die Elektrifizierung kommt es zu einem zusätzlichen Eintrag von ca. 42,0 t Reifenabrieb.

Diagramm 7.18: Vergleich des jährlichen Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

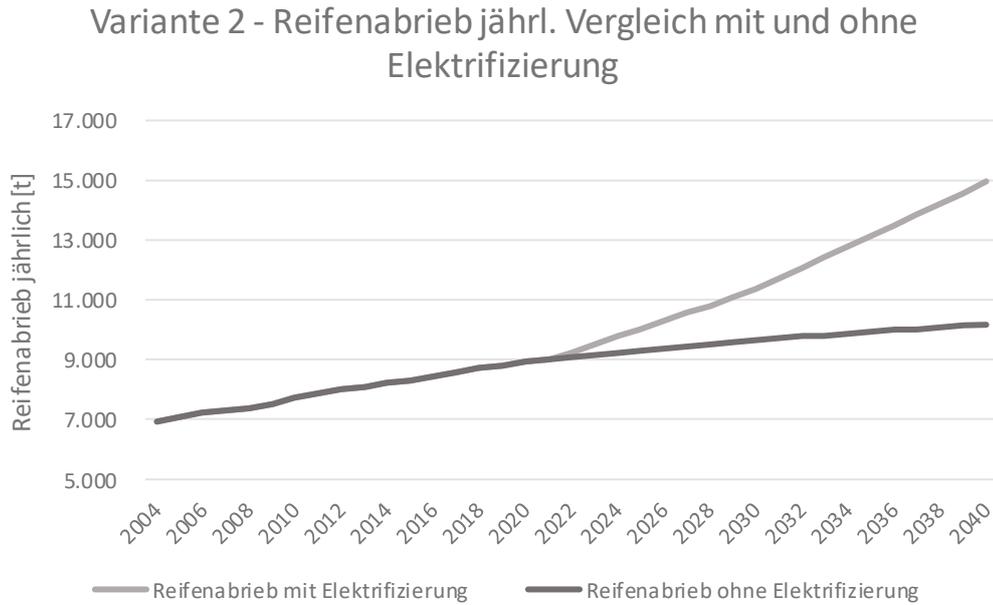
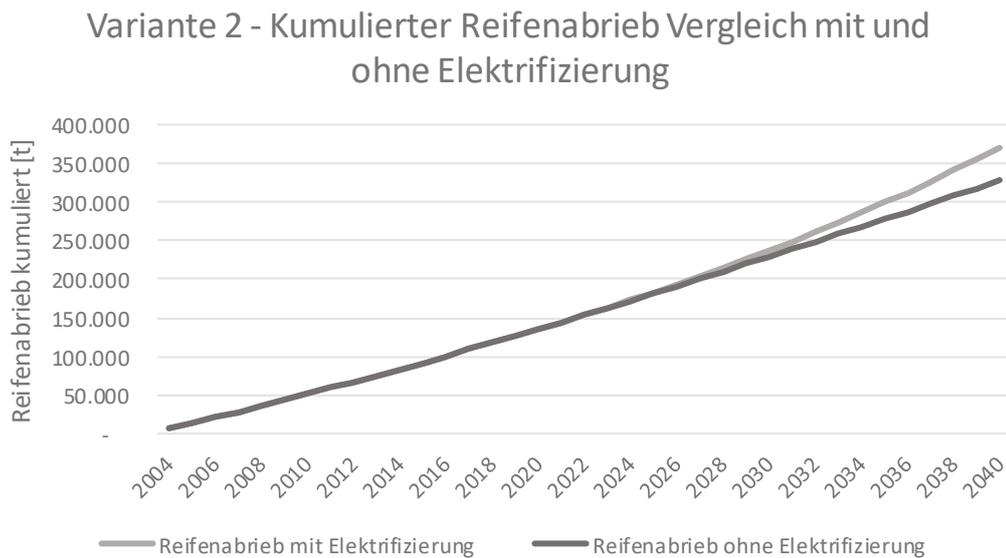


Diagramm 7.19: Vergleich des kumulierten Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



Für den Vergleich der Partikelemissionen mit und ohne Elektrifizierung werden die Werte gemäß Tab. 5.5, Tab. 5.7, Tab. 5.9 und Tab. 5.11 herangezogen. Die Ergebnisse sind in unten stehendem Diagramm dargestellt. Durch die Elektrifizierung kommt es zu höheren PM-Emissionen für beide Varianten der Fahrleistungsberechnung. In Diagramm 7.20 nehmen die PM_{0,1}-Emissionen aufgrund der Reduktion der Fahrleistung in beiden Fällen ab, während sie

in Diagramm 7.22 aufgrund der steigenden Fahrleistung zunehmen. Die Elektrifizierung erhöht in beiden Fällen die PM_{0,1}-Emissionen.

Diagramm 7.20: Vergleich der jährlichen PM_{0,1}-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

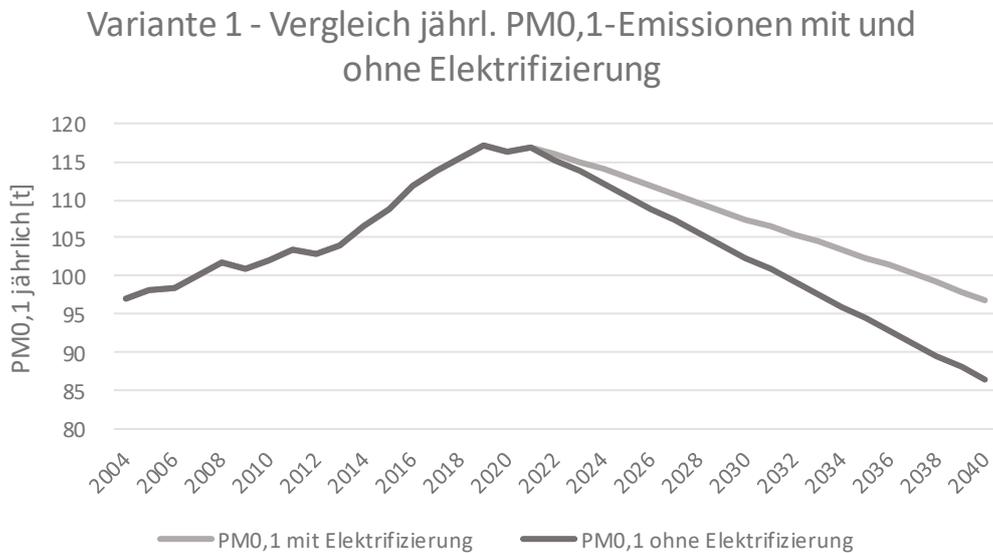


Diagramm 7.21: Vergleich der kumulierten PM_{0,1}-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

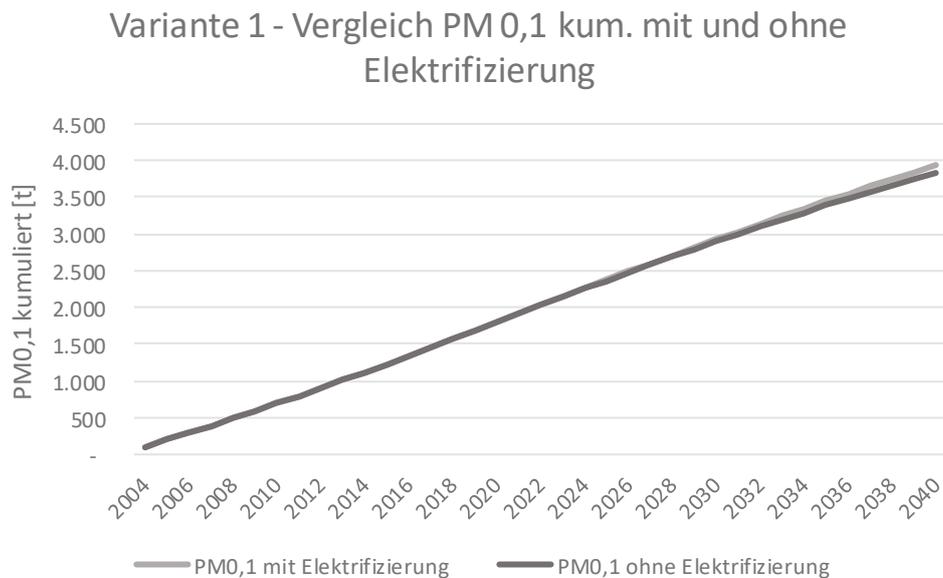


Diagramm 7.22: Vergleich der jährlichen PM0,1-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

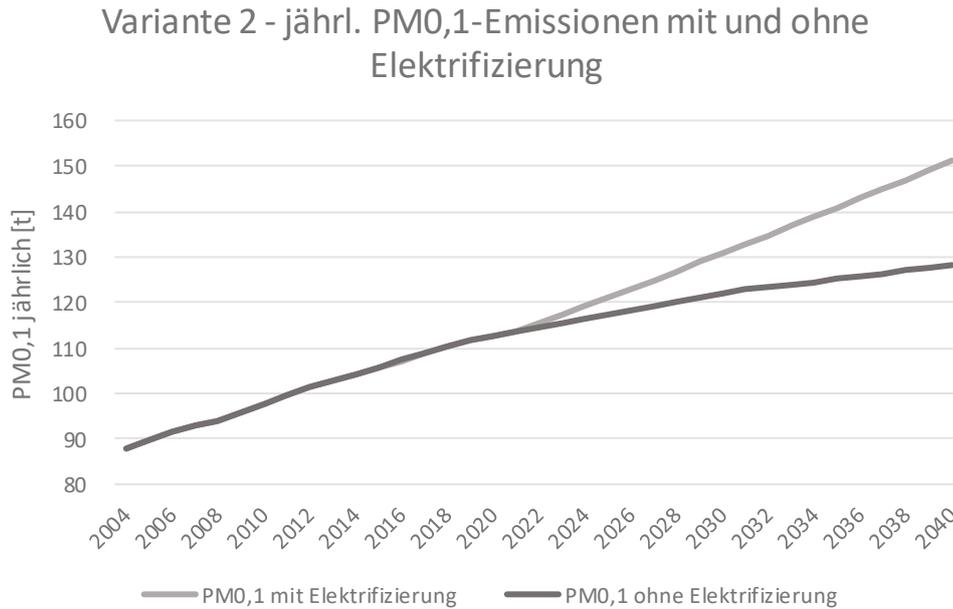
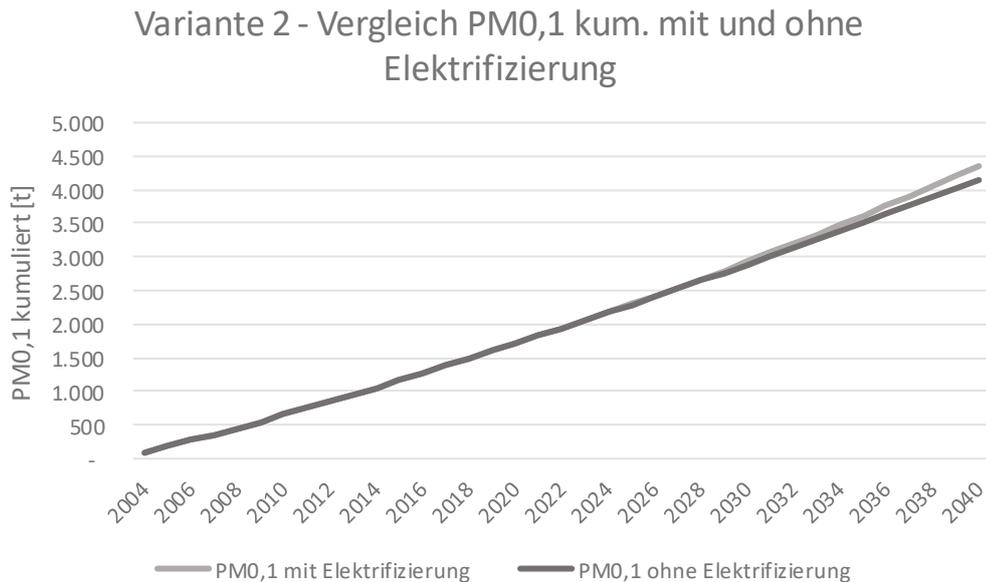


Diagramm 7.23: Vergleich der kumulierten PM0,1-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



Die jährlichen PM1,0- und PM2,5-Emissionen weisen einen ähnlichen Verlauf auf. In Diagramm 7.24, Diagramm 7.25, Diagramm 7.26 und Diagramm 7.27 sind die kumulierten PM1,0- und PM2,5-Emissionen dargestellt. Durch die Elektrifizierung kann für keine dieser Partikelgrößen eine Einsparung der kumulierten Emissionen erzielt werden, diese bleiben bis

2040 annähernd gleich oder werden erhöht. Aufgrund der Ähnlichkeit der jährlichen Emissionsverläufe zu den Verläufen der PM_{0,1}-Emissionen werden diese nicht dargestellt.

