

DIPLOMARBEIT

Manipulation von AdBlue-basierten Abgasnachbehandlungsanlagen
bei schweren Nutzfahrzeugen und ihre Auswirkung auf den
Emissionsausstoß

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin unter der Leitung von

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bardo Hörl

E280-05

Forschungsbereich für Verkehrssystemplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Victoria Schopf, BSc.

01126323

Wien, 23.02.2022





Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Vorwort und Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bardo Hörl bedanken, der mir die Möglichkeit gab, bereits meine Bachelorarbeit an dem Forschungsbereich Verkehrssystemplanung zu verfassen, und in weiterer Folge während des gesamten Masterstudiums mein Interesse auf diesem Themengebiet erweitert hat. Ebenso gilt mein aufrichtiger Dank Dipl.Ing. Monika Wagner, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand und mich in manch verzweifelter Stunde aufbaute und mir des Öfteren einen Schubs in die richtige Richtung gab. Bei jeder Frage, egal wie banal sie doch gewesen sein mag, standet ihr mir Rede und Antwort. Für eure endlose Geduld danke ich euch von ganzem Herzen.

Auf diesem Wege möchte ich mich außerdem bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich durch all meine Höhen wie auch Tiefen begleitet und unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt dabei meiner Mutter Doris und meinen besten Freunden Claudia und Constantin. Ihr habt immer an mich geglaubt und mich immer wieder aufgebaut – ob im Studium, Arbeitsleben oder im Sport – und dafür werde ich ewig dankbar sein.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Diplomarbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

28.02.2022

Datum



Victoria Sophie Schopf



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Der Großteil des Gütertransportes, der in und durch Österreich verkehrt, findet nach wie vor auf der Straße statt. Trotz der Fortschritte in der Entwicklung alternativer Antriebstechniken werden schwere Nutzfahrzeuge aktuell und vermutlich auch in den nächsten Jahren hauptsächlich durch Dieselmotoren angetrieben. Eine Steigerung des Verkehrsaufkommens zieht somit unweigerlich eine Erhöhung der Emissionen und eine Verschlechterung der Luftqualität nach sich. Besonders in urbanen Gebieten ist die gesundheitliche Belastung durch die Konzentration der Luftschadstoffe hoch.

Die Stickoxide (NO_x) zählen zu den gefährlichsten Luftschadstoffen. Dabei handelt es sich um ein ätzendes Reizgas, das besonders die Lungenfunktion beeinträchtigt. Sie sind ein unerwünschtes Nebenprodukt des Verbrennungsprozesses von fossilen Brennstoffen. Um die Stickoxidemissionen auf ein Minimum zu reduzieren, kommen Abgasnachbehandlungsanlagen zum Einsatz. Bei schweren Nutzfahrzeugen hat sich die Abgasnachbehandlung über die selektive katalytische Reduktion durchgesetzt. Dieser sogenannte SCR-Katalysator verwendet eine Harnstoff-Wasser Lösung mit dem Markennamen AdBlue und kann über die Bildung von Ammoniak bis zu 90 % der NO_x aus dem Abgas reduzieren.

Einige Studien verweisen darauf, dass die Erfolge, die bei der Abgasnachbehandlung zu einer Reduktion der NO_x geführt haben, durch den generellen Anstieg der Fahrleistung sowie die Manipulation von Abgasnachbehandlungsanlagen aufgehoben werden. Zudem wird die Vermutung ausgesprochen, dass bis zu 27 %¹ der schweren Nutzfahrzeuge mit manipulierten Abgasnachbehandlungsanlagen unterwegs sind und somit ihre Grenzwerte nicht mehr einhalten. Dies zieht nicht nur eine erhöhte Umweltbelastung und eine Verschlechterung der Luftqualität nach sich, sondern auch einen unfairen Wettbewerbsvorteil für jene Fuhrparkbetreiber, die sich durch die Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlage Kosten für das AdBlue sparen und aufgrund der EURO-Klassen Einstufung ihrer Fahrzeuge trotz hoher Emissionen geringere Mautgebühren bezahlen.

Die vorliegende Diplomarbeit greift diese Studien auf und gibt auf Datenbasis des Jahres 2018 einen Einblick in die Situation Österreichs. Zum einen wird der Beitrag zur Reduktion der jährlichen NO_x -Emissionen (Einsparungspotenzial), der durch die Einführung der strengeren EURO-Abgasnormen entstand, berechnet. Zum anderen werden mittels einer Modellierung die potenziellen NO_x -Mehremissionen, die durch die Manipulation entstehen, ermittelt. Für die Modellierung wurden vier Szenarien (Referenz-, Basis-, OLI- und Manipulationsszenario) definiert, die

¹ Pöhler/Engel 2018: 12

anhand der Transportleistung, der EURO-Klassen Verteilung sowie der spezifischen NO_x -Emissionsfaktoren versuchen den Einfluss der Manipulation von Abgasnachbehandlungsanlagen bei schweren Nutzfahrzeugen darzustellen. Des Weiteren wurde im Manipulationsszenario die Veränderung der NO_x -Mehremissionen bei unterschiedlichen Manipulationsraten (27 % / 30 % / 40 % / 50 %) abgebildet.

Die Modellierung hat gezeigt, dass durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI und der damit einhergehenden Veränderung der Abgasnachbehandlung in schweren Nutzfahrzeugen ein Einsparungspotenzial von 24.575 t NO_x -Emissionen erzielt werden konnte. Durch die Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlagen kann je nach Manipulationsrate beinahe das gesamte Einsparungspotenzial vernichtet werden. Bei einer angenommenen Manipulationsrate von 27 % können bis zu 117 % mehr NO_x -Emissionen im Straßengüterverkehr entstehen. Die erwartete Einsparungswirkung kann dadurch um bis zu 52 % verfehlt werden. Eine Steigerung der Manipulationsrate zieht unweigerlich eine Erhöhung der NO_x -Mehremissionen nach sich.

Die Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass es durchaus relevant sein kann, sich mit Maßnahmen zur Reduktion der Manipulationsrate zu beschäftigen. Der Verkehrssektor ist für mehr als die Hälfte der jährlichen NO_x -Emissionen verantwortlich und es bedarf spezifischer Maßnahmen, um das Emissionsniveau nachhaltig zu senken. Jedes manipulierte Fahrzeug muss am Ende seiner Tour auch in urbane Gebiete, um seine Güter abzuliefern. Die durch Manipulation entstehenden NO_x -Mehremissionen sind nicht nur aus gesundheitlicher, sondern auch aus wirtschaftlicher Perspektive bedeutsam. Nicht nur verlieren die Autobahnbetreiber einen Teil der Mauteinnahmen durch eine Falsch-Einstufung der Fahrzeuge, sondern sie sind zugleich auch mit der für sie ökonomisch relevanten beschleunigten Alterung des Straßenbelags durch die NO_x -Mehremissionen konfrontiert.

Abstract

The majority of the freight transport that runs in and through Austria still takes place on the road. Despite the advances in the development of alternative motor technologies, heavy commercial vehicles are currently – and probably will be in the next few years as well – mainly powered by diesel engines. An increase in the volume of traffic inevitably leads to an increase in emissions and a deterioration in air quality. Particularly in urban areas, the concentration of air pollutants is high which results in a larger number of health problems.

Nitrogen oxides (NO_x) are among the most dangerous air pollutants. They are a corrosive irritant gas that affect the pulmonary function in particular. They are an undesirable side product of the fossil fuel combustion process. To reduce the amount of NO_x emissions to a minimum, modern vehicles use different kinds of exhaust aftertreatment systems. One example is the selective catalytic reduction, which has become established in heavy commercial vehicles. This so-called SCR catalytic converter uses a urea-water solution with the brand name AdBlue and can reduce up to 90 % of the NO_x from the exhaust gas through the formation of ammonia.

Some studies indicate that the success achieved in the reduction of NO_x has been reduced through the general increase in annual mileage as well as the manipulation of exhaust aftertreatment systems. The studies suggest that up to 27 %² of heavy commercial vehicles have manipulated exhaust aftertreatment systems and can therefore not comply with the defined legal limits for the concentration of the air pollutants. This does not only result in increased environmental pollution and reduced air quality, but also in an unfair competitive advantage for fleet operators who decide to manipulate their vehicles. They save the costs for AdBlue and pay low tolls due to the EURO classification of their vehicles despite high emissions.

This master thesis analyses these studies and provides an insight into the situation in Austria based on data from 2018. First, the contribution to the reduction of the annual NO_x emissions (savings potential), which resulted from the introduction of the stricter EURO emission standards, is calculated. Furthermore, the potential additional NO_x emissions, resulting from the manipulation, are determined. Therefore, four different scenarios (reference, base, OLI and manipulation scenario) are defined. The impact of the manipulation of exhaust aftertreatment systems in heavy commercial vehicles is calculated based on the transport performance, the EURO class distribution and the specific

² Pöhler/Engel 2018: 12

NO_x emission factors. The manipulation scenario will furthermore compare the change in additional NO_x emissions at different manipulation rates (27% / 30% / 40% / 50%).

The calculations show that the introduction of the EURO V and VI pollutant classes and the associated change in exhaust gas aftertreatment in heavy commercial vehicles have resulted in a savings potential of 24.575 t of NO_x emissions. Depending on the manipulation rate, almost the entire savings potential can be destroyed by manipulating the exhaust aftertreatment systems. With an assumed manipulation rate of 27 %, up to 117 % more NO_x-emissions can occur in freight transport. As a result, the expected savings can be missed by up to 52 %. An increase in the manipulation rate inevitably leads to an increase in the additional NO_x-emissions.

The observation of the results clearly indicates the relevance of dealing with measures to reduce the manipulation rate. The transport sector is responsible for more than half of the annual NO_x emissions and specific measures are required to sustainably reduce the level of emissions in order to prevent negative effects on health and economy. At the end of every tour, every manipulated vehicle must go to urban areas to deliver its goods. This means that the additional NO_x emissions will also have an impact on the public health. The manipulation is also relevant from an economic perspective. Not only do the motorway operators lose part of their toll revenue through the incorrect classification of vehicles, but they are also confronted with the accelerated aging of the road surface due to the increased NO_x emissions, which increases expenses for road conservation and repairs.

Inhaltsverzeichnis

Formel- und Abkürzungsverzeichnis.....	xiii
Abkürzungen.....	xiii
Chemische Formeln.....	xiv
Einheiten.....	xiv
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung, Forschungsfragen und Abgrenzung der Diplomarbeit.....	3
1.3 Aufbau der Diplomarbeit und Methodenwahl.....	5
2 Vorgaben zur Luftreinhaltung auf nationaler und internationaler Ebene.....	7
2.1 Programme und rechtliche Instrumente zur Luftschadstoffreduktion.....	7
2.2 Internationale Vereinbarungen und ihre Umsetzung in Österreich.....	9
2.2.1 Übereinkommen von Paris.....	9
2.2.2 Leitlinien für Luftqualität der Weltgesundheitsorganisation.....	10
2.2.3 Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung.....	10
2.2.4 EU Clean Air Policy Package.....	11
2.2.5 European Green Deal.....	11
2.2.6 Europäische Luftqualitätsrichtlinien.....	12
2.2.7 National Emissions Ceiling Directive.....	13
2.3 Weitere nationale Gesetze und Programme zum Schutz des Klimas und der Atemluft.....	15
2.3.1 Klimaschutzgesetz.....	15
2.3.2 Mission 2030.....	16
2.3.3 Nationaler Energie- und Klimaplan.....	16
2.4 Österreichische Luftschadstoff-Inventur.....	17
3 Definition von Richt- und Grenzwerten für Luftschadstoffe.....	21
3.1 Zielsetzungen für die Luftschadstoffe in Österreich.....	21
3.2 Aktuelles Niveau der Stickoxidemissionen in Österreich.....	24
3.3 Entwicklung der EURO-Abgasnormen.....	26
3.4 Planerisch administrative Ansatzpunkte zur Reduktion von Stickoxidemissionen.....	28
3.5 Ausblick zu den Folgen einer Zielverfehlung.....	30