Diagramm 7.24: Vergleich der kumulierten PM_{1,0}-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

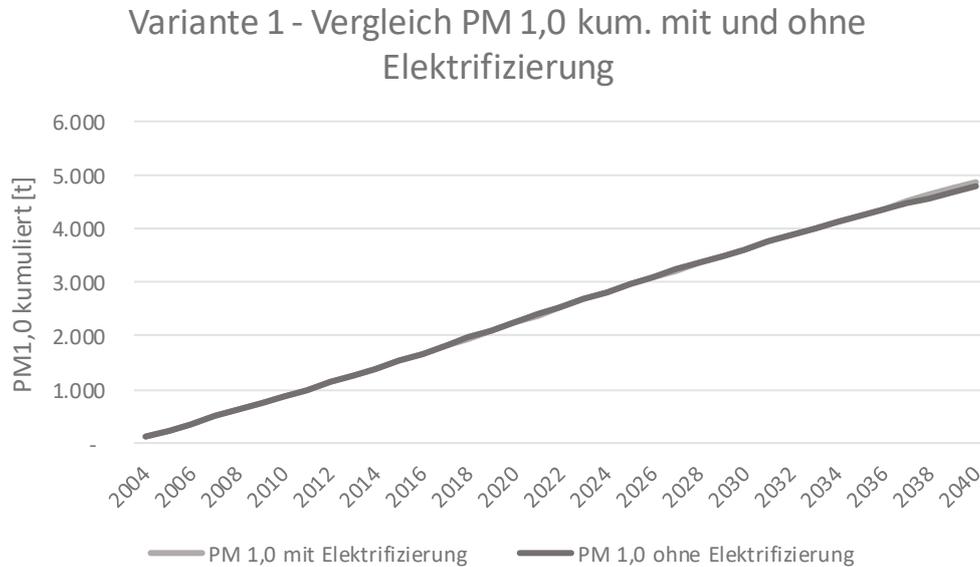


Diagramm 7.25: Vergleich der kumulierten PM_{1,0}-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

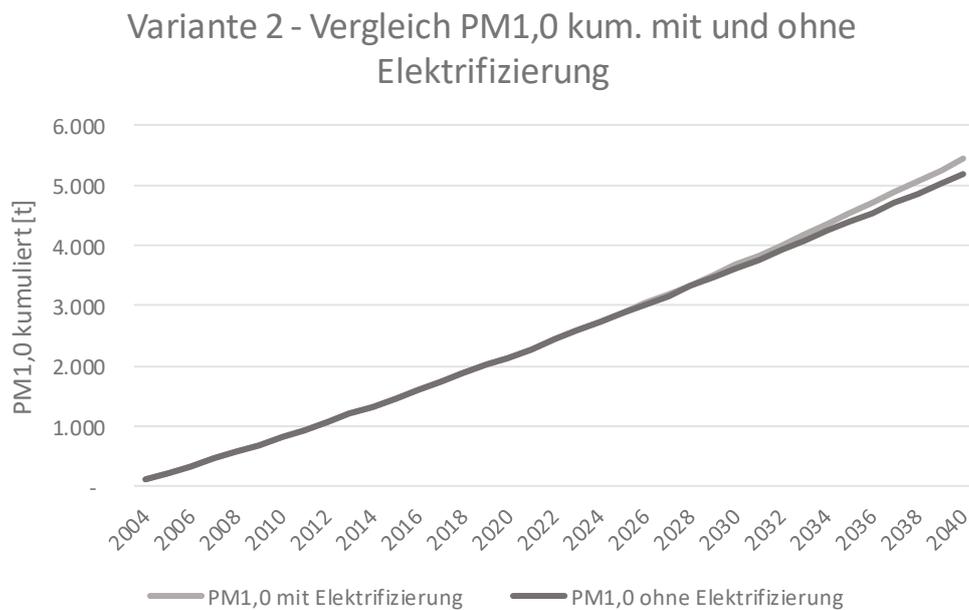


Diagramm 7.26: Vergleich der kumulierten PM2,5-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

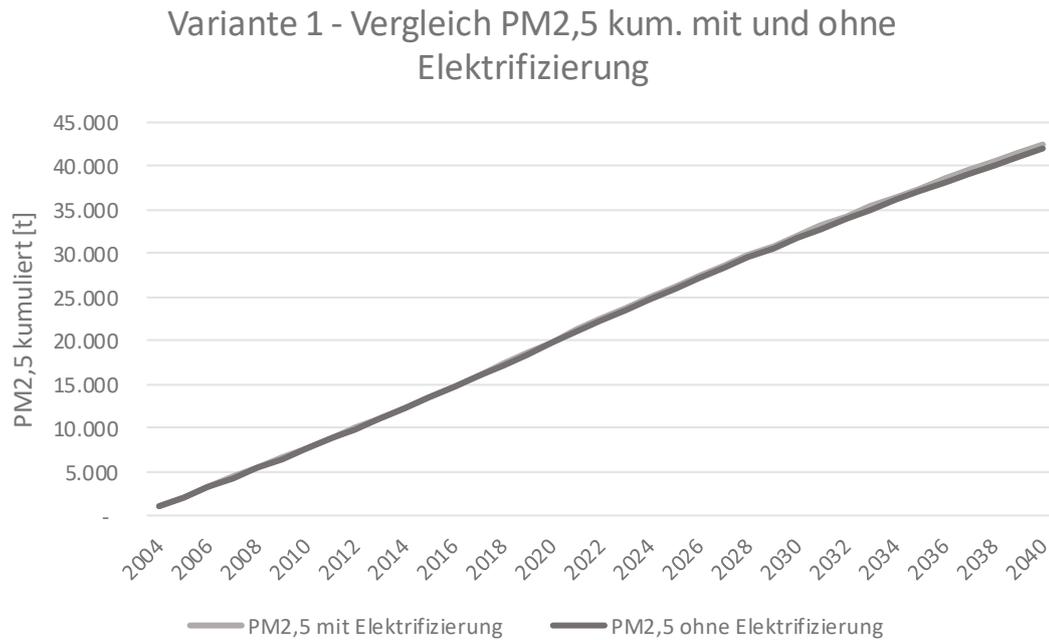
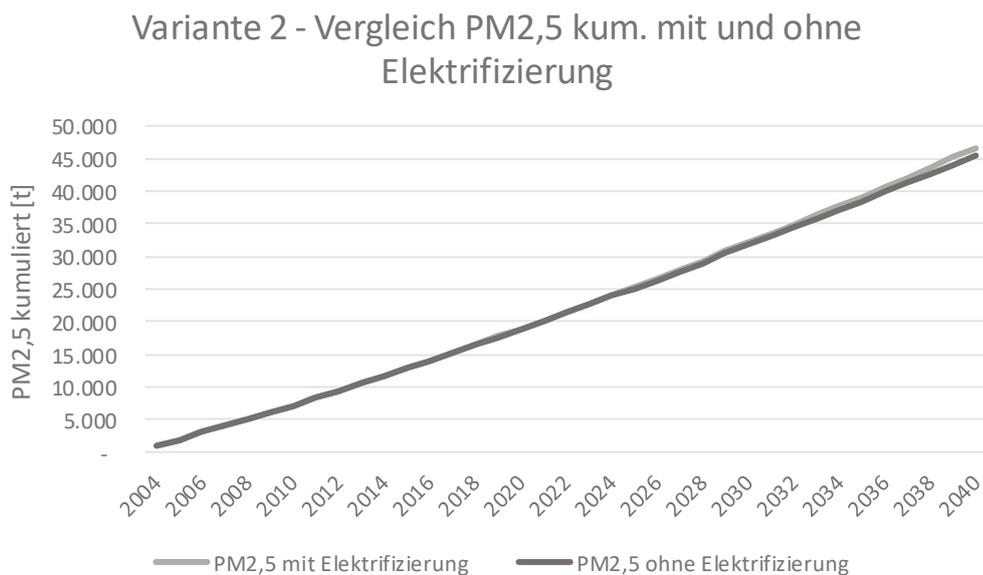


Diagramm 7.27: Vergleich der kumulierten PM2,5-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



Auch die jährlichen PM10-Emissionen können durch die Elektrifizierung nicht verringert werden, lediglich die Reduktion der Fahrleistung kann eine Reduktion der PM10-Emissionen erzielen. Dies ist in Diagramm 7.28 dargestellt. Die kumulierten Emissionen haben einen annähernd gleichen Verlauf, durch die Elektrifizierung kommt es zu einem Mehreintrag von PM10-Emissionen bis 2040 von 1,88%.

Diagramm 7.28: Vergleich der jährlichen PM10-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1

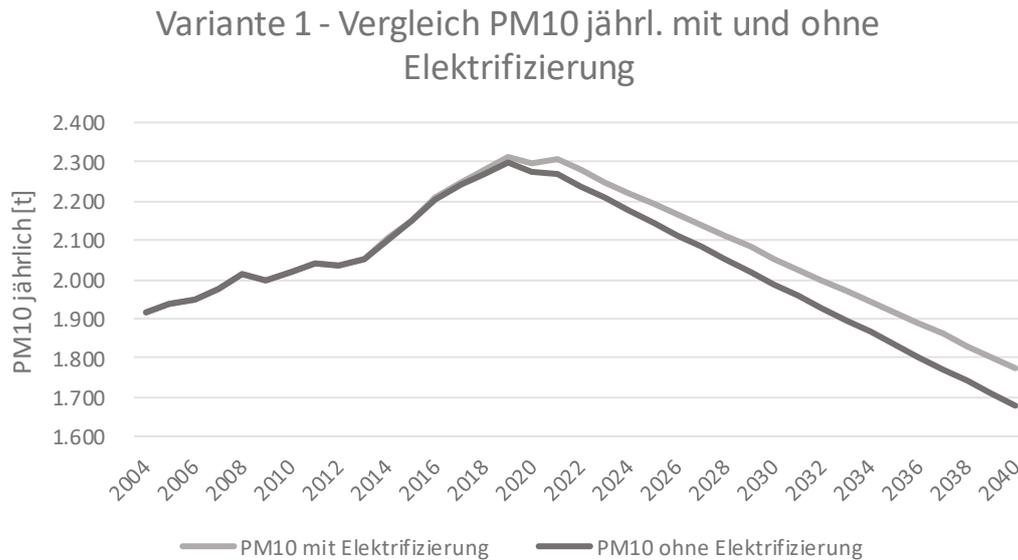
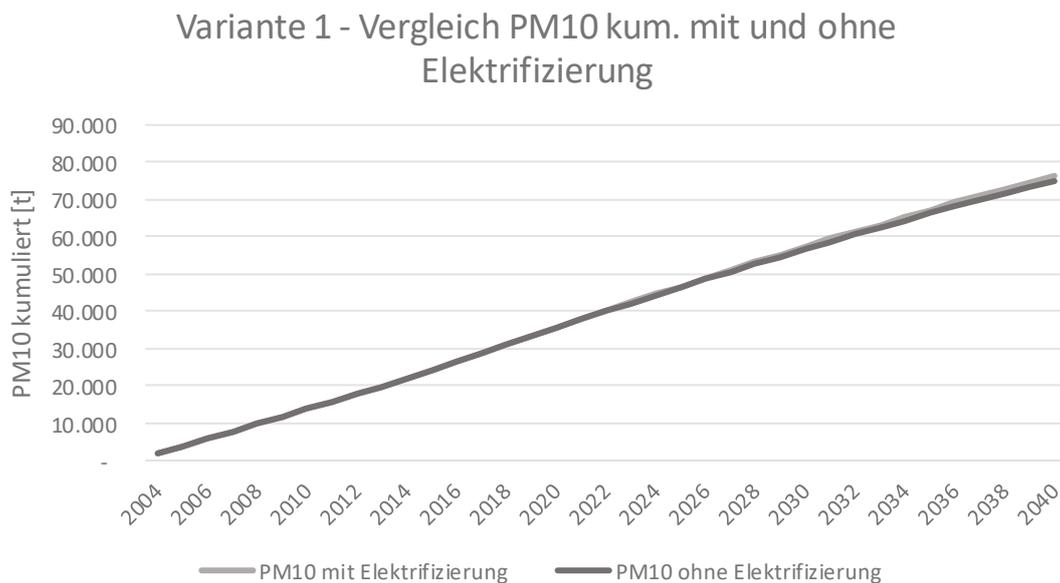


Diagramm 7.29: Vergleich der kumulierten PM10-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1



Eine Erhöhung der Fahrleistung führt in beiden Fällen zu einer Erhöhung der jährlichen PM10-Emissionen, durch die Elektrifizierung wird diese noch weiter verstärkt.

Durch die Elektrifizierung kommt es nach Variante 2 der Fahrleistung zu einem Mehreintrag der kumulierten PM10-Emissionen bis 2040 von 3,2%.

Diagramm 7.30: Vergleich der jährlichen PM10-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2

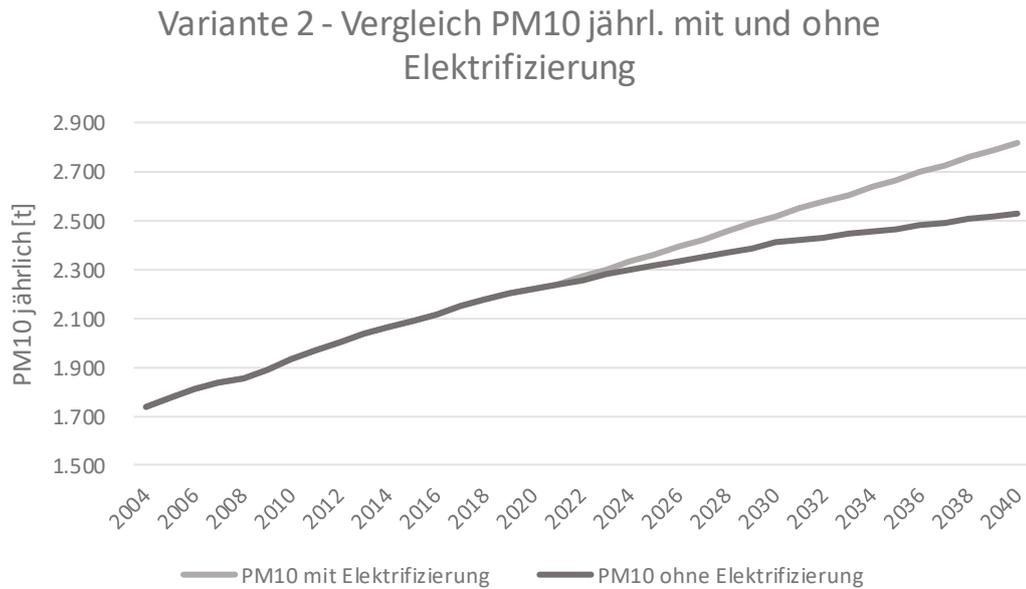
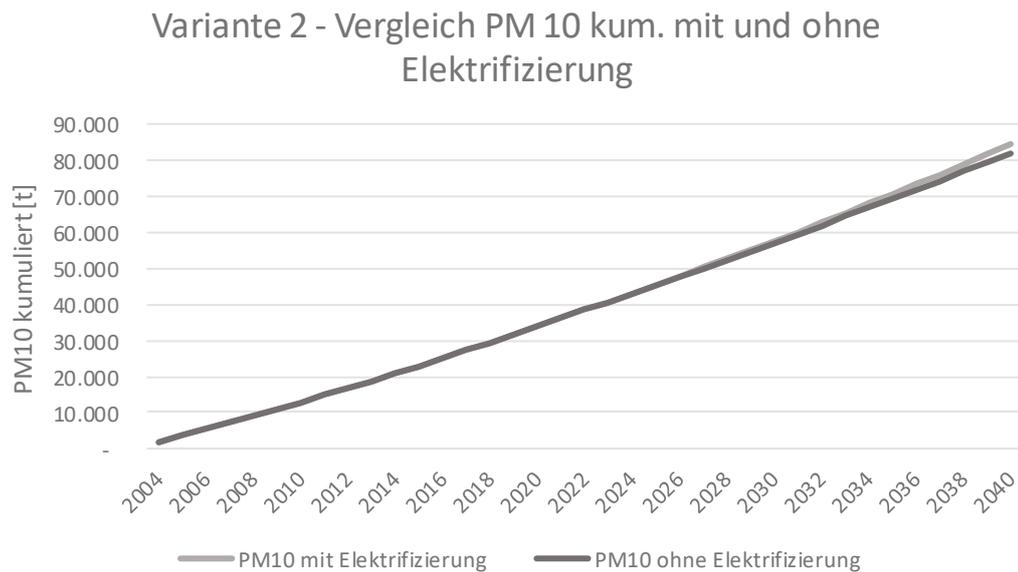


Diagramm 7.31: Vergleich der kumulierten PM10-Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2



7.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in Kap. 7.1.1 und 7.1.2 berechneten jährlichen und kumulierten Emissionen sind in den nachstehenden Tabellen zusammengefasst.

Tab. 7.2: Vergleich der jährlichen und kumulierten Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 1

Variante 1 (2040)	Mit Elektrifizierung	Ohne Elektrifizierung	Differenz [%]
Fahrleistung [Pkm]	62,0 Mrd.	62,0 Mrd.	0,0%
CO₂-Emissionen			
jährlich [1000t]	2.821	12.825	-78,00%
kumuliert [1000t]	470.842	574.803	-18,09%
NO_x-Emissionen [t]			
jährlich [t]	5.580	35.563	-84,31%
kumuliert [t]	1.277.448	1.598.471	-20,08%
Feinstaub [t]			
jährlich [t]	1.054	2.019	-47,80%
Kumuliert [t]	76.119	90.222	-15,63%

Tab. 7.3: Vergleich der jährlichen und kumulierten Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 2

Variante 1 (2040)	Mit Elektrifizierung	Ohne Elektrifizierung	Differenz [%]
Fahrleistung [Pkm]	98,5 Mrd.	91,9 Mrd.	+7,18%
CO₂-Emissionen			
jährlich [1000t]	4.480	18.849	-76,23%
kumuliert [1000t]	485.465	615.726	-21,16%
NO_x-Emissionen [t]			
jährlich [t]	8.861	58.769	-84,92%
kumuliert [t]	1.456.108	1.926.167	-24,40%
Feinstaub [t]			
jährlich [t]	1.674	3.011	-44,40%
Kumuliert [t]	85.498	98.137	-12,88%

Tab. 7.4: Vergleich der jährlichen und kumulierten Nicht-Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 1

Variante 1 (2040)	Mit Elektrifizierung	Ohne Elektrifizierung	Differenz [%]
Fahrleistung [Pkm]	62,0 Mrd.	60,2 Mrd.	0,0%
Reifenabrieb			
jährlich [t]	9.425	6.857	+37,45%
kumuliert [t]	328.664	303.300	+8,36%
PM_{0,1}-Emissionen			

jährlich [t]	97	86	+12,79%
kumuliert [t]	3.940	3.382	+16,50%
PM1,0-Emissionen			
jährlich [t]	121	108	+12,04%
kumuliert [t]	4.865	4.790	+1,57%
PM2,5-Emissionen			
jährlich	965	947	+1,90%
kumuliert	42.473	42.020	+1,08%
PM10-Emissionen			
jährlich [t]	1.774	1.678	+5,72%
kumuliert [t]	76.341	74.936	+1,88%

Tab. 7.5: Vergleich der jährlichen und kumulierten Nicht-Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 2

Variante 1 (2040)	Mit Elektrifizierung	Ohne Elektrifizierung	Differenz [%]
Fahrleistung [Pkm]	98,5 Mrd.	91,9 Mrd.	+7,18%
Reifenabrieb			
jährlich [t]	14.966	10.171	+47,14%
kumuliert [t]	370.097	328.276	+12,74%
PM0,1-Emissionen			
jährlich [t]	154	128	+20,31%
kumuliert [t]	4.377	4.146	+5,57%
PM1,0-Emissionen			
jährlich [t]	192	160	+20,00%
kumuliert [t]	5.471	5.182	+5,58%
PM2,5-Emissionen			
jährlich	1.532	1.404	+9,12%
kumuliert	46.804	45.450	+2,98%
PM10-Emissionen			
jährlich [t]	2.816	2.527	+11,44%
kumuliert [t]	84.409	81.798	+3,19%

8 Grundproblem Reifenabrieb

Durch die in Kapitel 5, 6 und 7 dargestellten Ergebnisse wird verdeutlicht, dass emissionseinsparende Maßnahmen, wie beispielsweise Reduktion der Fahrleistung und

Umstieg auf klimaneutrale Antriebsarten, zur Reduktion von Abgasemissionen eine große Effektivität aufweisen. Die Elektrifizierung der österreichischen Pkw- und Lkw-Flotte ermöglicht gemäß Tab. 5.14 und Tab. 5.15 aufgrund des Wegfalls direkter Emissionen eine Einsparung von über 80% der CO₂- und NO_x-Emissionen und ca. 70% der Abgas-Feinstaubemissionen. Gleichzeitig steigen aufgrund der höheren Abriebraten von Elektrofahrzeugen die jährlichen Reifenabriebemissionen. Hier erweist sich eine Reduktion der Fahrleistung als effektiv, die höheren Reifenabriebemissionen auszugleichen. Durch Reduktion der Personenfahrleistung des motorisierten Individualverkehrs und Übertragung auf andere Verkehrsträger, wie beispielsweise den öffentlichen Personennahverkehr, kann hier die Zunahme der jährlichen Reifenabriebemissionen bis 2040 gemäß Tab. 5.14 auf 2,26% begrenzt werden. Eine Zunahme der Verkehrsleistung nach Berechnungsvariante 2 (Kap. 4.1.3) bewirkt gemäß Tab. 5.15 eine überproportionale Zunahme der Reifenabriebemissionen. Die Zunahme der Personenverkehrsleistung um ca. 21,7% induziert eine Zunahme der Abriebemissionen um ca. 68%.

Steigende Nicht-Abgasemissionen sind ein negativer Effekt von klimawirksamen Maßnahmen zur Reduktion der Abgasemissionen. Während beispielsweise die Emissionen von Treibhausgasen stark eingeschränkt werden, tut sich ein neues Umweltproblem auf. Die tatsächliche Eintragungsmenge und die weitreichenden Folgen von Mikroplastik, sowie dessen Toxizität sind Grundlage zahlreicher Studien (Pabortsava, K., Lampitt R. S. (2020), Khan et al. (2019), Halle et al. (2020), Unice et al. (2015)).

8.1 Reifenabrieb in Kläranlagen

Das durch Reifenabrieb entstehende Mikroplastik lagert sich auf der Straße bzw. in einem Bereich fünf Meter links und rechts vom Straßenrand ab. Diese Ablagerungen werden vom Niederschlagswasser in die Kanalisation geschwemmt, von wo aus sie in Kläranlagen bzw. in Klärschlamm nachgewiesen werden können⁶⁹. Laut Fraunhofer UMSICHT ist Reifenabrieb mit 1228,5 g/(cap*a) der Hauptverursacher von Mikroplastikemissionen. Die größten Emittenten darunter sind Personenkraftwagen mit 998,0 g/(cap*a), gefolgt von Lastkraftwagen mit 89,0g/(cap*a)⁶⁶.

Die Ausführung des Kanalsystems ist ein wichtiger Faktor bezüglich der im Klärschlamm nachweisbaren Menge an Reifenabrieb. Mischsysteme, bei welchen Niederschlagswasser sowie Schmutzwasser gemeinsam geführt werden, bringen eine größere Menge an Reifenabrieb in Kläranlagen ein als Trennsysteme. Dies rührt daher, dass das Niederschlagswasser die Reifenabriebpartikel von der Straße in den Kanal transportiert¹¹⁷. In

¹¹⁷ Sexlinger, K.; Liebmann, B., 2021, Mikroplastik in Klärschlamm – REP-0773, vgl. S. 20

Österreich gab es mit Stand 2020 24.100 km Mischsysteme und 58.300 km Trennsysteme¹¹⁸. Ein erhöhter Gehalt an Reifenabrieb in Kläranlagen mit hauptsächlich Mischsystem konnte in zehn ausgewählten Proben nachgewiesen werden. Die Menge des Reifenabriebs im entnommenen Klärschlamm schwankte hier zwischen 2,56 µm/g und 45,06 µm/g¹¹⁷.