4	Stickoxidemissionen und ihre Auswirkungen	31
4.1	Arten von Stickoxiden.....	31
4.2	Entstehung von Stickoxiden	32
4.3	Verursacher von Stickoxidemissionen	32
4.4	Auswirkungen von Stickoxiden auf Menschen und Umwelt	33
5	Abgasmesstechnik und Prüfzyklen	35
5.1	Typprüfung, Serienprüfung, Feldüberwachung.....	35
5.2	Arten von Fahrzeugklassen	36
5.3	Testzyklus bei Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen	36
5.4	Testzyklus bei schweren Nutzfahrzeugen	37
6	Methoden zur Reduktion der Schadstoffemissionen in Verbrennungsmotoren	39
6.1	Innermotorische Maßnahmen	39
6.2	Abgasrückführung	40
6.3	Außermotorische Maßnahmen	42
6.3.1	Oxidationskatalysator	43
6.3.2	Dieselpartikelfilter.....	44
6.3.3	Drei-Wege-Katalysator.....	44
6.3.4	Stickoxid-Speicher-katalysator	46
6.3.5	SCR-Katalysator.....	46
7	Schadstoffminderung bei Diesel-Fahrzeugen durch den Einsatz von AdBlue	49
7.1	Zusammensetzung und Wirkungsweise von AdBlue	49
7.2	Herausforderungen der Verwendung von AdBlue	50
7.3	Gründe und ökonomische Perspektive der Manipulation von Abgasnachbehandlungsanlagen bei Diesel-LKW	51
7.4	Manipulation der AdBlue-Einspritzung durch elektronische Emulatoren bei Diesel-LKW ..	53
8	Grundlagen für die Ermittlung der Verkehrsteilnahme manipulierter schwerer Nutzfahrzeuge in Österreich	57
8.1	Auswertungen von Studien über die Verkehrsteilnahme manipulierter schwerer Nutzfahrzeuge	57
8.2	Statistische Datengrundlagen.....	60

9	Ermittlung der Stickoxid-Einsparungspotenziale und -Mehremissionen	63
9.1	Grundlagen für die Szenarienbildung	63
9.2	Ermittlung des Stickoxid-Einsparungspotenzials durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI	65
9.2.1	Berechnung der spezifischen Stickoxid-Emissionsfaktoren	65
9.2.2	Referenzszenario	66
9.2.3	Basisszenario	66
9.2.4	Berechnung des theoretischen Einsparungspotenzials durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI	67
9.2.5	Ergebnis Einsparungspotenzial	68
9.3	Ermittlung der Stickoxid-Mehremissionen durch die Verkehrsteilnahme manipulierter schwerer Nutzfahrzeuge	69
9.3.1	OLI-Szenario	69
9.3.2	Manipulationsszenario	69
9.3.3	Berechnung der Stickoxid-Mehremissionen	71
9.3.4	Ergebnis Stickoxid-Mehremissionen	72
9.3.5	Auswirkungen der Stickoxid-Mehremissionen auf die Straßeninfrastruktur	74
10	Grenzen der Aussagekraft und Limitationen der Berechnungen.....	77
10.1	Ermittlung der Stickoxidemissionen	77
10.2	Individuelle Anpassung der Emissionsfaktoren an die österreichische Situation	78
10.3	Berücksichtigung von fahrzeugklassen-spezifischen Emissionsfaktoren	78
10.4	Stichprobengröße	79
10.5	Anwendung der Manipulationsrate auf die jährliche Transportleistung von EURO V- und EURO VI-Fahrzeugen	79
11	Ausblick und Schlussfolgerung.....	81
12	Verzeichnisse	83
12.1	Quellenverzeichnis	83
12.2	Tabellenverzeichnis	98
12.3	Abbildungsverzeichnis	98



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub e.V.
AGR	Abgasrückführung
ASFINAG	Autobahn- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
ASTRA	Bundesämter für Strassen
BMK	Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BMNT	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus
EEA	European Environmental Agency – Europäische Umweltagentur
EEV	Enhanced environmentally friendly vehicle
EU	European Union – Europäische Union
FZG	Fahrzeug
HBEFA	Handbook Emission Factors for road transport – Handbuch Emissionsfaktoren für Straßentransport
IWO	Institut für Wärme und Öltechnik
KFZ	Kraftfahrzeug
LKW	Lastkraftwagen
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMHC	Non Methane Hydrocarbons – Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
NTE	Not to exceed – nicht zu überschreiten
ÖAMTC	Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club
OLI	Österreichische Luftschadstoff Inventur
ORF	Österreichischer Rundfunk
PEMS	Portable Emission Measurement System – portables Emissionsmesssystem
PKW	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter – Partikel
RDE	Real Driving Emissions – Emissionen einer realen Fahrt
RL	Richtlinie
SCR	Selective Catalytic Reduction – selektive katalytische Reduktion
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations – Vereinte Nationen
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe – Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen

USA	United States (of America) – Vereinigte Staaten (von Amerika)
VCÖ	Verkehrsclub Österreich
VO	Verordnung
WHO	World Health Organization – Weltgesundheitsorganisation
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle – weltweit harmonisierter stationärer Zyklus
WHTC	World Harmonized Transient Cycle – weltweit harmonisierter transienter Zyklus
WKO	Wirtschaftskammer Österreich
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle – weltweit harmonisierter Testzyklus für leichte Fahrzeuge
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure – weltweit harmonisierte Testprozedur für leichte Fahrzeuge

Chemische Formeln

$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	Harnstoff
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
H ₂ O	Wasser
HC	Hydrocarbons – Kohlenwasserstoffe
HNCO	Isocyan Säure
N ₂	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffoxid
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
O ₃	Ozon

Einheiten

g	Gramm
µg	Mikrogramm
km	Kilometer
kt	Kilotonne
kWh	Kilowatt-hour – Kilowattstunde
mg	Milligramm
tkm	Tonnenkilometer

1 Einleitung

In Zeiten der Expresszustellung und On-Demand-Logistik boomen Online-Handel und Logistik-Unternehmen, wodurch folglich auch eine Zunahme bei den Nutzfahrzeugen, die eingesetzt werden, um diese Waren zu transportieren und distribuieren, zu beobachten ist. Ein steigendes Verkehrsaufkommen führt unweigerlich zu einer erhöhten Umweltbelastung sowie zu einer Verschlechterung der Luftqualität. Die Einhaltung der europäischen Umweltschutzziele hat in diesem Kontext hohe Priorität.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Obwohl in den letzten Jahren viele Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität gesetzt wurden und bereits ein erheblicher Rückgang der Luftschadstoffemissionen verzeichnet werden konnte, ist die Konzentration der verbliebenen Schadstoffe in der Luft weiterhin zu hoch (EEA 2017: online). Die anhaltende Luftverschmutzung ist eine globale Bedrohung, welche schwere Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung und die Umwelt hat. Die weltweite Zunahme der Emissionen und Konzentrationen von Luftschadstoffen sind besonders in stark verdichteten oder urbanen Gebieten spürbar geworden.

Es gibt verschiedene Quellen von Luftverschmutzung. Diese können sowohl anthropogenen als auch natürlichen Ursprungs sein. Anthropogene Quellen der Luftverschmutzung stellen unter anderem die Verbrennung fossiler Brennstoffe (für die Stromerzeugung, im Verkehr, in der Industrie und in Haushalten), industrielle Prozesse und der Einsatz von Lösungsmitteln sowie Prozesse aus der Landwirtschaft und der Abfallbehandlung dar. Zu den natürlichen Ursachen für Luftverschmutzung zählen unter anderem Vulkanausbrüche, verwehter Staub, Meersalzversprühung und Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen von Pflanzen. (EEA 2017: online)

Die Luftverschmutzung wird von der Europäischen Union als eine der Hauptursachen von frühzeitigen Todesfällen deklariert und gilt als das größte umweltbedingte Gesundheitsrisiko Europas. Die Europäische Union sowie die Republik Österreich versuchen durch zahlreiche Maßnahmen die Belastung durch einige Luftschadstoffe drastisch zu reduzieren. Im Fokus stehen dabei vor allem die drei gefährlichsten Luftschadstoffe: Feinstaub (PM₁₀), Ozon (O₃) und Stickstoffdioxid (NO₂). Diese Luftschadstoffe können in großen Konzentrationen zu erheblichen Beeinträchtigungen der Gesundheit sowie zu negativen Auswirkungen auf empfindliche Ökosysteme führen. Besonders bei

diesen Luftschadstoffen sind in den nächsten Jahren noch weitere Maßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene notwendig. (UBA 2021a: online)

Im Jahr 2016 schätzte die Europäische Umweltagentur (EEA 2016: online) 498.100 frühzeitiger Todesfälle in Europa¹ als Folge von Luftverschmutzung. Davon entfielen 6.570 auf Österreich (EEA 2019: 68). Neben der langfristigen, kann auch bereits die kurzfristige Exposition von Kindern sowie Erwachsenen mit Luftschadstoffen zu einer reduzierten Lungenfunktion, Infektion der Atemwege und folglich schweren Asthma führen (EEA 2018: 11; Europäische Kommission 2013: online). Zu den besonders gefährdeten Personengruppen gehören Kinder, ältere Menschen und Personen mit Vorerkrankungen. Die wirtschaftlichen Auswirkungen der Gesundheitsschädigung durch Luftverschmutzung sind ebenfalls nicht zu unterschätzen. So bringt eine erhöhte Belastung neben einer Verkürzung der Lebenserwartung auch eine Erhöhung der Kosten für die medizinische Versorgung sowie eine Reduzierung der Produktivität aufgrund vermehrter Krankheitstage mit sich. (EEA 2019: 8)

Aus diesem Grund werden bereits seit über 30 Jahren Maßnahmen gesetzt, um die Stickoxidemissionen (NO_x-Emissionen) in Österreich zu reduzieren. Von 1990 bis 2018 konnte ein Rückgang der NO_x-Emissionen um ca. 32 % verzeichnet werden. Dabei reduzierten sich die jährlichen NO_x-Emissionen von ca. 200.000 t auf rund 135.000 t. Überschritten werden die Grenzwerte für Stickstoffdioxidemissionen (NO₂-Emissionen) derzeit vor allem in verkehrsnahen Gebieten und größeren Städten, was zum Großteil auf den Verkehr zurückgeführt werden kann. Im Jahr 2019 fanden 55 % der gesamten NO_x-Emissionen (inkl. Kraftstoffexport) ihren Ursprung im Verkehr (Anderl et al. 2021a: 32). Österreich setzt verschiedene Maßnahmen, wie beispielsweise ein Nachtfahrverbot für schwere Nutzfahrzeuge, ein sektorales Fahrverbot oder Geschwindigkeitsbeschränkungen, um die Belastung durch NO₂ zu verringern. Außerdem hat der Einsatz von Katalysatoren und effizienteren Motoren die Fahrzeuge immer sauberer bzw. umweltfreundlicher werden lassen. (Achtnicht 2018: 574)

Dennoch wird das aktuelle Emissionsniveau der NO_x als hoch eingestuft. Dies wird seitens des Umweltbundesamts (UBA) auf mehrere Faktoren zurückgeführt: Zum einen ist der Anteil der Diesel-PKW am Gesamtfahrzeugbestand in Österreich sowie an der jährlichen Gesamtfahrleistung hoch und die Fahrleistung steigt weiter an. Der bisher erzielte technologische Fortschritt, der zu einer Reduktion der ausgestoßenen Luftschadstoffe führt, wird durch den generellen Anstieg der Fahrleistung aufgehoben. Zum anderen muss beachtet werden, dass die NO_x-Emissionen von Diesel-PKW und

¹ 41 europäische Länder reichten ihre Werte für die Erstellung des europäischen Luftqualitätsberichts ein (EU-28 plus Albanien, Andorra, Bosnien-Herzegowina, Island, Kosovo, Liechtenstein, Monaco, Montenegro, Nord Mazedonien, Norwegen, San Marino, Serbien und die Schweiz).

leichten Nutzfahrzeugen im Realbetrieb deutlich höher sind als die gesetzlich zugelassenen Werte laut Typenprüfzyklus². Als besonders positiv gelten die Fortschritte in der Abgasnachbehandlung im Schwerverkehr, welche laut dem UBA (2020: 1) einen hohen Anteil an den rückläufigen NO_x-Emissionen hatten. Trotz moderner und alternativer Antriebstechniken für Nutzfahrzeuge werden aktuell und vermutlich auch in naher Zukunft der Großteil des Gütertransportes weiterhin durch Fahrzeuge mit Diesel- oder in manchen wenigen Fällen Benzinantrieb transportiert.