Die massenbezogene Abscheideeffizienz für Mikroplastik wird auf 95% geschätzt, dies bedingt, dass ein großer Teil des Mikroplastiks im Klärschlamm zurückbleibt¹¹⁹.

Die Problematik besteht darin, dass dieser Klärschlamm teils in der Landwirtschaft als Düngemittel eingesetzt wird und so ca. 35% des Mikroplastiks wieder in die Umwelt gelangen. Durch Ausspülen bzw. Auswaschen durch Niederschläge wird dieses Mikroplastik in der Umwelt verteilt¹²⁰.

8.2 Reifenabrieb in Ozeanen

Die Transferraten von Mikroplastik in Ozeane sind umstritten und schwanken zwischen 2% und 47%¹²¹. Laut Kole et al. (2017) besteht das sich im Meer befindende Mikroplastik zu 5% bis 10% aus Reifenabrieb¹⁵.

Die Wirkungen von Mikroplastik auf Meeresorganismen, die in Studien beobachtet werden konnten, sind die folgenden¹²²:

- Wachstumsstörungen
- reduzierte Nachwuchszahlen
- verzögerter Entwicklung
- Deformationen
- Tod

Laut Khan et al. (2019) nehmen *Hyalella Azteca*, eine Krustentierart, wenn sie einer gewissen Konzentration von Reifenabrieb im Wasser ausgesetzt sind, bereits nach einer Stunde Reifenabriebpartikel auf. Nach 24 Stunden ist der gesamte Verdauungstrakt mit Reifenabrieb gefüllt. In sauberem Wasser konnten nach 48 Stunden keine Reifenabriebpartikel in den Ausscheidungen nachgewiesen werden, dadurch kann man auf eine Retentionszeit im Darm von 24 bis 48 Stunden schließen¹²³.

¹¹⁸ BMLRT, Kanal- und Wasserleitungsbestand – Stand Ende 2020

¹¹⁹ Bertling et al., 2018, Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik, vgl. S. 23

¹²⁰ Vgl. ebd. 24

¹²¹ Vgl. ebd. 25

¹²² Anderson-Sköld et al., 2020, Microplastics from tyre and road wear A literature review, vgl. S. 40

¹²³ Khan et al., 2019, Acute and long-term toxicity of micronized car tire wear particles to *Hyalella azteca*, vgl. S. 2-3

Viršek et al. (2017) haben die Oberflächenkonzentration von Mikroplastik in der nördlichen Adria und die darauf lebenden Bakterienkolonien untersucht¹²⁴. Dabei konnte im Jahr 2014 eine mittlere Konzentration von 259.310 Partikel/km² und im Jahr 2015 von 1.304.811 Partikel/km² nachgewiesen werden¹²⁵, davon bestanden ca. 75% aus Polyethylen¹²⁶. Auf den Partikeln wurden unter anderem *Aeromonas salmonicida* gefunden. Dabei handelt es sich um einen für Fische gefährlichen Krankheitserreger¹²⁷, der in dieser Studie zum ersten Mal auf Mikroplastik nachgewiesen werden konnte¹²⁸. Diese Mikroplastikteilchen könnten daher an der Verbreitung von Krankheitserregern in Gewässern verantwortlich sein¹²⁴.

In Song et al. (2020) wurde das Vorhandensein von antibiotikaresistenten *Escherichia Coli* auf Holz-, Reifenabrieb- und HDPE- (high density polyethylen bzw. Hartpolyethylen) Partikeln untersucht. Diese konnten nur auf Holzpartikeln nachgewiesen werden, allerdings wurden auf Reifenabrieb- und HDPE-Partikeln andere antibiotikaresistente Erreger gefunden. Dies unterstreicht das Potenzial von Mikroplastik, Krankheitserreger in Gewässern zu transportieren¹²⁹.

9 Möglichkeiten zur Reduktion

Laut Zhang et al. (2020) gibt es drei Haupteinflussfaktoren für Reifenabrieb: „tire factors (structure, material, wear resistance, etc.), vehicle factors (suspension parameters, load, speed, driving force, etc.) and environmental factors (road conditions, temperature, driving habits, etc.)¹³⁰“. Hier bieten sich Stellschrauben an, die die Reduktion von Reifenabrieb vorantreiben könnten.

9.1 Regulative Maßnahmen

Die Abgasemissionen von Neuzulassungen in Österreich konnten - vermutlich durch strenger werdender Grenzwertvorgaben seit 2000 - bei Dieselfahrzeugen um 22% und bei

¹²⁴ Viršek et al., 2017, Microplastics as a vector for the transport of the bacterial fish pathogen species *Aeromonas salmonicida*, vgl. S. 1

¹²⁵ Ebd. vgl. 303

¹²⁶ Ebd. vgl. 304

¹²⁷ Ebd. vgl. 306

¹²⁸ Ebd. vgl. 308

¹²⁹ Song et al., 2020, The Travelling Particles: Investigating microplastics as possible transport vectors for multidrug resistant *E. coli* in the Weser estuary (Germany), vgl. S. 8

¹³⁰ Zhang et al., 2020, Review of Tires Wear Particles Emission Research Status, S. 1

Benzinfahrzeugen um 31% reduziert werden¹³¹. Die Grenzwerte werden mittels Euro-Abgasnorm vorgegeben. Seit 1992 gab es insgesamt acht Abgasnormen, die aktuelle gilt seit 01.01.2021 für alle Fahrzeuge und lautet Euro 6d-ISC-FCM¹³². Die Gültigkeitszeiträume der vorhergehenden Abgasnormen können Tab. 9.1 entnommen werden.

Tab. 9.1: Angesetzter Reifenabrieb in g/km und g/Pkm¹³³

Euro Abgasnorm	Typprüfung	Serienprüfung
Euro 1	01.01.1992	---
Euro 1	---	31.12.1992
Euro Abgasnorm	Neue Fzg. Typen	Alle Fahrzeuge
Euro 2	01.01.1996	01.01.1997
Euro 3	01.01.2000	01.01.2001
Euro 4	01.01.2005	01.01.2006
Euro 5	01.09.2009	01.01.2011
Euro 6	01.09.2014	01.09.2015

NO_x-Emissionen werden seit der Euro 3 begrenzt. Die Grenzwerte wurden von 0,15 g/km auf 0,06 g/km bei Fahrzeugen mit Benzinantrieb und 0,50 g/km auf 0,08 g/km bei Fahrzeugen mit Dieselantrieb herabgesetzt. Die Partikelmasse wird bei Dieselfahrzeugen seit der Euro 1 begrenzt, der Grenzwert wurde ebenso von 0,14 g/km auf 0,0045 g/km herabgesetzt. Für Partikelemissionen von Benzinfahrzeugen gilt seit der Euro 5 der gleiche Grenzwert. Auch für die Partikelanzahl in Anzahl/km findet sich seit der Euro 5 bei Dieselantrieben und seit der Euro 6 bei Benzinantrieben ein Grenzwert von $6,0 \cdot 10^{11}$ Partikeln pro Kilometer¹³³.

Aufgrund dieser strengen Regulatorien bezüglich Partikelemissionen von Abgasen wird prognostiziert, dass bis zum Jahr 2035 Nicht-Abgasemissionen den größten Teil verkehrsbezogener Partikelemissionen ausmachen werden¹³⁴. Laut OECD gibt es Bedarf mittels regulativer Maßnahmen Partikelemissionen der Nicht-Abgasemissionen zu reduzieren. Dabei ist es wichtig, dass standardisierte Messmethoden definiert werden, um Abrieb- und Partikelemissionen quantifizieren zu können. Über Nicht-Abgasemissionen herrschen noch Wissenslücken, regulative Maßnahmen sollen diese schließen. Als Möglichkeiten Nicht-

¹³¹ STATISTIK AUSTRIA, 2021, Kfz-Statistik. Ergebnisse. Durchschnittliche CO₂-Emissionen der neu zugelassenen Pkw nach NEFZ

¹³² ADAC, 2021, Euro 6d

¹³³ Deutsches Umweltbundesamt, 2016, Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW

¹³⁴ OECD, 2020, Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge, vgl. S. 9-10

Abgasemissionen zu reduzieren, werden sowohl die Reduktion der pro Kilometer emittierten Partikel als auch der Fahrzeugkilometer vorgeschlagen, eine distanzabhängige Gebühr soll hierfür Anreiz schaffen. Gesetzliche Richtlinien für geringere Fahrzeuggewichte und die Reifenzusammensetzung sollen Partikelemissionen weiter herabsetzen. Ein Attraktives ÖPNV-Angebot, sowie Rad- und Gehwege sollen die Personenverkehrsleistung vom MIV auf jene genannten anderen Verkehrsträger verlagern¹³⁴. Laut Bundesministerium für Klimaschutz gibt es derzeit

„keine einheitliche Regelung, die Mikroplastik umfassen abdeckt. [...] Ziel ist es einerseits, bereits existierende Vorschriften für Kunststoffe beziehungsweise Mikroplastik in Österreich effektiv umzusetzen und, sofern Lücken bestehen, Regulierungen weiterzuentwickeln.“⁸

Das BMK hat im Jänner 2022 den Entwurf des Aktionsplans Mikroplastik veröffentlicht, der vorsieht, Mikroplastikverschmutzungen zu reduzieren, deren gesundheitlichen und umweltlichen Folgen zu erforschen, für mehr Bewusstsein für von Mikroplastik induzierte Probleme so sorgen und den europäischen und globalen Austausch über Mikroplastik zu stärken¹³⁵. Für eine Vergleichbarkeit von Studien wird auch hier eine Harmonisierung von Untersuchungsmethoden vorgeschlagen¹³⁶. Des Weiteren wird Forschungsbedarf über die Toxizität von Mikroplastik betont¹³⁷. Die Untersuchung von Reifenabriebpartikel soll aufgrund unbekannter gesundheitlicher Folgen von Reifenadditiven und als eine der größten Quellen von Mikroplastik in Europa in einem Pilotprojekt des BMK und BMLRT in Auftrag gegeben werden¹³⁸. Konsumenten und Konsumentinnen sollen beim Reifenkauf über Mikroplastikemissionen informiert¹³⁹ und der Konsum soll durch die Vermeidung von Einwegplastikprodukten nachhaltiger gestaltet werden¹⁴⁰. Für die Erreichung der Ziele des Aktionsplans Mikroplastik ist ein sektorübergreifender Ansatz vorgesehen¹⁴¹.

„Für den Aktionsplan wurden daher fünf unterschiedliche Aktionsfelder definiert:

- *Stärkung der Datenlage, Forschung und Innovation,*

¹³⁵ BMK, 2022, Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025, Entwurf Jänner (die Namen der Autoren werden vom BMK ergänzt), vgl. S. 11

¹³⁶ Vgl. ebd. 16

¹³⁷ Vgl. ebd. 18

¹³⁸ Vgl. ebd. 20

¹³⁹ Vgl. ebd. 31

¹⁴⁰ BMK, 2022, Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025, Entwurf Jänner (die Namen der Autoren werden vom BMK ergänzt), vgl. S. 36

¹⁴¹ Vgl. ebd. 12

- *Effektive Umsetzung und Weiterentwicklung der Regulierung,*
- *Freiwillige Maßnahmen,*
- *Bewusstseinsbildung, Konsument:innen und Schulen sowie*
- *Österreichs Beitrag zur globalen nachhaltigen Entwicklung.¹⁴²*

Zhang et al. (2020) konnte in einem Experiment feststellen, dass der Schräglaufwinkel der größte Einflussfaktor auf Reifenabriebemissionen darstellt, gefolgt von der Geschwindigkeit und dem Gewicht¹⁴³. Demzufolge bieten geschwindigkeitsmindernde Maßnahmen sicherlich ebenso ein Reduktionspotenzial von Reifenabriebemissionen.

9.2 Konstruktive Maßnahmen

Fahrzeugseitige konstruktive Maßnahmen zur Reduktion von Abriebemissionen stehen im Fokus der Forschung, wie beispielsweise im Projekt ZEDU-1 (Zero Emission Drive Unit – Generation 1) des Instituts für Fahrzeugtechnik. Ziel ist es, ein Fahrzeugkonzept zu entwickeln, das Bremsabrieb komplett und Reifenabrieb bis zu 90% eliminiert. Hierfür wird an neuen Bremssystemen geforscht, welche den Bremsstaub in einem Ölbad auffangen oder induktiv bremsen soll. Letztere Variante ermöglicht Bremsen ganz ohne Verschleiß. Um Reifenabriebemissionen zu reduzieren, soll ein innovativer Radkasten durch Unterdruck den Reifenabrieb sammeln und absaugen, bevor jener in die Umwelt gelangen kann. Diese Forschungen werden vom Institut für Fahrzeugtechnik gemeinsam mit dem DLR-Institut für Verbrennungstechnik durchgeführt¹⁴⁴.

Mann+Hummel hat gemeinsam mit dem Entwicklungspartner Hitachi Automotive Systems einen passiven Bremsstaubpartikelfilter entwickelt, der den Bremsabrieb direkt an der Bremsscheibe auffängt. Dadurch soll der Eintrag in die Umwelt minimiert werden¹⁴⁵.

Aktueller Forschungsgegenstand sind ebenso neuartige Partikelfilter, die in die Straße eingebaut werden, demnach den Reifenabrieb in der Nähe des Entstehungsortes auffangen und so den Eintrag in die Kanalisation verhindern sollen¹⁴⁶. Dieses Projekt startete im Jahr 2020 und soll drei Jahre laufen¹⁴⁷.

¹⁴² BMK, 2022, Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025, Entwurf Jänner (die Namen der Autoren werden vom BMK ergänzt), S. 12

¹⁴³ Zhang et al., 2020, Review of Tires Wear Particles Emission Research Status, vgl. S. 5

¹⁴⁴ DLR, 2021, Mobilität ohne Feinstaub

¹⁴⁵ Mann+Hummel, o.J., Auf dem Weg zu weniger Feinstaub

¹⁴⁶ Audi Umweltstiftung, 2022, URBANFILTER: Mikroplastik herausfiltern, wo es entsteht

¹⁴⁷ TU Berlin, o.J., Projekt Urbanfilter

Auch im Mobilitätsmasterplan 2030 wird der Innovation für einen klimaneutralen Mobilitätssektor große Bedeutung zugewiesen¹⁴⁸.

Der Belagstyp und die Alterung der Straße spielen ebenso eine Rolle bei Abriebemissionen¹⁴⁹. Abriebmindernde Straßenbeläge bzw. offenporige Beläge, die Abriebpartikel auffangen, und gründliche Straßenreinigungen könnten einen Beitrag leisten, den Eintrag in die Umwelt zu minimieren¹⁵⁰.

In einem Artikel auf EFAHRER.COM wird angeführt, dass eine Betonfahrbahn im Vergleich zu einer Fahrbahn aus Asphalt zu deutlich höherem Abrieb führen kann¹⁵¹. Allerdings konnten diesbezüglich keine Studien gefunden werden, die dies belegen. Hier herrscht vermutlich noch weiterer Forschungsbedarf.

9.3 Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung

Das Aktionsfeld 3 des Aktionsplans Mikroplastik bezieht sich auf Bewusstseinsbildung, Konsumenten und Konsumentinnen und Schulen. Zahlreiche andere Institutionen machen bereits auf mikroplastikbezogene Probleme aufmerksam¹⁵². Das Umweltbundesamt informiert beispielsweise breitgefächert über Reifenabrieb und Mikroplastik im Allgemeinen. Dabei wird betont, dass „Mikroplastik überall in der Umwelt nachweisbar¹⁵³“ ist. Vor allem dem Anteil des Reifenabriebs am gesamten emittierten Mikroplastik wird Beachtung geschenkt. Der Reifenabrieb wird hier mit 6.800 Tonnen jährlich beziffert¹⁵³, dieser Wert liegt laut Prenner et al. (2021) bei ca. 21.000 Tonnen jährlich⁶⁵. Mit dem Factsheet Mikroplastik werden Mikroplastik, die Hauptquellen von Mikroplastik und die Eintragungswege in die Umwelt erläutert¹⁵⁴. Der Fokus wird vor allem auf bewusstseinsbildende Maßnahmen in Schulen gelegt.

¹⁴⁸ BMK, 2020, Mobilitätsmasterplan 2030, vgl. S. 17

¹⁴⁹ Venghaus et al. (2021), Abschlussbericht. Reifenabrieb in der Umwelt – RAU, vgl. S. 54

¹⁵⁰ Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland e.V., 2019, Fast ein Drittel des Reifenabriebs im Meer entsteht durch den Straßenverkehr

¹⁵¹ Schwichtenberg, L., 2022, Reifenabrieb bei Autos im Vergleich: Selbst Markenreifen fallen hier durch

¹⁵² BMK, 2022, Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025, Entwurf Jänner (Namen der Autoren werden vom BMK ergänzt), vgl. S. 42

¹⁵³ Umweltbundesamt, 2020, Mikroplastik überall in der Umwelt nachweisbar

¹⁵⁴ Liebmann et al., 2020, Umweltbundesamt, Factsheet Mikroplastik 2020, vgl. S. 1-2

In „11 Tipps für einen plastikfreien Sommer¹⁵⁵“ von Greenpeace steht das Umsteigen auf Reisen mit dem Zug anstatt dem Pkw an erster Stelle. Als Grund wird hier Reifenabrieb als „eine der größten Quellen von Mikroplastik in Flüssen und Meeren¹⁵⁵“ genannt.

Der Aktionsplan Mikroplastik sieht für das Jahr 2022 vor, das Informationsangebot für die Bevölkerung über Möglichkeiten Mikroplastik zu vermeiden, auszuweiten¹⁵⁶.

10 Schlussfolgerung

Wie die Berechnungen in Kap. 5.1.4 und 6.3 darlegen, steigt mit Fortschreiten der Elektrifizierung des österreichischen Fuhrparks von Personen- und Lastkraftwagen der gesamte jährliche Reifenabrieb. Während mit der Fahrleistung nach Berechnungsvariante 1, welche sich auf die Reduktion der Personenverkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs gemäß Mobilitätsmasterplan 2030 bezieht⁷, sowohl Abgasemissionen (darunter werden in Kap. 5.2.1 CO₂, NO_x und Feinstaubemissionen aus der Kraftstoffverbrennung betrachtet) als auch kumulierte Partikelemissionen mit aerodynamischen Durchmessern von weniger als 10 µm (bezogen auf Reifen-, Brems- und Straßenabrieb und Aufwirbelung) reduziert werden können, steigen durch die Elektrifizierung trotz sinkender Fahrleistung die gesamten Reifenabriebemissionen. Die Berechnungsvariante 2 bezieht sich auf den Fall „business as usual“ bezüglich der Fahrleistung. Dabei wird angenommen, dass die durchschnittliche Fahrleistung bis zum Jahr 2040 konstant bleibt. Dies bedingt durch die Zunahme der Motorisierung, dass die Personenfahrleistung bis 2040 ansteigt. Somit können durch die Elektrifizierung Abgasemissionen reduziert werden, gleichzeitig steigen jedoch sämtliche in dieser Arbeit betrachteten Nicht-Abgasemissionen. In beiden Fällen führt die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte zu einem Zuwachs der Reifenabriebemissionen. Hier wird gezeigt, dass eine der wichtigsten Stellschrauben, um den Reifenabriebeintrag in die Umwelt zu reduzieren, die Verlagerung der Fahrleistung vom motorisierten Individualverkehr auf andere Verkehrsträger ist. Hier ist das größte Einsparpotenzial vorhanden. Dies wird in Diagramm 5.6 verdeutlicht. Der Effekt entsteht durch eine zusätzliche Reduktion der Personenverkehrsleistung um 12 Mrd. Pkm, welche auch zu einer Reduktion der Reifenabriebemissionen führt. Allerdings ist hier zu anmerken, dass die Verlagerung dieser Verkehrsleistung auf andere Verkehrsträger und die dadurch steigenden Emissionen dieses Verkehrsträgers in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Da Mobilität aufgrund eines Mangels am Ort entsteht und die Anzahl der zurückgelegten Wege

¹⁵⁵ Greenpeace, o.J., 11 Tipps für einen plastikfreien Sommer

¹⁵⁶ BMK, 2022, Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025, Entwurf Jänner (Namen der Autoren werden vom BMK ergänzt), vgl. S. 44

pro Person und Tag konstant bleiben¹⁵⁷, sind zur Reduktion der gesamten verkehrsträgerübergreifenden Personenverkehrsleistung vermutlich weitreichende, auch in die Raumordnung bzw. Siedlungsstrukturen eingreifende Maßnahmen notwendig.

Auch der Straßengüterverkehr trägt zu den gesamten Abgas- und Nicht-Abgasemissionen in Österreich bei. Durch Verlagerung der Transportleistung ist hier ebenso ein großes Reduktionspotenzial vorhanden. Die Einsparpotenziale der Abgasemissionen können Tab. 6.2 und Tab. 6.3 entnommen werden. Da die Transportleistung gemessen in Tonnenkilometern gemäß Mobilitätsmasterplan bis 2040 zunehmen wird, ist hier eine mögliche Stellschraube durch die Verlagerung auf andere, klimafreundlichere Transportmittel⁴⁰. Die Elektrifizierung bedingt auch hier eine Steigerung des in die Umwelt emittierten Reifenabriebs. Um diesem Problem zu entgehen, sind einige regulative Maßnahmen möglich, wie beispielsweise Richtlinien zur Reifenzusammensetzung¹³⁴ oder Geschwindigkeitsbeschränkungen¹⁴³. Derartige regulative Maßnahmen stellen weitere Stellschrauben zur Reduktion von Reifenabrieb dar.

Mittels Förderung der Innovation und neuer Technologien könnten Reifen- und Bremsabrieb direkt am Entstehungsort minimiert, bzw. aufgefangen werden^{145,146}, damit ein Eintrag in die Umwelt vermieden werden kann.

11 Fazit

Für die Erarbeitung weiterer Forschungsfragen werden in diesem Teil der Arbeit die behandelten Themen zusammengefasst, ein Ausblick gegeben und die Limitationen erörtert.

11.1 Zusammenfassung

Abgasemissionen sind bei der Wende zu einem klimaneutralen Mobilitätssektor im Fokus und werden durch Emissionsgrenzwerte und die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte erheblich reduziert. Dennoch verschwinden jene durch die indirekten Emissionen des für die Fortbewegung mit Elektrofahrzeugen benötigten Stroms und der durch die Herstellung der Karosserie und der Batterie bedingten Emissionen nicht vollständig. Des Weiteren nehmen durch die Elektrifizierung die Nicht-Abgasemissionen zu. Um die Eintragung des von Reifen stammendem Mikroplastiks in die Umwelt zu verhindern und dessen weitreichenden Folgen zu minimieren, sind Maßnahmen notwendig, die die Entstehung von Nicht-Abgasemissionen reduzieren bzw. vermeiden. Die Verlagerung der Verkehrsleistung vom motorisierten Individualverkehr hin zu klimaneutralen Verkehrsträgern und eine generelle Reduktion der Personenverkehrsleistung liefern effiziente Ergebnisse hinsichtlich der Reduktion von sowohl

¹⁵⁷ Steigenberger & Feßl (Hrsg. WKO), Demografie und Verkehr in Österreich, vgl. S. 29

Abrieb- als auch von indirekten Abgasemissionen. Während das Verständnis über die Notwendigkeit der Reduktion von Abgasemissionen in der Bevölkerung bereits verankert ist, ist für die Erreichung eines klima- und umweltfreundlichen Mobilitäts- und Transportsektors weitere Bewusstseinsbildung für mikroplastik- und feinstaubbedingte Probleme und die Vorteile von nachhaltigem Konsumverhalten notwendig. Bezüglich der vermutlich weitreichenden gesundheitlichen Folgen von Mikroplastik bzw. Feinstaub besteht allerdings weiterer Forschungsbedarf. Dabei ist es auch wichtig, die Bevölkerung über neugewonnene Erkenntnisse detailliert zu informieren, um somit die Akzeptanz in der Bevölkerung für eventuelle emissionsmindernde Maßnahmen zu stärken.

11.2 Ausblick

Da die Nicht-Abgasemissionen aufgrund der geplanten Elektrifizierung des Verkehrssektors steigen werden, bedarf es begleitender Schritte zur Reduktion derselben. Informationskampagnen zur Beschleunigung der Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung, sowie technische und regulative Maßnahmen zur Minimierung und Vermeidung von Reifenabrieb bzw. anderer Nicht-Abgasemissionen sind diesbezüglich notwendig und werden im Aktionsplan Mikroplastik angedacht. Durch die Elektrifizierung wird das Problem von Abgasemissionen minimiert, allerdings ein neues Problem im Bereich der Nicht-Abgasemissionen geschaffen. Für einen umweltfreundlichen Mobilitätssektor ist es essenziell auch die Probleme der Nicht-Abgasemissionen in den Fokus zu stellen. Ein wichtiger Schritt hierbei ist es, die Abhängigkeit des Menschen vom motorisierten Individualverkehr zu reduzieren. Regulative Maßnahmen und der Ausbau anderer Verkehrsträger (z.B. ÖPNV) wären hier zielführend, um die Personenverkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs und in weiterer Folge die Nicht-Abgasemissionen zu senken.