Ein bislang weitestgehend unberücksichtigter zusätzlicher Grund für den Anstieg der NO_x-Emissionen trotz des stetigen technologischen Fortschritts scheint die Manipulation von Diesel-Fahrzeugen zu sein. Immer wieder wird von PKW und/oder LKW berichtet, deren Abgasnachbehandlungsanlagen durch den Endnutzer manipuliert werden, um Kosten einzusparen (Pöhler/Engel 2018: 6) oder deren Boardcomputer vom Hersteller derart manipuliert werden, um bei Testzyklen die vorgegebenen Emissionsgrenzwerte einzuhalten (ÖAMTC 2020: online). Im Zuge dieser Diplomarbeit soll die aktuelle Situation in Österreich dargestellt und die durch die Manipulation von LKW-Abgasnachbehandlungsanlagen potenziell entstehenden NO_x-Mehremissionen analysiert werden. Dabei werden ausschließlich die NO_x-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (ab 3,5 t) betrachtet.

1.2 Zielsetzung, Forschungsfragen und Abgrenzung der Diplomarbeit

Die Reduktion der NO_x-Emissionen ist, wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, ein wichtiges verkehrspolitisches Ziel, das sowohl für die Gesundheit des Menschen als auch für die Erhaltung einer intakten Umwelt von großer Bedeutung ist. Die verkehrspolitischen Anstrengungen auf europäischer und nationaler Ebene, welche zur Erreichung dieses Reduktionsziels gesetzt wurden, werden jedoch durch den Einsatz jedes schweren Nutzfahrzeugs mit einer manipulierten Abgasnachbehandlungsanlage, konterkariert. Wie viele Fahrzeuge tatsächlich auf österreichischen Straßen mit einer manipulierten Abgasnachbehandlungsanlage unterwegs sind und wie stark daher die Reduktionsbemühungen der Verkehrspolitik hinsichtlich des jährlichen Niveaus an NO_x-Emissionen verringert werden, ist nur sehr schwer zu quantifizieren.

In der vorliegenden Diplomarbeit soll ein Beitrag geleistet werden, um eben diese Größe des potenziellen Schadens durch eine Verkehrsteilnahme von schweren Nutzfahrzeugen mit manipulierter Abgasnachbehandlungsanlage abzuschätzen. Es soll in dieser Diplomarbeit nicht nur ein Einblick in derzeitige Maßnahmenpakete und Strategien gegeben – welche von der Europäischen

² Typenprüfzyklus ist ein standardisiertes Verfahren, in dem nach der in der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 vorgeschriebenen Methodik die CO₂-Emissionen neuer Fahrzeuge gemessen werden. Die Methodik wird mit der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 im Anhang XII (NEFZ) bzw. Verordnung (EU) 2017/1151 (WLTP) umgesetzt.

Union (EU) und Österreich in Kraft gesetzt werden, um gegen die anhaltende Luftverschmutzung vorzugehen – sondern auch die technischen Fortschritte in der Fahrzeugentwicklung angeführt werden. Ein besonderes Augenmerk wird außerdem auf den Einsatz von sogenannten DeNO_x-Systemen³ bei schweren Nutzfahrzeugen gelegt. Dabei wird hervorgehoben, welche Minderungseffekte durch ihren Einsatz erzielt werden können, welche positiven Auswirkungen daraus resultieren und welche Problematik mit Manipulationsversuchen dieser Systeme einhergeht.

Folgende Fragestellungen werden im Laufe dieser Diplomarbeit behandelt:

Welchen Beitrag zur Reduktion der jährlichen NO_x-Emissionen in Österreich hat die Verschärfung der EURO-Abgasnorm schätzungsweise geleistet?

Wie groß ist schätzungsweise der potenziell entstandene Schaden, gemessen an den NO_x-Mehremissionen in Österreich durch manipulierte Abgasnachbehandlung bei schweren Nutzfahrzeugen?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wird die Behandlung einer Reihe weiterer untergeordneter Fragen notwendig:

- (1) Wie viele schwere Nutzfahrzeuge mit manipulierten Abgasnachbehandlungsanlagen sind schätzungsweise auf Österreichs Straßen unterwegs und welchen Anteil haben diese Fahrzeuge an der Jahresfahrleistung im österreichischen Straßengüterverkehr?
- (2) Wie hoch ist der Unterschied der Abgaswerte zwischen einem manipulierten und einem der Schadstoffklasse EURO V/VI entsprechenden schweren Nutzfahrzeug?
- (3) Um wie viel erhöhen sich die jährlichen NO_x-Emissionen, wenn 30 / 40 / 50... Prozent der in Österreich verkehrenden schweren Nutzfahrzeuge mit manipulierten Abgasnachbehandlungsanlagen fahren.

Zur Bewertung des potenziell entstandenen Schadens werden die in der vorliegenden Diplomarbeit schätzungsweise ermittelten NO_x-Mehremissionen einerseits den gesamten NO_x-Emissionen des Schwerverkehrs sowie andererseits dem Reduktionsbedarf, also der Differenz aus den an die EU gemeldeten jährlichen österreichischen NO_x-Emissionen und dem angestrebten österreichischen NO_x-Umweltziels, gegenübergestellt.

Der Einfluss von Alternativen bei den verwendeten Brennstoffen (wie etwa Biokraftstoffe) sowie von alternativen Antriebsarten, die zur Treibhausgasreduktion bei schweren Nutzfahrzeugen mit einem Diesel-Antrieb eingesetzt werden können, stehen im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit nicht im

³ Unter „DeNO_x“ versteht man die Abscheidung von Stickoxiden aus Abgasen. Dieser Vorgang wird umgangssprachlich auch Entstickung genannt. (Umweltbundesamt (D) 2013: online)

Fokus. Der Grund dafür liegt darin, dass der Diesel-Antrieb beim schweren Nutzfahrzeug auch heute noch der Standardmotor ist. Fahrzeuge, die auf andere Antriebstechnologien zurückgreifen sind bislang eher selten vertreten und werden daher von der Betrachtung in der vorliegenden Diplomarbeit ausgeschlossen.

1.3 Aufbau der Diplomarbeit und Methodenwahl

Die zentrale Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit ist, auf Grundlage einer Modellrechnung darzustellen, welchen Einfluss die Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlagen von dieselbetriebenen schweren Nutzfahrzeugen durch den Endnutzer auf das österreichische Emissionsniveau von NO_x haben könnte. Dazu werden verschiedene Szenarien definiert und die Veränderung der modellierten NO_x -Emissionen ermittelt. Der hierdurch aufgezeigte Unterschied des jährlichen NO_x -Emissionsniveaus soll einen Eindruck vermitteln, welche Bedeutung dieser Problematik zukommt und gibt demnach Aufschluss darüber, wie wichtig eine Aufdeckung und Nachverfolgung solcher Manipulationen aus ökologischer Perspektive ist.

Im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit wird zunächst der derzeitige Wissensstand rund um das Thema Luftschadstoffe und deren Einfluss auf die menschliche Gesundheit sowie die Umwelt aufbereitet. Dies umfasst die nähere Beleuchtung der vorliegenden Programme, Richtlinien, Gesetze und Maßnahmen, die auf der europäischen wie auch österreichischen Ebene zur Verbesserung der Luftqualität gesetzt werden.

In weiterer Folge kommen verschiedene Forschungsmethoden zum Einsatz: Vielfach wird auf die bestehende Fachliteratur Bezug genommen, um den aktuellen Stand der Forschung zum gewählten Thema abzubilden. Die Beantwortung der aufgeworfenen Forschungsfrage basiert auf einem induktiven Schluss. Anhand einer empirischen, investigativen Studie zur Diskrepanz von gemessenen NO_x -Emissionen bei schweren Nutzfahrzeugen im Realbetrieb entlang einer Autobahnstrecke und laut EURO-Abgasnorm zulässiger Emissionsgrenzwerte wird auf die jährlichen NO_x -Emissionen verursacht durch schwere Nutzfahrzeuge geschlossen. Dazu wird ein Berechnungsmodell zu den jährlichen NO_x -Emissionen des österreichischen Schwerverkehrs erstellt, welches auf der österreichischen Statistik zur jährlichen Fahrleistung nach Fahrzeugklassen aufbaut. Die Auswirkungen der Manipulation von Abgasnachbehandlungsanlagen werden in Folge anhand eines Szenarien-Vergleichs abgeschätzt.

2 Vorgaben zur Luftreinhaltung auf nationaler und internationaler Ebene

Luftverschmutzung ist nicht ausschließlich ein lokales, sondern ein hemisphärisches und damit globales Problem. Aufgrund ihrer langen Lebensdauer in der Atmosphäre können manche Luftschadstoffe über viele hundert Kilometer transportiert werden und weit entfernt von ihrer Freisetzung die Umwelt und die menschliche Gesundheit schädigen. (EEA 2017: online)

Besonders betroffen von schlechter Luftqualität ist die Bevölkerung in den urbanen Ballungsräumen. Durch das erhöhte Verkehrsaufkommen in dicht besiedelten Gebieten werden die Grenzwerte für die Luftqualität oft überschritten – besonders in Bezug auf Feinstaub, Stickstoffdioxid und bodennahen Ozon. Etwa 90% der europäischen Stadtbevölkerung sind Schadstoffen in Konzentrationen ausgesetzt, die über dem als gesundheitsgefährdend erachteten Wert liegen. Im Falle von NO_x handelt es sich dabei um einen Jahresmittelwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (EEA 2017: online, Spangl/Nagl 2020: 8)

Dem Air Quality Report der EEA (2020: 9) zufolge stellt sich die Luftverschmutzung derzeit als Europas zweit größtes Umweltproblem nach dem Klimawandel dar. Die Emissionen von Luftschadstoffen sind laut einer Stellungnahme der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2017 die bedeutendste umweltbedingte Ursache für vorzeitige Todesfälle in der EU. Sie führen zu Atemwegserkrankungen, erheblichen Gesundheitskosten und ziehen folglich einen Verlust an Arbeitstagen nach sich. Laut den Daten der EEA (2019: 68) belief sich die Zahl der frühzeitigen Todesfälle, die vorwiegend auf die Auswirkungen der drei Luftschadstoffe Feinstaub ($\text{PM}_{2,5}$), NO_x und Ozon zurückzuführen sind, auf knapp unter 500.000 Fälle pro Jahr.

2.1 Programme und rechtliche Instrumente zur Luftschadstoffreduktion

Um der Problematik der Luftverschmutzung entgegen zu wirken hat die EU unter Führung der Kommission im Laufe der vergangenen Jahrzehnte Anstrengungen zur Verringerung der Luftverschmutzung unternommen. Dafür wurden neben den Klima- und Umweltzielen, zusätzlich Richtlinien, Programme und Übereinkommen zum Schutz der Luft beschlossen. Die Normierung der Emissionen von Kraftfahrzeugen (KFZ) und die immer strenger werdenden in der Normierung enthaltenen Emissionsgrenzwerte sowie die Verbesserung der Kraftstoffqualität sind ebenfalls Faktoren, die zur Verbesserung der Luftqualität beigetragen haben. Insbesondere die Grenzwerte für den maximal zulässigen NO_x -Ausstoß für Diesel-PKW wurden bereits mehrmals verschärft. (Europäische Kommission 2017: online)

In der Tabelle 1 wird ein Überblick über derzeit aktuelle Richtlinien, Programme und Gesetze zum Schutz der Luft auf internationaler und nationaler Ebene gegeben.