11.3 Limitationen

Da die Berechnungen dieser Arbeit auf Prognosen des Motorisierungsgrades, der Bevölkerungsentwicklung, des Pkw- und Lkw-Bestandes, der Personenfahr- und Transportleistung und der Fuhrparkzusammensetzung basieren, sind die Prognosen der jährlichen Abgas- und Nicht-Abgasemissionen großen Ungenauigkeiten unterworfen. Aufgrund fehlender Daten der Emissionen von Fahrzeugen mit sonstigen Antrieben müssen jene für eine Prognose der Emissionen bis 2040 aus vorhandenen Emissionswerten gemittelt werden. Durch Primärdatenermittlung der Emissionen und der Fahrleistung könnten noch genauere Ergebnisse erzielt werden, da in dieser Arbeit Daten unterschiedlicher Studien bzw. Institutionen verwendet werden.

Des Weiteren müssten, um die tatsächlichen Emissionseinsparungen durch die Verlagerung von Verkehrsleistung auf andere Verkehrsträger quantifizieren zu können, die zunehmenden Emissionen dieser Verkehrsträger aufgrund der Verlagerung berücksichtigt werden. Diese müssten von den abnehmenden Emissionen des MIV subtrahiert werden.

Außerdem konnte die These, dass Betonfahrbahnen mehr Reifenabrieb verursachen durch Literaturrecherche nicht bestätigt werden, hier herrscht demnach ebenso weiterer Forschungsbedarf.

12 Abbildungsverzeichnis

Diagramm 2.1: Strommix Österreich 2020 – Aufteilung der Brutto-Stromerzeugung.....	18
Diagramm 2.2 : Anteile der fossilen Energieträger 2020	18
Diagramm 2.3: Anteil der Sektoren an den gesamten THG-Emissionen in Österreich (Basisjahr 2019).....	21
Diagramm 2.4: Aufteilung Mikroplastik in Prozent.....	23
Diagramm 2.5: Emissionen untergliedert nach Antriebsart.....	31
Diagramm 2.6: Abgasemissionen untergliedert nach Antriebsart	31
Diagramm 2.7: Nicht-Abgasemissionen untergliedert nach Antriebsart	32
Diagramm 2.8: Partikelemissionen (PM10 – PM0,1) - Reifenabrieb	32
Diagramm 2.9: Partikelemissionen (PM10 – PM0,1) - Bremsabrieb	33
Diagramm 2.10: Partikelemissionen (PM10 – PM0,1) - Straßenabrieb.....	33
Diagramm 2.11: Kumulierte Emissionen von leichten Nutzfahrzeugen	34
Diagramm 4.1: Österreichischer Pkw-Bestand seit 2000.....	38
Diagramm 4.2: Motorisierung in Österreich seit 2000.....	38
Diagramm 4.3: Bevölkerung in Österreich,.....	39
Diagramm 4.4: Prognose des Bevölkerungswachstums in Österreich ¹⁰³ ,.....	40
Diagramm 4.5: Prognose des Pkw-Bestands in Österreich.....	41
Diagramm 4.6: Pkw-Bestand Benzin und Diesel 2004-2021 ¹⁰⁰	41
Diagramm 4.7: Pkw-Bestand Elektro + Wasserstoff und Sonstige 2004-2021 ¹⁰⁰	42
Diagramm 4.8: Prognose der Aufteilung des österreichischen Fuhrparks bis 2040	43
Diagramm 4.9: Fahrleistung 1990 - 2021.....	43
Diagramm 4.10: Prognose der Personenverkehrsleistung des MIV (Pkw) in Österreich bis 2040 nach Variante 1	44
Diagramm 4.11: Jährliche pro Kopf Fahrleistung (Pkw) bis 2040 nach Variante 1	45
Diagramm 4.12: Prognose der Fahrleistung in Personenkilometer bis 2040.....	46
Diagramm 4.13: Jährliche pro Kopf Fahrleistung in Österreich bis 2040	46

Diagramm 4.14: Vergleich der jährlichen Fahrleistung nach Berechnungsvarianten 1 und 2	47
Diagramm 4.15: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen pro Kopf Fahrleistung nach Berechnungsvariante 1 und 2	47
Diagramm 4.16: Prognose der Fuhrparkzusammenstellung der Lastkraftwagen bis 2040	49
Diagramm 5.1: Prognose der Fahrleistung bis 2040 untergliedert nach Antriebsart	53
Diagramm 5.2: Prognose der jährlichen CO ₂ -Emissionen [1000t]	54
Diagramm 5.3: Prognose der jährlichen NO _x -Emissionen [t]	54
Diagramm 5.4: Prognose der jährlichen Feinstaubemissionen [t]	55
Diagramm 5.5: Prognose des Reifenabriebs pro Jahr [t]	56
Diagramm 5.6: Jährlicher Reifenabrieb bei einer Reduktion der Fahrleistung auf 50 Mrd. Pkm	56
Diagramm 5.7: Prognose der PM _{0,1} -Emissionen pro Jahr [t]	57
Diagramm 5.8: Prognose der PM _{1,0} -Emissionen pro Jahr [t]	57
Diagramm 5.9: Prognose der PM _{2,5} -Emissionen pro Jahr [t]	57
Diagramm 5.10: Prognose der PM ₁₀ -Emissionen pro Jahr [kg]	58
Diagramm 5.11: Prognose der Fahrleistung bis 2040 nach Antriebsart – Variante 2	58
Diagramm 5.12: Prognose der jährlichen CO ₂ -Emissionen [t]	59
Diagramm 5.13: Prognose der jährlichen NO _x -Emissionen [t]	59
Diagramm 5.14: Prognose der jährlichen Feinstaubmissionen [t]	60
Diagramm 5.15: Prognose des jährlichen Reifenabriebs [t]	60
Diagramm 5.16: Prognose der jährlichen PM _{0,1} -Emissionen [t]	61
Diagramm 5.17: Prognose der jährlichen PM _{1,0} -Emissionen [t]	61
Diagramm 5.18: Prognose der jährlichen PM _{2,5} -Emissionen [t]	61
Diagramm 5.19: Prognose der jährlichen PM ₁₀ -Emissionen [t]	62
Diagramm 6.1: Vergleich der Abgasemissionen von Lastkraftwagen und Schiene	65
Diagramm 6.2: Vergleich der Abriebemissionen von LDV, HDV und Schiene	65
Diagramm 6.3: Prognose der Fahrleistung in Tonnenkilometer	68
Diagramm 6.4: Prognose der THG-Emissionen in 1000t CO ₂ eq/Tkm	69
Diagramm 6.5: Fahrleistung in Fahrzeugkilometer nach Gesamtgewicht und Antriebsart	69
Diagramm 6.6: Jährlicher Reifenabrieb in Tonnen nach Gesamtgewicht und Antriebsart	70
Diagramm 6.7: Gesamter jährlicher Reifenabrieb des Straßengüterverkehrs in t	71
Diagramm 6.8: Fahrleistung des Straßengüterverkehrs bei beschränkter Elektrifizierung bis 2040	71
Diagramm 6.9: Reifenabrieb in t nach Gesamtgewicht und Antriebsart mit beschränkter Elektrifizierung	72
Diagramm 6.10: Reifenabrieb in t mit beschränkter Elektrifizierung	72

Diagramm 6.11: Prognose des gesamten Reifenabriebs von Personen - und Lastkraftwagen bis 2040 nach Berechnungsvariante.....	73
Diagramm 7.1: Verteilung des Pkw-Bestands auf die unterschiedlichen Antriebsarten ohne Elektrifizierung.....	75
Diagramm 7.2: Verteilung des Pkw-Bestands auf die unterschiedlichen Antriebsarten ohne Elektrifizierung.....	75
Diagramm 7.3: Vergleich der Fahrleistungen mit und ohne Elektrifizierung nach Variante 2	76
Diagramm 7.4: Vergleich der jährlichen CO ₂ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1	77
Diagramm 7.5: Vergleich der kumulierten CO ₂ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	77
Diagramm 7.6: Vergleich der jährlichen CO ₂ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2	78
Diagramm 7.7: Vergleich der kumulierten CO ₂ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	78
Diagramm 7.8: Vergleich der jährlichen NO _x -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	79
Diagramm 7.9: Vergleich der kumulierten NO _x -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	79
Diagramm 7.10: Vergleich der jährlichen NO _x -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	80
Diagramm 7.11: Vergleich der kumulierten NO _x -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	80
Diagramm 7.12: Vergleich der jährlichen Feinstaubemissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1	81
Diagramm 7.13: Vergleich der kumulierten Feinstaubemissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1	81
Diagramm 7.14: Vergleich der jährlichen Feinstaub-Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2	82
Diagramm 7.15: Vergleich der kumulierten Feinstaub-Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2	82

Diagramm 7.16: Vergleich des jährlichen Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	84
Diagramm 7.17: Vergleich des kumulierten Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	84
Diagramm 7.18: Vergleich des jährlichen Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	85
Diagramm 7.19: Vergleich des kumulierten Reifenabriebs mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	85
Diagramm 7.20: Vergleich der jährlichen PM _{0,1} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	86
Diagramm 7.21: Vergleich der kumulierten PM _{0,1} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	86
Diagramm 7.22: Vergleich der jährlichen PM _{0,1} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	87
Diagramm 7.23: Vergleich der kumulierten PM _{0,1} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	87
Diagramm 7.24: Vergleich der kumulierten PM _{1,0} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	88
Diagramm 7.25: Vergleich der kumulierten PM _{1,0} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	88
Diagramm 7.26: Vergleich der kumulierten PM _{2,5} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	89
Diagramm 7.27: Vergleich der kumulierten PM _{2,5} -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	89
Diagramm 7.28: Vergleich der jährlichen PM ₁₀ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	90
Diagramm 7.29: Vergleich der kumulierten PM ₁₀ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	90
Diagramm 7.30: Vergleich der jährlichen PM ₁₀ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	91
Diagramm 7.31: Vergleich der kumulierten PM ₁₀ -Emissionen mit und ohne Elektrifizierung seit 2004 – Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	91

13 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Auflistung der mittleren lifecycle CO ₂ -Emissionen unterschiedlicher Energieträger	18
--	----

Tab. 2.2: Direkte Emissionen nach Antriebsart in g/Pkm ⁵⁷	26
Tab. 2.3: Indirekte Emissionen nach Antriebsart in g/Pkm ⁵⁷	26
Tab. 2.4: Gesamte Emissionen nach Antriebsart in g/Pkm ⁵⁷	26
Tab. 2.5: NO _x -Emissionen von Fahrzeugen mit sonstigem Antrieb in g/Fzkm und der Mittelwert in g/Pkm.....	27
Tab. 2.6: Feinstaubmissionen von Fahrzeugen mit sonstigem Antrieb in g/Fzkm und der Mittelwert in g/Pkm.....	27
Tab. 2.7: Zusammenfassung Emissionen von Fahrzeugen mit sonstigen Antrieben in g/Pkm.....	27
Tab. 2.8: Emissionen von schweren und leichten Nutzfahrzeugen mit Dieselantrieb in g/Tkm.....	27
Tab. 2.9: Reifenabrieb nach Antriebsart in g/Fzkm.....	28
Tab. 2.10: Partikelemissionen nach Antriebsart in g/Fzkm und g/Pkm.....	28
Tab. 2.11: Partikelemissionen von Elektrofahrzeugen in t/a.....	28
Tab. 2.12: Partikelemissionen in g/Pkm (berechnet mit Fahrleistung nach Mobilitätsmasterplan ⁷).....	29
Tab. 2.13: Partikelemissionen in g/Pkm (berechnet mit durchschnittlicher jährlicher Fahrleistung).....	29
Tab. 2.14: Partikelemissionen von sonstigen Fahrzeugen in g/Pkm (berechnet mit Fahrleistung nach Mobilitätsmasterplan ⁷ , Ausgangsdaten nach Umweltbundesamt).....	29
Tab. 2.15: Partikelemissionen von sonstigen Fahrzeugen in g/Pkm (berechnet mit durchschnittlicher jährlicher Fahrleistung, Ausgangsdaten nach Umweltbundesamt).....	29
Tab. 2.16: Partikelemissionen von schweren und leichten Nutzfahrzeugen in g/km.....	30
Tab. 4.1: Zunahme der Bevölkerungszahl und des Motorisierungsgrad.....	40
Tab. 4.2: Anteile der einzelnen Antriebsarten am Gesamtbestand im Jahr 2030 ¹⁰⁴	42
Tab. 4.3: Zunahme Bevölkerung und Motorisierungsgrad von 2018 bis 2021.....	44
Tab. 4.4: Durchschnittliche jährliche Fahrleistung in Personenkilometern nach Antriebsart.....	45
Tab. 4.5: CO ₂ - und NO _x -Emissionen von Elektrofahrzeugen.....	49
Tab. 5.1: Angesetzte CO ₂ -Emissionen in g/Pkm.....	50
Tab. 5.2: Angesetzte NO _x -Emissionen in g/Pkm.....	50
Tab. 5.3: Angesetzte Feinstaubmissionen in g/Pkm.....	50
Tab. 5.4: Angesetzter Reifenabrieb in g/Pkm.....	50
Tab. 5.5: Angesetzte PM _{0,1} -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	51
Tab. 5.6: Angesetzte PM _{0,1} -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung in Variante 2.....	51

Tab. 5.7: Angesezte PM _{1,0} -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	51
Tab. 5.8: Angesezte PM _{1,0} -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	51
Tab. 5.9: Angesezte PM _{2,5} -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	52
Tab. 5.10: Angesezte PM _{2,5} -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	52
Tab. 5.11: Angesezte PM ₁₀ -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 1.....	52
Tab. 5.12: Angesezte PM ₁₀ -Emissionen in g/Pkm mit Berechnung der Fahrleistung nach Variante 2.....	52
Tab. 5.13: Vergleich der Emissionsberechnungen mit Fahrleistung nach Berechnungsvariante 1 und 2.....	62
Tab. 5.14: Vergleich der Emissionen im Jahr 2020 und 2040 – Berechnung nach Variante 1.....	63
Tab. 5.15: Vergleich der Emissionen im Jahr 2020 und 2040 – Berechnungen nach Variante 2.....	63
Tab. 6.1: Angesezte Emissionen des Schienen- und Straßengüterverkehrs in g/Tkm	64
Tab. 6.2: Berechnung der Emissionseinsparungen.....	66
Tab. 6.3: Berechnung der Emissionseinsparungen (THG).....	66
Tab. 6.4: Durchschnittliche Fahrleistung von Lastkraftfahrzeugen.....	66
Tab. 6.5: Untergliederung von Lastkraftfahrzeugen nach Statistik Austria.....	67
Tab. 6.6: Untergliederung von Lastkraftfahrzeugen nach Österreichischem Umweltbundesamt.....	67
Tab. 6.7: Zusammenfassung der Untergliederung für Berechnungen	67
Tab. 6.8: Auslastungsgrade der einzelnen Lastkraftfahrzeuge	67
Tab. 6.9: THG-Emissionen von Lastkraftwagen	68
Tab. 6.10: Reifenabrieb von Nutzfahrzeugen in g/Fzkm.....	70
Tab. 7.1: Angesezter Reifenabrieb in g/km und g /Pkm.....	83
Tab. 7.2: Vergleich der jährlichen und kumulierten Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 1.....	92
Tab. 7.3: Vergleich der jährlichen und kumulierten Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 2.....	92
Tab. 7.4: Vergleich der jährlichen und kumulierten Nicht-Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 1.....	92

Tab. 7.5: Vergleich der jährlichen und kumulierten Nicht-Abgasemissionen mit und ohne Elektrifizierung – Variante 2.....	93
Tab. 9.1: Angesetzter Reifenabrieb in g/km und g /Pkm	97

Literaturverzeichnis

Verkehrsclub Österreich (2019), „Pressemitteilung – Mit Auto gefahrene Kilometer sind in Österreich seit 1990 um 50 Prozent gestiegen“. Online verfügbar unter <https://www.vcoe.at/presse/presseaussendungen/detail/mit-auto-gefahren-kilometer-sind-in-oesterreich-seit-1990-um-50-prozent-gestiegen>

BMK (Anm.: die Namen werden vom BMK ergänzt) (2022), „Aktionsplan Mikroplastik 2022-2025“. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/kunststoffe/mikroplastik.html

Europäische Kommission (2020), „Factsheet - The Transport and Mobility Sector“, Print ISBN 978-92-76-27374-5. DOI: 10.2775/82355 NA-06-20-172-EN-C PDF ISBN 978-92-76-27370-7. DOI: 10.2775/932 NA-06-20-172-EN-N. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_2350

Bundeskanzleramt (o.J.), Nachhaltige Entwicklung – Agenda 2030 / SDGs, „Ziele der Agenda“ 2030. Online verfügbar unter <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/themen/nachhaltige-entwicklung-agenda-2030/ziele-der-agenda-2030.html>

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2021), „Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich. Der neue Klimaschutz-Rahmen für den Verkehrssektor. Nachhaltig – resilient – digital“. Online verfügbar unter <https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/mobilitaetsmasterplan/mmp2030.html>

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (o.J.), „Mobilitätsmasterplan 2030 – Neuausrichtung des Mobilitätssektors“. Online verfügbar unter <https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/mobilitaetsmasterplan/mmp2030.html>

Statistik Austria, (o.J.), „Güterverkehr – Straßengüterverkehr Österreichischer Unternehmen“. Online verfügbar unter https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/gueterverkehr/index.html

OECD (2020), Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/4a4dc6ca-en>

Asbach, C., Baltensperger, U., Bruckmann, P., Builtjes, P., Després, V., Diegmann, V., Dopp, E., Ebel, A., Eikmann, T., Elbern, H., Forschungszentrum Jülich, Friedrich, R., Gehrig, R., Gnauk, T., Herr, C., Herrmann, H., Hoffmann, T., Jaenicke, R., Kasper, M., Kuhlbusch, T., Lammel, G., Memmesheimer, M., Nickel, C., Pfeffer, U., Pöschl, U., Quass, U., Reimer, E., Schmidt, E., Schmidt, K.-G., Schnelle-Kreis, J., Stern, R., Sträter, E., Streibel, T., Theloke, J., Vogel, B., Weinbruch, S., Wolke, R., Zellner, R., Zimmermann, R. (2010), „Statuspapier Feinstaub“. GDCh / KRdL- / ProcessNet-Gemeinschaftsausschuss „Feinstäube“. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/15581364-Feinstaub-statuspapier-erstellt-vom-gemeinschafts-arbeitsausschuss-feinstaeube-von.html>

Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., Ragas, A. M. J. (2017) "Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14, no. 10: 1265. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>

Europäisches Parlament (2018), „Mikroplastik: Ursachen, Auswirkungen und Lösungen“. REF: 20181116STO19217. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20181116STO19217/mikroplastik-ursachen-auswirkungen-und-losungen>

Prenner, S., Allesch, A., Staudner, M., Rexeis, M., Schwingshackl, M., Huber-Humer, M., Part, F. (2021) "Static modelling of the material flows of micro- and nanoplastic particles caused by the use of vehicle tyres". *Environmental Pollution* 290 (2021) 118102. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118102>

Deutsches Umweltbundesamt (2016), „Gefährdung der antarktischen Welt“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/arktis/umweltschutz-in-der-arktis/gefaehrdung-der-arktischen-umwelt#modellgebiet-arktis>

ADAC Studie (2021), „Sportliche Reifen produzieren sehr viel Abrieb“. Online verfügbar unter <https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/technik/sportliche-reifen-produzieren-sehr-viel-abrieb.html>

Prenner, S., Allesch, A., Staudner, M., Rexeis, M., Schwingshackl, M., Huber-Humer, M., Part, F. (2021) "Static modelling of the material flows of micro- and nanoplastic particles caused by the use of vehicle tyres". Zitiert nach Hillenbrand et al. (2005) und ADAC (2019). *Environmental Pollution* 290 (2021) 118102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118102>

Sexlinger, K., Liebmann, B. (2021), „Mikroplastik in Klärschlämmen“, Umweltbundesamt REP-0773. (Hrsg.) Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0773.pdf>

Deutsches Umweltbundesamt (2016), „Grenzwerte für Schadstoffemissionen von Pkw“. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/tabelle_grenzwerte_fuer_schadstoffemissionen_von_pkw.pdf

Umweltbundesamt GmbH (2021), „Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/news210119/sectoren>

Umweltbundesamt GmbH (2021), „Treibhausgasbilanz Österreichs 2019“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/news210119>

Deutsches Umweltbundesamt (2019), „Stickstoffdioxid: Gesundheitliche Bedeutung von Grenzwerten“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide/stickstoffdioxid-gesundheitliche-bedeutung-von#wie-werden-grenzwerte-fur-stickstoffdioxid-festgelegt-und-von-wem>

Deutsches Umweltbundesamt (2021), „Stickstoffoxide“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide#undefined>

Österreichs Energie (o.J.), „Entwicklung der CO₂-Emissionen in Österreich ab 1990“. Online verfügbar unter <https://oesterreichsenergie.at/downloads/grafiken/detailseite/entwicklung-der-co2-emissionen-nach-sektoren-in-oesterreich-seit-1990>

Pötscher, F., Winter, R., Pölz, W., Lichtblau, G., Schreiber, H., Kutschera, U. (2014), „Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich“ – Report Rep-0440, (Hrsg.) Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0440.pdf>

Deutsches Umweltbundesamt, 2021, „Emissionsdaten“. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_personenverkehr_tabelle

Schwendinger, M. (2021), „VCOE Factsheet: Durch emissionsfreie Lkw Klimabilanz verbessern“. Online verfügbar unter <https://www.vcoe.at/publikationen/vcoe-factsheets/detail/vcoe-factsheet-2021-03-durch-emissionsfreie-lkw-klimabilanz-verbessern>

Wien Energie (2021), „Stromerzeugung in Österreich 2020“. Online verfügbar unter <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/stromerzeugung-in-oesterreich-2020/#:~:text=Im%20vergangenen%20Jahr%20stammten%2081,ist%202020%20somit%20weiter%20gestiegen.>

Österreichisches Umweltbundesamt (o.J.), „Erneuerbare Energien“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie>

Rechtsinformationssystem des Bundes (2022), „Bundesgesetz über den Ausbau von Energie aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz – EAG)“ StF: BGBl. I Nr. 150/2021. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011619>

Brauner, G. (2015), „Energiesysteme: regenerativ und dezentral – Strategien für die Energiewende“. Springer – Vieweg 2019, ISBN 978-3-658-24854-3, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24854-3>

E-Control (2021), „Statistikbroschüre 2021 – Unsere Energie in Zahlen gemessen“. Online verfügbar unter <https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/E-Control-Statbro-2021.pdf/83442b63-df8c-a732-7152-8df34986c2c3?t=1636364279845>

Schlömer S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., and Wisner, R. (2014): Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf

Deutsches Umweltbundesamt (2021), „Wie funktioniert der Treibhauseffekt?“ Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-funktioniert-der-treibhauseffekt>

IPCC Press Release (2021), „Climate change widespread, rapid and intensifying” – IPCC. 2021/17/PR. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_en.pdf

Europäisches Parlament (2018), „Treibhausgasemissionen nach Sektoren (Infografik)“. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20180301STO98928/treibhausgasemissionen-nach-landern-und-sektoren-infografik>

Rechtsinformationssystem des Bundes (2022), „Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen samt Anlagen“ StF: BGBl. III Nr. 89/2005. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20004173>

Anderl, M. Bartel, A., Geiger, K., Gugele, B., Gössl, M., Haider, S., Heinfellner, H., Heller, C., Köther, T., Krutzler, T., Kuschel, V., Lampert, C., Neier, H., Pazdernik, K., Perl, D., Poupa, S., Prutsch, A., Purzner, M., Rigler, E., Schieder, W., Schmid, C., Schmidt, G., Schodl, B., Storch, A., Stranner, G., Schwarzl, B., Schwaiger, E., Vogel, J., Weiss, P., Wiesenberger, H., Wieser, M., Zechmeister, A. (2021), „Klimaschutzbericht 2021“. (Hrsg.) Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0776.pdf>

Deutsches Umweltbundesamt (2021), „Emissionsquellen“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgasemissionen/emissionsquellen#energie-stationar>

Österreichische Umweltbundesamt GmbH (2021). „EKZ PKM TKM – Verkehrsmittel“. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz_pkm_tkm_verkehrsmittel.pdf