Tabelle 1: Übersicht internationaler sowie nationaler Dokumente zum Schutz der Luft

Globale Ebene	<ul style="list-style-type: none"> • Übereinkommen von Paris⁴ • Leitlinien für Luftqualität der Weltgesundheitsorganisation (WHO)
EU-Ebene	<ul style="list-style-type: none"> • Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (LRTAP)⁵ • Maßnahmenpaket „EU-Clean Air Policy Package“ • European Green Deal • Luftqualitätsrichtlinien 2008/50/EG⁶ und 2004/107/EG⁷ • NEC-Richtlinie (EU 2016/2284)⁸
Nationale Ebene	<p>Strategiepapiere und Gesetze zur Verminderung von Stickoxiden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nationales Luftreinhaltprogramm 2019⁹ • Emissionsgesetz-Luft (EG-L)¹⁰ • Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L)¹¹ <p>Strategiepapiere und Gesetze zur Verminderung von Treibhausgasen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klimaschutzgesetz¹² • Nationaler Energie- und Klimaplan¹³ • Mission 2030¹⁴

⁴ Übereinkommen von Paris, ABl. L 282/4.

⁵ Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung, BGBl. 1983/158.

⁶ Richtlinie 2008/50/EG

⁷ Richtlinie 2004/107/EG

⁸ Richtlinie (EU) 2016/2284

⁹ BMNT 2019a: „Nationales Luftreinhaltprogramm 2019“.

¹⁰ Bundesgesetz über nationale Emissionsreduktionsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe (Emissionsgesetz-Luft 2018 –EG-L 2018), BGBl. I 2018/75 idgF.

¹¹ Bundesgesetz zum Schutz vor Immissionen durch Luftschadstoffe (Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L), BGBl. I 1997/115 idgF.

¹² Bundesgesetz zur Einhaltung von Höchstmengen von Treibhausgasemissionen und zur Erarbeitung von wirksamen Maßnahmen zum Klimaschutz (Klimaschutzgesetz - KSG), BGBl. I 2011/106 idgF.

¹³ BMNT 2019b: „Integrierter nationaler Energie—und Klimaplan für Österreich. Periode 2021-2030“.

¹⁴ BMNT 2018: „#mission2030. Die österreichische Klima- und Energiestrategie“.

Generell kann in Österreich zwischen Strategiepapieren und Gesetzen zur Verminderung von Treibhausgasen und Luftschadstoffen – insbesondere von NO_x – unterschieden werden. Das Klimaschutzgesetz, die Mission 2030 sowie der Nationale Energie- und Klimaplan legen in Österreich Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen fest. Dies inkludiert die Luftschadstoffe Kohlendioxid (CO_2), Methan sowie auch die NO_x , jedoch bleiben die Maßnahmen allgemein für alle drei Luftschadstoffe und gehen nicht speziell auf NO_x ein. Im nationalen Luftreinhalteprogramm sowie dem Emissions- und Immissionsschutzgesetz werden Maßnahmen zur Reduktion der NO_x im Speziellen aufgeführt.

Im Weiteren wird näher auf die derzeit gültigen europaweiten sowie nationalen Vorgaben, welche einen Schwerpunkt auf die Minderung der Luftschadstoffemissionen – im Speziellen von NO_x – setzen, eingegangen und deren Umsetzung in das österreichische Recht dargestellt.

2.2 Internationale Vereinbarungen und ihre Umsetzung in Österreich

Im folgenden Kapitel werden die internationalen Programme, Richtlinien und Vorgaben sowie ihre Implementierung in Österreich dargestellt. Obwohl einige der genannten Dokumente und Übereinkommen keine speziellen Vorgaben für bzw. Maßnahmen zur Reduktion von NO_x geben, müssen sie dennoch erwähnt werden. Viele Maßnahmen, die die Reduktion von Treibhausgasen begünstigen, haben ebenso positive Auswirkungen auf die NO_x -Emissionen.

2.2.1 Übereinkommen von Paris

Das Übereinkommen von Paris (ABl. L 282/4) wurde im Dezember 2015 auf der Pariser Klimakonferenz beschlossen und ist die erste umfassende und rechtsverbindliche Klimaschutzvereinbarung. Es enthält Verpflichtungen für Industrie- wie auch Entwicklungsländer. Dabei wurde die Begrenzung des Anstiegs der weltweiten Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2°C gegenüber vorindustriellen Werten als langfristiges Ziel gesetzt. Ebenso wurde als Ziel formuliert, dass versucht werden soll, den Anstieg der Durchschnittstemperatur auf $1,5^\circ\text{C}$ zu begrenzen, da dies die Risiken und Folgen des Klimawandels deutlich vermindern würde. Hauptziel des Übereinkommens von Paris ist es, den Klimawandel und die daraus resultierende Erderwärmung zu stoppen. Dies kann nur durch die Reduktion und Bindung von Treibhausgasen erreicht werden. (Europäische Kommission 2021a: online)

Dieses Übereinkommen beinhaltet keine speziellen Vorgaben zur Reduktion von NO_x , jedoch geht diese mit der Reduktion der Treibhausgase Hand in Hand.

2.2.2 Leitlinien für Luftqualität der Weltgesundheitsorganisation

Schon bereits Mitte der 1980er Jahre hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) eine Reihe von Leitlinien zum Schutz der Luftqualität publiziert. Mittlerweile gibt es vier Auflagen der Luftqualitätsleitlinien – die aktuellste Auflage wurde im Jahr 2021 veröffentlicht. Die Luftqualitätsleitlinien beinhalten Richtwerte für die vier häufigsten Luftschadstoffe (PM, Ozon, NO_x und SO₂), deren Einhaltung zu einer Verringerung der Gesundheitsrisiken führen würde. (Umweltbundesamt (D) 2021: online; WHO 2019: online)

Diese Leitlinien haben keine Rechtsverbindlichkeit, jedoch werden sie oft als Bezugswerte für Normen und Ziele, die die Reinhaltung der Luft thematisieren, herangezogen. Die neueste Auflage der Luftqualitätsrichtlinie empfiehlt für die NO₂-Konzentration einen Jahresmittelwert von 10 µg/m³ und einen Einstundenmittelwert von 25 µg/m³ (WHO 2021: 124). Bislang lagen die empfohlenen Werte für die NO₂-Konzentration bei 40 µg/m³ und einem Einstundenmittelwert von 200 µg/m³ (Spangl/Nagl 2019: 111).

2.2.3 Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung

Nachdem sich Luftschadstoffe nicht von Staatsgrenzen aufhalten lassen, ist die länderübergreifende Zusammenarbeit bei der Luftreinhaltung unerlässlich. Einer der wichtigsten internationalen Rechtsrahmen für die Kooperation ist das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung¹⁵ (LRTAP) der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE). Vertragsparteien des Übereinkommens sind neben Österreich alle Mitgliedstaaten der EU sowie die EU selbst (BMNT 2019a: 8). Das LRTAP wurde über die Jahre hinweg durch mehrere Protokolle erweitert – darunter auch das 1999 verabschiedete Göteborg-Protokoll¹⁶. Das Göteborg-Protokoll legte erstmals individuelle Vorgaben für die Reduktion mehrerer nationaler Emissionen fest. Bei den regulierten Schadstoffen handelt es sich um Schwefeldioxid (SO₂), NO_x, flüchtige organische Verbindungen außer Methan (NMVOC) und Ammoniak (NH₃). (BMNT 2019a: 8)

Um den Berichtsanforderungen des Übereinkommens gerecht zu werden, erstellt das österreichische Umweltbundesamt jährlich den Informative Inventory Report (IIR). Diese Inventur enthält eine umfassende und detailreiche Beschreibung der Methodik zur Berechnung der Österreichischen Luftschadstoffinventur (OLI) sowie die Emissionsfaktoren und Aktivitäten, die für die Emissionsberechnung notwendig sind.

¹⁵ Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung, BGBl. 1983/158.

¹⁶ Beschluss 2003/507/EG; Beschluss (EU) 2017/1757

2.2.4 EU Clean Air Policy Package

Seit den 1970ern arbeitet die EU daran die Luftqualität – über die Regulierung und Kontrolle von Schadstoffemissionen, der Verbesserung der Treibstoffqualität und durch die Integration von Umweltschutzmaßnahmen in den Transport und Energiesektor – zu verbessern (Europäische Kommission 2021b: online).

Im Jahr 2013 veröffentlichte die Europäische Kommission das „EU Clean Air Policy Package“. Es beinhaltet Zielvorgaben für die Verringerung der gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen der Luftverschmutzung bis 2030 sowie Legislativvorschläge zur Umsetzung strengerer Normen für Emissionen und Luftverschmutzung (Europäischer Rat 2018: online). Als langfristiges Ziel wird die Erreichung der Luftqualitätsrichtwerte der WHO in der gesamten EU bis 2030 definiert. Des Weiteren sollen die Luftverschmutzungen auf ein Level herabgesenkt werden, welches die schädlichen Effekte auf die menschliche Gesundheit sowie die Umwelt innerhalb des europäischen Raums auf ein Minimum reduziert. Die Richtwerte zum langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit werden von der WHO festgelegt und sind in der Regel niedriger als die Grenzwerte, die im österreichischen Immissionsschutzgesetz¹⁷ (IG-L) und den EU-Richtlinien genannt werden. (Spangl/Nagl 2019: 9)

2.2.5 European Green Deal

Der European Green Deal ist ein von der Europäischen Kommission vorgestelltes Konzept mit dem Ziel, bis 2050 in der EU die Netto-Emissionen von Treibhausgasen auf null zu reduzieren und somit als erster Kontinent klimaneutral zu werden. Er umfasst eine Reihe von Maßnahmen und soll zentraler Bestandteil der Klimapolitik der EU werden. Wie bereits zuvor werden auch hier keine expliziten Maßnahmen und Vorgaben für die NO_x-Emissionen genannt, aber durch die Reduktion von Treibhausgasen wird auch der European Green Deal positive Auswirkungen auf sie haben. (Europäische Kommission 2019: 2)

¹⁷ Bundesgesetz zum Schutz vor Immissionen durch Luftschadstoffe (Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L), BGBl. I 1997/115 idgF.

2.2.6 Europäische Luftqualitätsrichtlinien

Wenn von den europäischen Luftqualitätsrichtlinien¹⁸ gesprochen wird, sind damit die „Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft für Europa“ (RL 2008/50/EG, ABl. L 152/1) sowie ihre Tochtrichtlinie „Richtlinie über Arsen, Kadmium, Quecksilber, Nickel und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Luft“ (RL 2004/107/EG, ABl. L 23/3) gemeint.

Die Richtlinie 2008/50/EG behandelt die Luftschadstoffe SO₂, NO₂ und NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, CO, Ozon, Blei und Benzol. Sie zählt zu den wichtigsten Maßnahmen im Rahmen der europäischen Strategie zur Verbesserung der Luftqualität. (Spangl/Nagl 2020: 15) Diese Luftqualitätsrichtlinien sollten von allen Mitgliedstaaten je nach Schadstoff ab dem Jahr 2005 bzw. 2010 eingehalten werden. Bei Überschreitungen der festgelegten Grenzwerte müssen von den Mitgliedstaaten Luftqualitätspläne mit konkreten Maßnahmen erstellt und umgesetzt werden.

Im Artikel 22 der Richtlinie 2008/50/EG wurde festgelegt, dass die Grenzwerte für NO₂ spätestens im Jahr 2015 eingehalten werden müssen. Nachdem in Österreich der Grenzwert für NO₂ in einigen Untersuchungsgebieten nach wie vor überschritten wird, leitete die EU-Kommission im Jahr 2018 ein Vertragsverletzungsverfahren ein. (Spangl/Nagl 2020: 16) In Folge mussten der Bund und die Länder im Zuge der Erarbeitung des Maßnahmenprogramms nach dem Klimaschutzgesetz zusätzliche Maßnahmen für die Jahre 2019 und 2020 erarbeiten. Ein Beispiel für eine solche mögliche Maßnahme wäre die zeitliche und räumliche Beschränkung des Verkehrs – entweder durch das Nachtfahrverbot für den Schwerverkehr, Fahrverbote für Fahrzeuge bestimmter Fahrzeugklassen oder auch Geschwindigkeitsbeschränkungen (BMK 2021b: online).