Schneider Kraftfahrzeug GmbH (2019), „Wie funktioniert die Bremse?“. Online verfügbar unter <https://www.schneider-kfz-ratings.de/wie-funktioniert-die-bremse/#:~:text=Die%20Funktion%20der%20Scheibenbremse%3A&text=Die%20Bremskl%C3%B6tze%20die%20mit%20den,bis%20zu%20800%20Grad%20entstehen.>

Eigner, S., TU Graz (2021), „Bremsen als Feinstaubschleuder“. Online verfügbar unter <https://www.tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-news/einzelansicht/article/bremsen-als-feinstaubschleudern/#:~:text=Fest%20steht%3A%20Bremsen%20verursachen%20mehr,bislang%20Basiswissen%20und%20gesetzliche%20Reglementierungen.&text=Abgase%20aus%20dem%20Auspuff%20werden,sowieso%20gar%20kein%20Thema%20mehr.>

Helmers, E. (2010), „Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos“, Umweltwiss Schadst Forsch (2010) 22:564–578, DOI 10.1007/s12302-010-0158-x,

Umweltbundesamt GmbH (o.J.), „Dieselfahrzeuge als Hauptverursacher“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/mobilitaet/mobilitaetsdaten/staub-verkehr>

Bertling, J., Bertling, R., Hamann, L. (2018), „Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen“. Kurzfassung der Konsortialstudie, (Hrsg.) Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen. Online verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/kunststoffe-id-umwelt-konsortialstudie-mikroplastik.pdf>

Gehrke, I., Fraunhofer-Umsicht (2018), Präsentation: „TyreWearMapping: Einfluss von Reifenabrieb auf die Umwelt“. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/tyrewearmapping.html>

Fraunhofer-Umsicht (2021), „TyreWearMapping. Schlussbericht“. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/kompetenz/prozesse/tyrewearmapping-schlussbericht.pdf>

Cornelius, D., Horlbeck, P., Oehme, B., Stifter, S., Weber, S., (2017), „Feinstaub PM₁₀“. (Hrsg.) Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/faltblaetter/PM10_2017_Web.pdf

Deutsches Umweltbundesamt (2018), „Was ist Feinstaub“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-feinstaub>

Fraunhofer Umsicht (2021), „Forschung Kompakt: Kreislaufwirtschaft – Carbon Black aus Autoreifen recyceln“. Online verfügbar unter <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2021/juli-2021/carbon-black-aus-autoreifen-recyceln.html>

Toenges-Schuller, N., Schneider, C., Zimmermann, T., Tebert, C. (2020), Texte 47/2020: „Black Carbon Emissionen – Teilbericht“. Forschungskennzahl 371741 105 0 - Teilbericht im Rahmen des Refoplan-Projektes. Online verfügbar unter https://oekopol.de/src/files/2020-03-05_texte_47-2020_black-carbon.pdf

Transport & Environment (2020), „UK briefing: The plug-in hybrid con“. Online verfügbar unter https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_09_UK_briefing_The_plug-in_hybrid_con.pdf

Fritz, D., Heinfellner, H., Lichtblau, G., Pölz, W., Schödl, B. (2016), „Ökobilanz alternativer Antriebe“, Report REP-0572. (Hrsg.) Umweltbundesamt GmbH. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0572.pdf>

Österreichische Umweltbundesamt (2019), „EKZ Doku Verkehrsmittel“. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz_doku_verkehrsmittel.pdf

Deutsches Umweltbundesamt (2020), „Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/besondere-belastungssituationen/coronavirus-bedeutung-der-luftverschmutzung>

Deutsches Umweltbundesamt (2020), „Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/besondere-belastungssituationen/coronavirus-bedeutung-der-luftverschmutzung>. Zitiert nach EEA Report No 9/2020, „Air quality in Europe – 2020 report“

Deutsches Umweltbundesamt (2020), „Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/besondere-belastungssituationen/coronavirus-bedeutung-der-luftverschmutzung>. Zitiert nach Tung NT, Cheng PC, Chi KH, et al. (2021), “Particulate matter and SARS-CoV-2: A possible model of COVID-19 transmission. *The Science of the Total Environment*”. Jan; 750:141532. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141532. PMID: 32858292; PMCID: PMC7403850.

Deutsches Umweltbundesamt (2020), “Coronavirus: Bedeutung der Luftverschmutzung”. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/besondere-belastungssituationen/coronavirus-bedeutung-der-luftverschmutzung>. Zitiert nach Andrea Pozzer, Francesca Dominici, Andy Haines, Christian Witt, Thomas Münzel, Jos Lelieveld (1 December 2020), “Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19”, *Cardiovascular Research*, Volume 116, Issue 14, Pages 2247–2253, <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa288>

Cordero, R. R., Sepúlveda, E., Feron, S., Damiani, A., Fernandoy, F., Neshyba, S., Rowe, P. M., Ascenio, V., Carrasco, J., Alfonso, J. A., Llanillo, P., Wachter, P., Seckmeyer, G., Stepanova, M., Carrera, J. M., Jorquera, J., Wang, C., Malhotra, A., Dana, J., Khan, A. L., Casassa, G., *Nat Commun* 13, 984 (2022), „Black carbon footprint of human presence in Antarctica“. *NATURE COMMUNICATIONS* (2022) 13:984. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28560-w>

Deutsches Umweltbundesamt (2008), „Bekanntmachung des Umweltbundesamt. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden“. *Bundesgesundheitsbl-Gesundheitsforsch-Gesundheitsschutz* 2008 · 51:1358–1369. Springer Verlag. DOI: 10.1007/s00103-008-0707-2

Schneider, A., Cyrus, J., Breitner, S., Kraus, U. (Annette Peters Helmholtz Zentrum München, Neuherberg), Diegmann, V., Neunhäuserer, L. (IVU Umwelt GmbH, Freiburg) (2018), „Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland“. *Forschungskennzahl 3715 61 201 0 UBA-FB 002600*. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/abschlussbericht_no2_krankheitslast_final_2018_03_05.pdf

Peters, A., Hoffmann, B., Brunekreef, B., Künzli, N., Joss, M. K., Probst-Hensch, N., Ritz, B., Schulz, H., Straif, K., Wichmann, E. (2019), „Die Rolle der Luftschadstoffe für die Gesundheit. Eine Expertise im Namen der Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) und der European Respiratory Society (ERS)“. Online verfügbar unter https://www.helmholtz-munich.de/fileadmin/HZM-Corporate-Website/Bilder/HZM/News/Pressemitteilungen/2019/01_Januar/Positionspapier_190201.pdf

Deutscher Bundestag (2018), „Ultrafeinstaub. Ursachen, gesundheitliche Wirkung und Forschungsbedarf“. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/577840/1c69d2400af2853cf56a77d84e119765/WD-8-094-18-pdf-data.pdf>

WKO (2021), „WKO Statistik – Kraftfahrzeuge“. Online verfügbar unter <http://wko.at/statistik/Extranet/Langzeit/Lang-Kfz.pdf>

STATISTIK AUSTRIA (o.J.), „Kraftfahrzeuge Bestand“. Online verfügbar unter https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html

STATISTIK AUSTRIA (o.J.), „Bevölkerung“. Online verfügbar unter https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/index.html

STATISTIK AUSTRIA, (2022), „Bevölkerung nach Alter und Geschlecht“. Online verfügbar unter https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/bevoelkerungsstruktur/bevoelkerung_nach_alter_geschlecht/index.html

STATISTIK AUSTRIA, (2021), „Bevölkerungsprognosen“. Online verfügbar unter https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/demographische_prognosen/bevoelkerungsprognosen/index.html#:~:text=Dieser%20Prozess%20wird%20sich%20auch,%25%20auf%209%2C94%20Mio.

Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touringclub (2019), „Expertenbericht für Mobilität & Klimaschutz“, (Hrsg.) ÖAMTC, Wien. Online verfügbar unter: [https://www.oeamtc.at/club/oeamtc-expertenbericht-mobilitaet-klimaschutz-2030-25873728#:~:text=Der%20Expertenbericht%20%22Mobilit%C3%A4t%20und%20Klimaschutz,die%20gesamte%20Produkt%20Lebensdauer%20\(Lifecycle](https://www.oeamtc.at/club/oeamtc-expertenbericht-mobilitaet-klimaschutz-2030-25873728#:~:text=Der%20Expertenbericht%20%22Mobilit%C3%A4t%20und%20Klimaschutz,die%20gesamte%20Produkt%20Lebensdauer%20(Lifecycle)

BMK (o.J.), „CO₂-Monitoring von Personenkraftwagen“. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/co2_monitoring/pkw.html

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020), „Das System der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge“. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/zusammenfassung_co2_flottengrenzwerte.pdf

IPCC 2014: Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [T.F. Stocker, D. Qin, G. -K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg, Bonn, 2017. Online verfügbar unter: <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-12-3.html#:~:text=Treibhausgase%2C%20die%20in%20die%20Atmosph%C3%A4re,Ozean%20und%20dem%20Land%20ausgetauscht.>

Deutsches Umweltbundesamt (2021), „Die Treibhausgase“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase#undefined>

Liebmann, B. (2015), „Mikroplastik in der Umwelt – Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf“; Report REP-0550. (Hrsg.) Österreichisches Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0550.pdf>

Deutsches Umweltbundesamt (2017), „Verrottet Plastik gar nicht oder nur sehr langsam. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/verrottet-plastik-gar-nicht-nur-sehr->

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/tabelle_grenzwerte_fuer_schadstoffemissionen_von_pkw.pdf

OECD (2020), Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/4a4dc6ca-en>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2021), „Mobilität ohne Feinstaub“. Online verfügbar unter <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/news/mo-bi-li-taet-oh-ne-fein-staub>

Mann+Hummel, (o.J.), „Auf dem Weg zu weniger Feinstaub“. Online verfügbar unter <https://oem.mann-hummel.com/de/insights/auf-dem-weg-zu-weniger-feinstaub.html>

Audi Umweltstiftung (2022), „URBANFILTER: Mikroplastik herausfiltern, wo es entsteht“. Online verfügbar unter <https://www.audi-umweltstiftung.de/umweltstiftung/de/projects/greenovation/urbanfilter.html>

TU Berlin (o.J.), Projekt Urbanfilter. Online verfügbar unter https://www.siwawi.tu-berlin.de/urban_filter/menue/urban_filter/

Venghaus, D., Schmerwitz, F., Reiber, J., Harald, S., Lindow, F., Herper, D., Pohrt, R., Barjenbruch, M. (2021), „Abschlussbericht. Reifenabrieb in der Umwelt – RAU“, Berlin, BMBF-Vorhaben Förderkennzeichen 13NKE011A, 13NKE011B, 13NKE011C, 13NKE011D, 13NKE011E. Online verfügbar unter https://www.rau.tu-berlin.de/fileadmin/fg118/RAU/20210728_Abschlussbericht_RAU_FINAL_Team.pdf

Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland e.V. (2019), „Fast ein Drittel des Reifenabriebs im Meer entsteht durch den Straßenverkehr“. Online verfügbar unter <https://www.bund.net/service/presse/pressemitteilungen/detail/news/fast-ein-drittel-des-mikroplastiks-im-meer-entsteht-durch-den-strassenverkehr/>

Schwichtenberg, L. (2022), „Reifenabrieb bei Autos im Vergleich: Selbst Markenreifen fallen hier durch“. Online verfügbar unter https://efahrer.chip.de/news/reifenabrieb-bei-autos-im-vergleich-selbst-markenreifen-fallen-hier-durch_106762

Umweltbundesamt (2020), „Mikroplastik überall in der Umwelt nachweisbar“. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/news200415>

Liebmann, B., Stoifl, B., Karigl, B., Hohenblum, P., Stocker, E., Fankhauser, S., Losert, A., Hornek-Gausterer, R. (2020), (Hrsg.) Umweltbundesamt; „Factsheet Mikroplastik 2020“, Wien. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/angebot/analytik/factsheet-mikroplastik_202003.pdf

Greenpeace (o.J.), „11 Tipps für einen plastikfreien Sommer“. Online verfügbar unter <https://plastik.greenpeace.at/tipps-fuer-einen-plastikfreien-sommer/>

Steigenberger, K., Feßl, T. (2013), „Demografie und Verkehr in Österreich“ (Hrsg.) Wirtschaftskammer Österreich. Online verfügbar unter https://news.wko.at/news/oesterreich/2013_04_Dossier_Demografie_und_Verkehr_in_oe.pdf