EU-Richtlinien sind, im Gegensatz zu EU-Verordnungen, nicht unmittelbar wirksam und haben keinen verbindlichen Rechtscharakter. Sie müssen mittels nationaler Rechtsakte umgesetzt werden. Jeder Mitgliedsstaat hat bei der Umsetzung der Richtlinie einen gewissen Spielraum. Der Umsetzungszeitraum ist zumeist in der Richtlinie selbst definiert und gilt ab dem Stichtag für alle, die vom Umsetzungsakt (z.B. ein Gesetz) betroffen sind. (Europäische Kommission 2021c: online) Die Umsetzung der beiden Luftqualitätsrichtlinien in nationales Recht erfolgt in Österreich über das **Immissionsschutzgesetz-Luft**¹⁹ (IG-L) (Spangl/Nagl 2020: 15).

¹⁸ engl.: EU Ambient Air Quality (AAQ) Directives.

¹⁹ Bundesgesetz zum Schutz vor Immissionen durch Luftschadstoffe (Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L), BGBl. I 1997/115 idgF.

Das **IG-L** ist das zentrale Gesetz zum Schutz der Atemluft und wurde nach mehrjährigen Verhandlungen zwischen allen Interessensgruppen im Jahr 1997 beschlossen. Das IG-L hat zum Ziel die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor Luftschadstoffen zu schützen, die Immissionen von Luftschadstoffen zu verringern sowie eine gute Luftqualität zu bewahren bzw. eine Verbesserung zu erreichen. Aufbauend auf diesem Gesetz wird österreichweit ein Messnetz für Luftschadstoffe mit einheitlichem Messkonzept betrieben und Überschreitungen von Grenz- oder Zielwerten ausgewiesen. Eine Maßnahme zur Einhaltung der Grenz- und Zielwerte ist der sogenannte „Luft-Hunderter“. Dabei werden von den jeweiligen Landeshauptleuten variable Geschwindigkeitsbeschränkungen (100 km/h) auf Teilabschnitten von Autobahnen und Schnellstraßen eingeführt. Derzeit gibt es Geschwindigkeitsbeschränkungen dieser Art in den Bundesländern Tirol, Salzburg, Steiermark, Oberösterreich und Kärnten. Die Geschwindigkeitsbeschränkung wird automatisch aktiv und hängt von den derzeit gemessenen Schadstoffbelastungen und diversen Parametern (z.B. Verkehrslage, Wetterprognose, ...) ab (Schögl 2021: online). Im IG-L werden bundeseinheitliche Immissionsgrenzwerte für die Luftschadstoffe CO, NO_x, SO₂, Blei, Benzol, Schwebstaub sowie Feinstaub und Benzo(a)pyren festgeschrieben (BMK 2021b: online; Spangl/Nagl 2020: 16).

2.2.7 National Emissions Ceiling Directive

Die National Emissions Ceiling Directive²⁰, in kurz NEC-Richtlinie, legt neue nationale Emissionsreduktionsverpflichtungen der Mitgliedstaaten für die fünf wichtigsten Luftschadstoffe²¹ fest, die ab 2020 und 2030 gelten. Die NEC-Richtlinie thematisiert die grenzüberschreitenden Umweltprobleme Versauerung und bodennahes Ozon sowie das Gesundheitsziel der EU, die Zahl der vorzeitigen Todesfälle durch Luftschadstoffe bis zum Jahr 2030 zu halbieren (BMK 2021c: online).

Die individuellen Emissionsreduktionsverpflichtungen werden als Prozentsatz gegenüber den Emissionen des Basisjahrs 2005 festgelegt und auf Basis des auf österreichischem Staatsgebiet verbrauchten Kraftstoffs berechnet. Die vorgegebenen Werte für Österreich werden in der Tabelle 2 dargestellt. (BMNT 2019a: 10f)

²⁰ Richtlinie (EU) 2016/2284. Der Überarbeitungsvorschlag war Teil des EU Clean Air Policy Packages.

²¹ Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen außer Methan (NMVOC), Ammoniak (NH₃) und Feinstaub (PM_{2,5}).

Tabelle 2: Emissionsreduktionsverpflichtungen gemäß NEC-Richtlinie für Österreich

Luftschadstoff	Reduktion gegenüber dem Referenzjahr 2005 ab 2020	Reduktion gegenüber dem Referenzjahr 2005 ab 2030
Schwefeldioxid (SO ₂)	26 %	41 %
Stickstoffoxide (NO _x)	37 %	69 %
Flüchtige organische Verbindungen außer Methan (NMVOC)	21 %	36 %
Ammoniak (NH ₃)	1 %	12 %
Feinstaub (PM _{2,5})	20 %	46 %

Quelle: BMNT 2019a: 11

Die Bestimmungen der NEC-Richtlinie hinsichtlich der Reduktion der nationalen Emissionen der zuvor genannten Luftschadstoffe werden in Österreich mit dem **Emissionsgesetz-Luft**²² (EG-L) in nationales Recht umgesetzt (BMK 2021c: online). Mit der Überarbeitung der NEC-Richtlinie wurde auch das EG-L im Jahr 2018 neuerlassen. Ziel dieses Gesetzes ist „die Reduktion der atmosphärischen Emissionen von bestimmten Luftschadstoffen durch Festlegung nationaler Emissionsreduktionsverpflichtungen zum dauerhaften Schutz der Gesundheit des Menschen und der Umwelt“ (§1 Absatz 1 EG-L, BGBl. I 2018/75 idgF.).

Welche Maßnahmen Österreich zur Erfüllung der Emissionsreduktionsverpflichtungen setzen möchte, wird im **nationalen Luftreinhalteprogramm** (BMNT 2019a) festgehalten. Dieses Programm stellt die geplanten Maßnahmen detailliert dar und wird dann an die Europäische Kommission übermittelt. Es soll als Ausgangspunkt für die weitere Vorgehensweise und Umsetzung zusätzlicher Maßnahmen auf der Bundes-, Länder- und Gemeindeebene dienen. In der NEC-Richtlinie wird außerdem definiert, dass mithilfe der **österreichischen Luftschadstoff-Inventur** (OLI) der bisher erzielte Fortschritt bei der Emissionsminderung beurteilt und die Einhaltung der künftigen Ziele anhand einer Emissionsprognoserechnung dargestellt werden muss. Zusätzlich müssen die Mitgliedstaaten Emissionsinventuren (jährlich) und Emissionsprojektionen (alle zwei Jahre) nach einheitlichen Leitlinien, auf die in der NEC-Richtlinie verwiesen wird, erstellen (BMNT 2019a: 6; 11).

²² Bundesgesetz über nationale Emissionsreduktionsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe (Emissionsgesetz-Luft 2018 –EG-L 2018), BGBl. I 201/75 idgF.

2.3 Weitere nationale Gesetze und Programme zum Schutz des Klimas und der Atemluft

Auf nationaler Ebene werden nicht nur die Richtlinien und Vorgaben der EU umgesetzt, sondern auch zusätzliche Gesetze und Programme zum Schutz des Klimas und der Umwelt verabschiedet. Im derzeit aktuellen Regierungsprogramm²³ (2020-2024) wird das Ziel eines klimaneutralen Österreichs bis spätestens 2040 deklariert. Klimaneutralität bedeutet, ein Gleichgewicht zwischen den weltweiten Kohlenstoffemissionen und der Bindung von Kohlenstoff herzustellen. Die Erreichung der Klimaneutralität ist notwendig, um die Ziele des Übereinkommens von Paris erreichen zu können. Obwohl das derzeitige Regierungsprogramm keine expliziten Maßnahmen zur Reduktion von Stickoxiden (NO_x) festlegt, geht mit der Umsetzung der CO₂-Reduktionsmaßnahmen des Mobilitätsmasterplans automatisch eine Reduktion der NO_x-Emissionen einher.

2.3.1 Klimaschutzgesetz

Das österreichische Klimaschutzgesetz²⁴ wurde im Jahr 2011 beschlossen und zuletzt 2017 geändert. Es bildet den nationalen rechtlichen Rahmen für die Einhaltung der Emissionshöchstmengen durch definierte Maßnahmen. Die Emissionshöchstmengen wurden mit einer Novelle des Gesetzes für die Periode 2013-2020 ergänzt. Österreich verpflichtet sich mit dem Klimaschutzgesetz das Ziel von -16 % gegenüber 2005 für alle Sektoren außerhalb des Emissionshandels zu erreichen. Dies entspricht außerdem auch den Vorgaben nach der EU Effort-Sharing Decision²⁵.

Die Maßnahmen beziehen sich auf folgende sechs Sektoren (BMK 2021a: online, Anderl et al. 2019: 42f):

- Energie und Industrie (außerhalb des EU-Emissionshandels)
- Verkehr
- Gebäude
- Landwirtschaft
- Abfallwirtschaft
- Fluorierte Gase

²³ Bundeskanzleramt Österreich, 2020: Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024. Wien: Bundeskanzleramt Österreich.

²⁴ Bundesgesetz zur Einhaltung von Höchstmengen von Treibhausgasemissionen und zur Erarbeitung von wirksamen Maßnahmen zum Klimaschutz (Klimaschutzgesetz - KSG), BGBl. I 2011/106 idgF.

²⁵ Entscheidung 406/2009/EG

Bei der Effort-Sharing Decision²⁶ handelt es sich um einen Beschluss der Europäischen Union, der die Mitgliedstaaten verpflichtet ihre Treibhausgas-Emissionen in Wirtschaftszweigen, die nicht dem EU-Emissionshandel unterliegen bis zu den Stichjahren 2020 und 2030 um 10 % bzw. 30 % (im Vergleich zu 2005) zu reduzieren. Dadurch sollen auch diese Branchen einen Beitrag zur Einhaltung der Klimaschutzziele leisten. (Europäische Kommission 2021d: online)

2.3.2 Mission 2030

Um die ambitionierten Ziele der EU zu erreichen, hat die österreichische Bundesregierung im Mai 2018 eine Klima- und Energiestrategie „#mission2030“ (BMNT 2018) ins Leben gerufen. Die Strategie bildet sowohl die Grundlage für den nationalen Energie- und Klimaplan (NEKP) Österreichs als auch den mittel- bis langfristigen Rahmen für die Transformation des Energiesystems im Sinne der Ziele des Übereinkommens von Paris. (BMNT 2019a: 70f, BMNT 2019b: 19)

In der Strategie „#mission2030“ werden die Ziele für Österreich sowie die dazugehörigen Maßnahmen zur Erreichung der Ziele festgehalten. Zwölf Leuchtturmprojekte in den Bereichen Mobilität, Gebäude und Wärme, Energiewirtschaft, Forschung und Innovation, Bioökonomie und „Green Finance“ sowie im Bereich Kommunikation und Bildung dienen als erste wesentliche Schritte zur Umsetzung der Klima- und Energiestrategie.

2.3.3 Nationaler Energie- und Klimaplan

Mit der Verordnung (EU) 2018/1999 wurden konkrete Vorgaben für die Maßnahmenplanung zu den Klima- und Energiezielen bis 2030 und Fristen für die entsprechende Berichterstattung eingeführt. Darin wurde festgelegt, dass die Mitgliedstaaten nationale Energie- und Klimapläne erstellen müssen, in denen sie die Maßnahmen zur Erreichung der Ziele darstellen. (BMNT 2019a: 71) Der Nationale Energie- und Klimaplan Österreich listet eine Reihe von Maßnahmen auf, die zur Erreichung der Energie und Klimaziele beitragen sollen (BMNT 2019b).

²⁶ Die Effort-Sharing Decision gehört zu einer Reihe von Strategien und Maßnahmen im Bereich Klimawandel und Energie. Sie legt verbindliche Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen für die Mitgliedstaaten fest. Auf diesen Weg sollen die gesamten EU-Emissionen aus den abgedeckten Sektoren bis 2020 um etwa 10% und bis 2030 um 30% gegenüber dem Stand von 2005 reduziert werden. (Europäische Kommission o.J.: online)

2.4 Österreichische Luftschadstoff-Inventur

Die Österreichische Luftschadstoff-Inventur (OLI) ist die Grundlage für die Erfüllung der nationalen sowie internationalen Berichtspflichten, die durch die soeben vorgestellten Abkommen, Gesetze und Programme anfallen und wird jährlich durch das Umweltbundesamt durchgeführt. Der Endbericht beinhaltet eine Zusammenfassung der jährlichen SO_2 , NO_x , NH_3 , NMVOC und $\text{PM}_{2,5}$ -Emissionsdaten (Anderl et al. 2020a: 5). Die Daten werden jährlich erhoben und dienen als Grundlage für die offiziellen Berichte an die Europäische Union und für die Entwicklung von Maßnahmen in Österreich und Europa (UBA 2020: 3).

Bei großen Einzelquellen (kalorische Kraftwerke, Industriebetriebe etc.) werden die Emissionen ganzjährig kontinuierlich gemessen. Die Messung unzähliger kleiner Einzelquellen (Verkehr, Haushalte, Landwirtschaft etc.) wäre mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Aus diesem Grund wird auf verallgemeinerte Ergebnisse von Einzelmessungen (Emissionsfaktoren) zurückgegriffen. (Spangl/Nagl 2020: 16, Anderl et al. 2020c: 11) Die Emissionsfaktoren stammen aus dem „Handbuch für Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“ (HBEFA), einem Kooperationsprojekt zwischen den Umweltbundesämtern Österreichs, der Schweiz und Deutschlands. Das HBEFA beinhaltet Emissionsdaten für alle reglementierten²⁷ sowie eine Reihe von nicht-reglementierten Schadstoffen²⁸ inklusive CO_2 und Kraftstoffverbrauch für die gängigen Fahrzeugtypen PKW, leichte Nutzfahrzeuge, schwere Nutzfahrzeuge, Linien- und Reisebusse sowie Motorräder. Die Fahrzeugtypen werden innerhalb ihrer Kategorie weiter differenziert nach (Umweltbundesamt (D) 2017: 1):

- Fahrzeuggröße (bei PKW differenziert nach Hubraum und bei LKW nach Klassen basierend auf dem zulässigen Gesamtgewicht),
- Antriebsart (Benzin, Diesel, Compressed Natural Gas, Liquefied Petroleum Gas, ...),
- Emissionskonzepten (EURO 0 bis EURO 6/VI) sowie
- weitgehenden Emissionsminderungstechnologien

Je nach Kombination all dieser Kriterien können die Fahrzeugtypen in Fahrzeug-Subsegmente zusammengefasst werden. Fahrzeuge die demselben Subsegment angehören, haben das gleiche Emissionsverhalten und somit ist der entsprechende Emissionsfaktor repräsentativ für diese Fahrzeuge. Zusätzlich zu den Fahrzeugsubsegmenten können die Emissionsfaktoren auch noch nach Verkehrssituation unterschieden werden. Somit gibt es im HBEFA 276 unterschiedliche Verkehrssituationen, die mit allen Fahrzeug Subsegmenten kombiniert werden können. Eine weitere

²⁷ Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO_x). Partikelmasse (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$).

²⁸ Stickstoffdioxid (NO_2), Distickstoffoxid (N_2O), Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMHC), Benzol, Schwefeldioxid (SO_2), Blei (Pb) und die Partikelanzahl.

Spezifikation des HBEFAs ist, dass sowohl Emissionsfaktoren für den betriebswarmen Motor (warme Emissionsfaktoren) als auch Emissionsfaktoren für Kaltstarts enthalten sind. (Umweltbundesamt (D) 2017: 2)

Je nach Anwendungsland sind unterschiedliche Tagesgänge für die Umgebungstemperatur hinterlegt, welche wiederum mit der Fahrleistung bzw. der Verteilung der Fahrtweiten oder Standzeiten gewichtet werden. (Umweltbundesamt (D) 2017: 1)

Um den internationalen Verpflichtungen zur Klima- und Emissionsberichterstattung nachzukommen, entwickelten die europäischen Staaten spezielle Verkehrsemissionsmodelle, die die Emissionsfaktoren mit den dazugehörigen Verkehrsmengen (KFZ-Anzahl, durchschnittliche Fahrleistungen pro Jahr und KFZ) verknüpfen. Mithilfe der Emissionsmodelle ist es möglich sowohl die historischen Emissionen zu ermitteln, als auch die zukünftige Wirkung von Maßnahmen zu modellieren. (Umweltbundesamt (D) 2017: 2f) Mithilfe statistischer Hilfsgrößen werden die Emissionsfaktoren auf jährliche Emissionen hochgerechnet. Zum überwiegenden Teil handelt es sich bei den statistischen Hilfsgrößen um den Energieverbrauch, der in der Energiebilanz als energetischer Endverbrauch bezeichnet wird (z.B. Benzinverbrauch). (Anderl et al. 2020c: 11)

Es muss jedoch beachtet werden, dass bei der Luftschadstoffinventur nur anthropogene Quellen herangezogen werden, während natürliche Quellen sowie sekundäre Schadstoffe keine Erwähnung finden (Spangl/Nagl 2020: 15f). Des Weiteren muss beachtet werden, dass die jährlichen Emissionen auf Basis des in Österreich verbrauchten Kraftstoffs berechnet werden. Das bedeutet, dass bei den Berechnungen für die OLI der „Tanktourismus“ – also der Verkauf von Kraftstoff in Österreich, welcher dann im Fahrzeugtank über die Grenze exportiert und im Ausland verfahren wird – nicht berücksichtigt wird. (Österreichische Bundesregierung o.J.: 2, Anderl et al. 2020a: 6)

Österreich nutzt für die Zuordnung der Emissionen auf verschiedene Transportmittel des Straßenverkehrs das Emissionsmodell NEMO (Network Emission Model). Das Emissionsmodell NEMO wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU-Graz entwickelt, um die Emissionen auf Straßennetzwerken entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft durchführen zu können und eine flexible und effiziente Abbildung verschiedener Verkehrsszenarien zu ermöglichen. Das Modell „verfügt über eine detaillierte Kalkulation der Flottenzusammensetzung sowie der Emissionsfaktoren“ (Dippold 2016: 6f). NEMO erlaubt die Bewertung von unterschiedlichen Szenarien in einem sehr großen Betrachtungsgebiet und ist somit gut für Länderinventuren geeignet. Die OLI stellt in Österreich die wichtigste Studie zur Modellierung von Emissionen dar und ist demnach auch für die Abschätzung der NO_x-Emissionen in Österreich

besonders relevant. Als Input für das in der OLI angewendete Modell (NEMO) werden folgende Daten herangezogen:

- Fahrzeugbestand der jeweiligen Fahrzeugkategorie
- Emissionsfaktoren der Fahrzeugkategorien (entnommen aus der aktuellen Fassung des HBEFA)
- Jährliche Wachstumsraten der Fahrleistung von PKW und schweren Nutzfahrzeugen auf Autobahnen sowie Bundesstraßen
- Anzahl der Passagiere bzw. transportierten Tonnen je Fahrzeug
- Entweder/Oder
 - Durchschnittlich gefahrene km je Fahrzeug und Jahr (Bottom-Up)
 - Gesamter Treibstoffverbrauch je Betrachtungsebene (Top-down)

(Anderl et al. 2020b: 264)

Im Zuge der OLI-Modellierung mussten die Emissionsfaktoren an die österreichische Situation angepasst werden. Dazu verwendet die OLI zwei Ansätze: Bottom-Up und Top-Down. Bei dem Bottom-Up Ansatz werden der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen der Fahrzeugkategorien mithilfe der Daten zu den gefahrenen Fahrzeugkilometern je Fahrzeugkategorie, dem spezifischen Treibstoffverbrauch sowie den Emissionsfaktoren ermittelt (Anderl et al. 2020b: 262).

Bei dem Top-Down Ansatz wird vom gesamten, in Österreich verkauften, Kraftstoff ausgegangen. Diese Daten werden der Österreichischen Energiebilanz entnommen. Das bedeutet jedoch auch, dass bei diesem Ansatz auch der sogenannte „Tanktourismus“ mit einberechnet wird. Bereits seit Ende der 90er Jahre ist bekannt, dass es eine immer größer werdende Diskrepanz (ca. 30 %) zwischen dem in Österreich verkauften und dem verbrauchten Kraftstoff gibt. Dies wird zum großen Teil auf die relativ (im Vergleich zu den Nachbarländern) niedrigen Kraftstoffpreise in Österreich zurückgeführt. Der Kraftstoff wird in Österreich getankt, aber dann in einem anderen Land verbraucht. (Anderl et al. 2020b: 262f; Anderl et al. 2020c: 11)

Ein Nachteil, der bei der Verwendung dieses Emissionsmodells entsteht ist, dass nur durchschnittliche Verkehrssituationen berechnet werden können (Dippold 2016: 7). Es können also individuelle Faktoren mit Einfluss auf den fahrzeugspezifischen Kraftstoffverbrauch, wie die Änderungen des Fahrverhaltens (z.B. eine verbrauchsgünstigere Gangwahl) nicht abgebildet werden. Allerdings können bei dem Modell NEMO unterschiedliche Fahrzeugklassen (z.B. Masse, Beladung, ...) angegeben und berücksichtigt werden.

3 Definition von Richt- und Grenzwerten für Luftschadstoffe

Die Festlegung von Richt- und Grenzwerten ist nicht nur im Bereich der Luftreinhaltung üblich. In vielen Bereichen wie z.B. in Bezug auf Trinkwasser wurden strenge Regeln in Kraft gesetzt, die dafür sorgen, dass die Menschen vor den gesundheitlichen Risiken aus der Umwelt geschützt werden. Die Richtwerte für die Luftschadstoffe dienen insbesondere zum Schutz von Kindern, Älteren und Personen mit bestehenden Vorerkrankungen. Die WHO gibt in ihren Luftqualitätsrichtlinien Richtwerte für die Konzentration von Luftschadstoffen vor, die dazu dienen die Außenluft hinsichtlich ihrer Qualität zu beurteilen und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität zu setzen. Diese Richtwerte sind Empfehlungen, welche jedoch die wissenschaftliche Grundlage für verbindliche Grenzwerte sein können. (Umweltbundesamt (D) 2019: online)

3.1 Zielsetzungen für die Luftschadstoffe in Österreich

Bei der Festlegung von Grenzwerten werden neben den gesundheitlichen Argumenten auch weitere Aspekte (z.B. Wirtschaftlichkeit) und die technische Machbarkeit berücksichtigt. Aus diesem Grund sind die EU-Grenzwerte oftmals weniger streng als die vorgegebenen Richtwerte der WHO. (Umweltbundesamt (D) 2019: online)

Im **Immissionsschutzgesetz-Luft²⁹** (IG-L) werden zum Schutz der menschlichen Gesundheit sowie der Vegetation Grenz-, Ziel- und Alarmwerte für die jeweiligen Luftschadstoffe definiert. **Grenzwerte** nach Definition des IG-L (§2 Absatz 4 IG-L, BGBl. I 1997/115 idgF.) sind „höchstzulässige, wirkungsbezogene Immissionsgrenzkonzentrationen, bei deren Unterschreitung nach den einschlägigen wissenschaftlichen Erkenntnissen keine schädigenden Wirkungen zu erwarten sind.“ Es werden Grenzwerte für die Schadstoffe Schwefeldioxid (SO₂), Partikelmasse (PM₁₀ und PM_{2,5}), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO₂), Benzol und Blei festgelegt. Für die Schadstoffe PM_{2,5} und NO₂ werden außerdem **Zielwerte** zum Schutz der menschlichen Gesundheit festgesetzt. Ein Zielwert ist, laut Definition des IG-L (§2 Absatz 14 IG-L, BGBl. I 1997/115 idgF.), die „in einem bestimmten Zeitraum zu erreichende Immissionskonzentration, die mit dem Ziel festgelegt wird, die schädlichen Einflüsse auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt insgesamt zu vermeiden, zu verhindern oder zu verringern“.

Als Zielwert der Konzentration von NO₂ gilt der Wert von 80 µg/m³ Tagesmittelwert. Zuletzt werden für die Schadstoffe SO₂ und NO₂ **Alarmwerte** (500 µg/m³ und 400 µg/m³ gleitender Dreistunden-

²⁹ Bundesgesetz zum Schutz vor Immissionen durch Luftschadstoffe (Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L), BGBl. I 1997/115 idgF.

mittelwert) definiert (Spangl/Nagl 2020: 106). Bei den Alarmwerten wird bereits bei kurzfristiger Exposition ein Risiko für die Gesundheit der Bevölkerung befürchtet und es müssen unverzüglich Maßnahmen ergriffen werden. Wenn ein Grenz-, Ziel- oder Alarmwert überschritten wird, müssen die jeweiligen Landeshauptleute eine Stuserhebung durchführen, in welcher die Immissionsituation und die meteorologischen Gegebenheiten genau dargestellt und vermeintlichen Ursachen und Emissionsquellen der Überschreitung angeführt werden müssen. Vermeintliche Ursachen für eine Überschreitung des Immissionsgrenzwerts könnten z.B. „ein Störfall, eine andere in absehbarer Zeit nicht wiederkehrende erhöhte Immission, die Aufwirbelung von Partikel [...] oder Emissionen aus natürlichen Quellen“ sein. (§7 Absatz 1 IG-L, BGBl. I 1997/115 idgF.)

Grundsätzlich haben die jeweiligen Landeshauptleute nach Durchführung einer Stuserhebung ein Programm zu erstellen, in dem Maßnahmen zur Senkung der Emissionen in dem jeweiligen Sanierungsgebiet, in welchem die vermeintlichen Ursachen und Emissionsquellen liegen, definiert werden. Sanierungsgebiete sind Gebiete, in denen sich Emissionsquellen befinden, die einen erheblichen Beitrag zur Immissionsgrenzwertüberschreitung leisten und können von den Bundesländern festgelegt werden. (IWO 2017: online) Durch das Setzen spezifischer Maßnahmen sollen die Emissionen, die zur Überschreitung des Grenz- oder Zielwertes geführt haben, reduziert werden. Mögliche Beispiele für solche Maßnahmen können z.B. „das Gebot des Einsatzes emissionsarmer Brennstoffe, Beschränkungen bzw. Verbote des Einsatzes von Maschinen mit hohen spezifischen Emissionen, Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie zeitliche und räumliche Beschränkungen des Verkehrs sein“ (BMK 2021b: online). In der folgenden Tabelle 3 werden die Grenz- und Zielwerte gemäß IG-L zum Schutz der menschlichen Gesundheit sowie der Ökosysteme und der Vegetation dargestellt.

Tabelle 3: Luftschadstoffgrenzwerte aus Leitlinien und Rechtdokumenten im Vergleich

Schadstoff	WHO 2021	EU-RL 2008/50/EG	IG-L
PM₁₀			
Tagesmittelwert	45 µg/m ³	50 µg/m ³	50 µg/m ³
Jahresmittelwert	15 µg/m ³	40 µg/m ³	40 µg/m ³
PM_{2,5}			
Tagesmittelwert	15 µg/m ³	---	---
Jahresmittelwert	5 µg/m ³	25 µg/m ³	25 µg/m ³
Ozon			
täglicher maximaler 8h-Mittelwert	100 µg/m ³	120 µg/m ³	120 µg/m ³
SO₂			
Tagesmittelwert	40 µg/m ³	125 µg/m ³	120 µg/m ³
NO₂			
Jahresmittelwert	10 µg/m ³	40 µg/m ³	30 µg/m ³ *
Tagesmittelwert	25 µg/m ³	---	80 µg/m ³

Quelle: Spangl/Nagl 2019: 9, 106-111; UBA 2021b: online

*35 µg/m³ inkl. Toleranzmarge

In Österreich wurden 2019 insgesamt 144 NO_x-Messstellen betrieben und ihre Ergebnisse im „Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich“ zusammengefasst (Spangl/Nagl 2020: 18). Im Jahr 2019 wurde der Grenzwert (30 µg/m³) für den Jahresmittelwert an 19 Messstellen überschritten. Selbst unter Berücksichtigung einer zusätzlichen Toleranzmarge von 5 µg/m³ (hierdurch ergibt sich ein neuer Grenzwert von 35 µg/m³) wurden für den Jahresmittelwert immer noch Überschreitungen an 10 Messstellen gemessen.

Zusätzlich zu der Definition von Grenz-, Ziel- und Alarmwerten wurden in der **Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen**³⁰ (NEC-Richtlinie) Emissionshöchstmengen für Österreich festgelegt. Das bedeutet, dass nicht nur die Grenz-, Ziel- und Alarmwerte, sondern auch eine jährliche Emissionshöchstmenge von 103 kt NO_x, nicht überschritten werden darf. Die jährliche Emissionshöchstmenge wurde im Jahr 2010 festgelegt und wird auf Basis des verbrauchten Kraftstoffs ermittelt (ohne Kraftstoffexport). Die NEC-Richtlinie sieht für Österreich eine NO_x-Reduktion ab 2020 um 37 % vom Referenzjahr 2005, in dem 200,4 kt NO_x ausgestoßen wurden (Strasser 2021: 21) und ab 2030 um 69 % vor (Anderl et al. 2020c: 26).

Um das Ziel von 103 kt/Jahr an NO_x-Emissionen zu erreichen, nimmt Österreich die Flexibilitätsregelungen gemäß NEC-Richtlinie in Anspruch. Damit die Flexibilitätsregelung angewendet werden kann, musste Österreich in den Jahren 2017 und 2018 Vorschläge zur Anpassung spezifischer Inventurdaten für die NO_x-Zielerreichung bei der Europäischen Kommission einreichen. Der Grund dafür war einerseits die mangelnde Wirksamkeit der auf EU-Ebene erlassenen KFZ-Abgasvorschriften und andererseits die Problematik, „dass bestimmte Emissionsquellen im Landwirtschaftssektor bei der Festlegung der Zielwerte nicht berücksichtigt wurden“ (Anderl et al. 2020a: 8). Die Europäische Kommission bewilligte die eingereichten Anpassungsvorschläge und im Zuge des EU NEC-Reviews werden die aktualisierten Anpassungswerte jährlich geprüft und genehmigt. In Anbetracht der bewilligten Anpassungen wird die NO_x-Emissionshöchstmenge seit 2014 nicht mehr überschritten. (Anderl et al. 2020a: 8, 11)

³⁰ Richtlinie (EU) 2016/2284

3.2 Aktuelles Niveau der Stickoxidemissionen in Österreich

Die aktuellen Messwerte liegen für das Jahr 2019 vor. Damals wurden 130,7 kt NO_x ohne Berücksichtigung des Kraftstoffexports (13,5 kt) ausgestoßen (Anderl et al. 2021a: 31; 2021b: 7). Durch die Anwendung der Flexibilitätsregelung (gemäß Artikel 5(1) der NEC-Richtlinie³¹) können die Werte angepasst werden auf 90,27 kt NO_x (Anderl et al. 2021b: 13). Seit 2005 haben sich die jährlichen NO_x-Emissionen um 31,34 % verringert. In Abbildung 1 wird die Entwicklung der gesamten jährlichen NO_x-Emissionen von 2000 bis 2019 dargestellt. Dabei werden die gemessenen NO_x-Emissionen und die nach Anwendung der Flexibilitätsregelung angepassten NO_x-Emissionen dargestellt. Zusätzlich wurde eine „Baseline“ für die zulässige Emissionshöchstmenge (103 kt) laut NEC-Richtlinie gelegt.

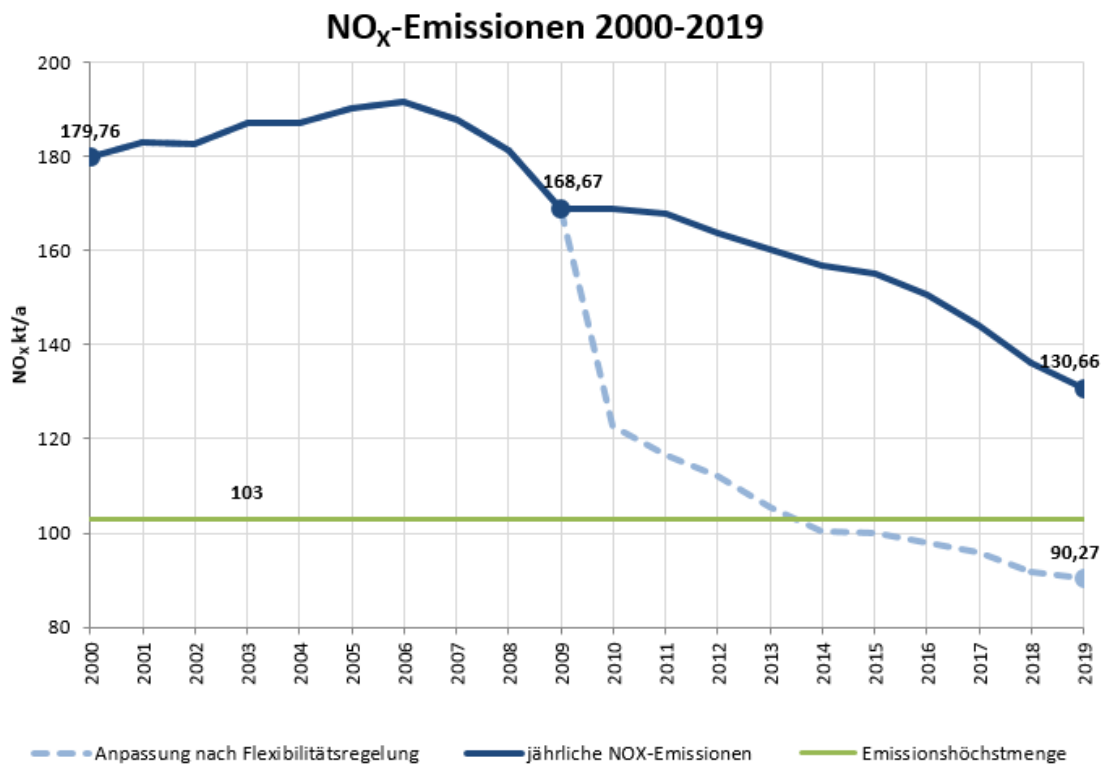


Abbildung 1: Entwicklung der jährlichen NO_x-Emissionen 2000-2019 in Österreich (Anderl et al. 2021b: 7; 13)

Insgesamt gibt es sechs Verursachersektoren für die Entstehung von Emissionen: Energieversorgung, Industrieproduktion, Verkehr, Kleinverbrauch, Landwirtschaft und Sonstige (beinhaltet Abfallwirtschaft und Lösemittelanwendungen). Der Verkehrssektor umfasst die Emissionen aus dem Straßen-, Eisenbahn-, Schiffs- und Flugverkehr sowie die Fahr- und Flugzeuge des Österreichischen Bundesheeres und ist mit einem Anteil von rund 55 % hauptverantwortlich für die generell hohen

³¹ Richtlinie (EU) 2016/2284

NO_x-Emissionen. Der Großteil dieser Emissionen ist dem Straßenverkehr zuzuschreiben – bis zu 68 % stammen vom PKW-Verkehr und bis zu 31 % werden durch den Einsatz schwerer und leichter Nutzfahrzeuge verursacht. (Anderl et al. 2020c: 14, 28; 2021a: 32; 90)

Die NO_x-Emissionen aus dem Verkehrssektor können zum einen auf den hohen Anteil an Diesel-PKW und eine steigende Fahrleistung zurückgeführt werden. Zum anderen trägt auch die Tatsache, dass die gesetzlich zugelassenen Emissionsgrenzwerte laut Typenprüfzyklus deutlich niedriger sind, als sie im Realbetrieb ausgestoßen werden, dazu bei. Erst mit der Einführung der Abgasnorm EURO 6d_{temp} (09/2017) und 6d (09/2019) ist eine Verbesserung der NO_x-Emissionen bei Diesel-PKW in Richtung der verpflichtenden NO_x-Grenzwerte erkennbar, da der Typenprüfzyklus um eine reale Straßenfahrt mit einem portablen Emissionsmessgerät (PEMS) erweitert wurde. Die Messungen zeigten, dass der Grenzwert nun auch im Realbetrieb erreicht bzw. unterschritten wurde. (Anderl et al. 2020c: 74)

Der kontinuierliche Rückgang der NO_x-Emissionen seit 2005 kann vor allem auf die Fortschritte in der Automobiltechnologie, insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen, zurückgeführt werden. Die Verbesserung der Abgasnachbehandlungsanlagen, die vermehrte Flottendurchdringung von Neufahrzeugen sowie funktionierende NO_x-Abgasnachbehandlungsanlagen lieferten einen erheblichen Beitrag, um die spezifischen NO_x-Emissionen pro Fahrzeugkilometer – v.a. bei Benzin-PKW sowie Sattel- und Lastzügen – zu senken. Auch das Inkrafttreten der Abgasnorm EURO IV (2004) und EURO V (2008/2009) für die leichten und schweren Nutzfahrzeuge trug zu der Reduktion der NO_x-Emissionen bei (siehe Kapitel 3.3). Den Berichten des Umweltbundesamtes zufolge wurden im Jahr 2019 nur 31 % der gesamten NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs (inkl. Kraftstoffexport) durch den LKW-Verkehr verursacht (Anderl et al. 2021a: 93).

Zusätzlich zu den Gesamtemissionen pro Jahr werden im „Jahresbericht zur Luftgütemessung“ des Umweltbundesamtes die Grenz- und Zielwertüberschreitungen ausgewiesen. Im Jahr 2019 wurde der im Immissionsschutzgesetz³² (IG-L) festgelegte Jahresmittelwert von 30 µg/m³ für NO₂ an 19 Messstellen überschritten. Besonders betroffen von den Grenzwertüberschreitungen gemäß IG-L sind die Gebiete entlang von Autobahnen und verkehrsbelasteten Straßen im Stadtgebiet. Das Umweltbundesamt nennt die Städte Wien, Linz, Salzburg, Graz, Innsbruck sowie Hallein, Lienz und Feldkirch als besonders stark belastet. Der Zielwert für NO₂ (80 µg/m³ Tagesmittelwert) wurde insgesamt an 15 Messstellen überschritten. (Spangl/Nagl 2020: 7f)

³² Bundesgesetz zum Schutz vor Immissionen durch Luftschadstoffe (Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L), BGBl. I 1997/115 idGF.

3.3 Entwicklung der EURO-Abgasnormen

Normen sind das Ergebnis nationaler, europäischer und internationaler Arbeitsausschüsse von Fachexpert:innen, bei welchen großer Wert auf eine ausgewogene Berücksichtigung aller Interessen sowie eine Konsensfindung gelegt wird. Daher werden Normungsarbeiten nach dem Bottom-up Prinzip geschrieben. Die Anwendung von Normen ist grundsätzlich freiwillig, wird jedoch häufig in Verträgen verlangt und wird mit dem Begriff „Stand der Technik“ verbunden. Sie unterscheiden sich von Gesetzen und sind nicht bindend. Dennoch tragen sie als eindeutige und anerkannte Regeln zur Rechtssicherheit bei. Erst durch einen Verweis in Verträgen und Gesetzen sowie Rechtsverordnungen (z.B. EU-Richtlinien) erlangen Normen eine Rechtsverbindlichkeit. (SNV 2021: online, Schmidt 2021: online)

Um eine Typzulassung innerhalb der EU zu erhalten, müssen Kraftfahrzeuge wie PKW, LKW und Busse die Verordnung (EU) 2018/858³³ erfüllen. Diese Verordnung ist der gemeinsame Rechtsrahmen für sämtliche Parameter und Grenzwerte aller Fahrzeuge, die in Europa zugelassen sind. Die Emissionsgrenzwerte werden in der dazugehörigen Verordnung 715/2007/EG³⁴ (und etwaiger Ergänzungen, wie unter anderem der Verordnung (EG) 595/2009 und der Verordnung (EU) 459/2012) festgelegt. Abhängig von ihrem Baujahr, fallen die Fahrzeuge unter eine sogenannte EURO-Abgasnorm und dürfen die darin festgesetzten Grenzwerte für die Luftschadstoffe (NO_x, CO, HC und Partikel) nicht überschreiten. (Pöhler/Adler 2017: 11, EU 2007: 12f)

Diese Einteilung dient unter anderem zur Berechnung der KFZ-Steuer und der Einteilung in Schadstoffgruppen für die Umweltzonen der Großstädte. Die EURO-Abgasnormen haben vor allem für LKW und Sattelkraftfahrzeuge eine besondere Bedeutung, da sich die Staffelung der Maut an der EURO-Klasse des Fahrzeuges orientiert. (WKO 2020: online)

Die Grenzwerte und Normen unterscheiden sich dabei sowohl nach Motortyp (Otto- oder Dieselmotor) als auch nach Kraftfahrzeugtyp: PKW, LKW und Omnibusse, Zweiräder und Mopeds. Abgesehen von den Grenzwerten unterscheidet sich auch die Bezeichnung der EURO-Klassen je nach Fahrzeugtyp. So werden die EURO-Klassen der PKW, Leicht- und Kleinkrafträder sowie Motorräder mit arabischen Ziffern und Buchstaben (EURO 1-6) durchnummeriert, während die EURO-Klassen der LKW mit römischen Ziffern (EURO I-VI) bezeichnet werden (WKO 2020: online). Im Zuge dieser Diplomarbeit sind vor allem die Emissionsgrenzen für schwere Nutzfahrzeuge ab 3,5 t von Interesse. Aus diesem Grund werden in weiterer Folge nur die Emissionsgrenzen der einzelnen

³³ Verordnung (EU) 2018/858

³⁴ Verordnung (EG) 715/2007

Schadstoffklassen für schwere Nutzfahrzeuge (und Busse) ab 3,5 t dargestellt. Ein Auszug der festgelegten Grenzwerte kann der nachfolgenden Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Grenzwerte nach EURO-Klasse für schwere Nutzfahrzeuge ab 3,5 t

EU-Richtlinien [g/kWh]	88/77/EWG ³⁵	91/542/EWG ³⁶		99/96/EG ³⁷			595/2009/EG ³⁸
	EURO 0	EURO I	EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V & EEV ³⁹	EURO VI
	1988/90	1992/93	1995/96	2000/01	2005/06	2008/09	2013/01
CO	11,2	4,9	4	2,1	1,5	1,5	1,5
HC	2,4	1,23	1,1	0,66	0,46	0,25	-
PM	-	0,4	0,15	0,10	0,02	0,02	0,01
NO _x	14,4	9,0	7,0	5,0	3,5	2	0,4

Quelle: Umweltbundesamt (D) 2021: online

Die aktuelle Schadstoffklasse EURO VI ist seit dem 31. Dezember 2012 (Typprüfung) bzw. ab dem 31. Dezember 2013 (Serienprüfung) gültig. Sie wurde im Amtsblatt der Europäischen Union unter der Verordnung (EG) 595/2009 veröffentlicht (Umweltbundesamt (D) 2021: online). Sie löst die vorangegangene Schadstoffklasse EURO V ab, da sie nicht die gewünschten Ergebnisse brachte. Die schweren Nutzfahrzeuge der Schadstoffklasse EURO V emittierten am Prüfstand weitaus weniger Stickoxide als im Realbetrieb. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass den Betreibern im Realbetrieb ein geringer Kraftstoffverbrauch wichtig ist, weshalb die Motorensteuerung von den Herstellern auf minimalen Verbrauch eingestellt wird. Dies führte besonders bei EURO IV- und V-Fahrzeugen im realen Fahrbetrieb zu einer geringeren Abnahme der NO_x als erwartet. (UBA 2019a: online)

Das langfristige Ziel auf EU-Ebene ist es, den Schadstoff-Ausstoß auf Null zu reduzieren. Aus diesem Grund wird derzeit an einer EURO 7/VII-Schadstoffklasse gearbeitet. Ersten Berichten zufolge, enthält der noch nicht finalisierte Entwurf der Abgasnorm deutliche Verschärfungen im Vergleich zur aktuellen EURO-Abgasnorm. Zum Beispiel soll auch in Extremsituationen (Vollgas-Fahrten, Anhängerbetrieb, Bergauf-Fahrten, extrem niedrigen Temperaturen, ...) bereits ab den ersten Metern eine nahezu komplette Schadstoffreduktion stattfinden (Vlehmann 2021: online). Die neue EURO-Norm befindet sich derzeit in Ausarbeitung und soll planmäßig im Jahr 2025 in Kraft treten (ADAC 2022: online).

³⁵ Richtlinie 88/77/EWG

³⁶ Richtlinie 91/542/EWG

³⁷ Richtlinie 1999/96/EG

³⁸ Verordnung (EG) 595/2009

³⁹ Enhanced Environmentally Friendly Vehicle

3.4 Planerisch administrative Ansatzpunkte zur Reduktion von Stickoxidemissionen

Für die Reduktion von NO_x-Emissionen gibt es eine Vielzahl an möglichen Ansatzpunkten. Dabei kann zwischen infrastrukturellen, institutionellen und KFZ-technischen Maßnahmen unterschieden werden. Dies inkludiert natürlich auch all jene Maßnahmen, die das Verkehrsaufkommen generell sowie den Energiebedarf (v.a. aber den fossilen Kraftstoffverbrauch) im Verkehr reduzieren. Die Maßnahmen können sowohl einen direkten als auch einen indirekten Einfluss auf die NO_x-Emissionen haben. Die folgende Tabelle 5 soll einen Überblick über mögliche Maßnahmen geben. Es ist zu beachten, dass es sich dabei nicht um eine vollumfängliche Auflistung handelt, sondern um eine exemplarische Sammlung möglicher Wege, um die NO_x-Emissionen zu reduzieren.

Tabelle 5: Maßnahmen zur Reduktion von Luftschadstoffemissionen

	Wirkungsweise „Reduktion der NO _x -Emissionen durch...“	Art der Umsetzung; Umsetzungsverantwortlicher
INFRASTRUKTURELLE MAßNAHMEN		
Tempolimit laut Luftschutz-Gesetz	...verminderten Kraftstoffverbrauch.	Ver- und Gebotscharakter temporäre, situationsabhängige Umsetzung; Landesregierungen/Infrastrukturbetreiber
Gestaffelte Mautgebühren nach EURO-Klassen	... schadstoffärmere Fahrzeuge.	Wirtschaftlicher Anreiz zur frühzeitigen Flottenerneuerung; Infrastrukturbetreiber (ASFINAG)
Sektorales Fahrverbot Wochenendfahrverbot Nachtfahrverbot EURO-Klassen-Fahrverbot	...verringertes (sektoralen, temporären, spezifischen) Fahrzeugaufkommen.	Verbotscharakter Landesregierung/Bund/ Infrastrukturbetreiber
Forcierung des Bahngüterverkehrs	... Reduktion des Fahrzeugaufkommens durch Verlagerung des Güterverkehrs von Straße auf Schiene (Modal Shift).	Wirtschaftlicher Anreiz durch staatliche Förderung; Bund
KFZ-TECHNISCHE MAßNAHMEN		
Einführung und regelmäßige Verschärfung der EURO-Klassen	... schadstoffärmere Fahrzeuge.	Normierung der Fahrzeugklassen; KFZ-Zulassungsbehörde
Verbesserung der Kraftstoffqualität	... eine schadstoffärmere Kraftstoffverbrennung.	Evolution der Kraftstoffe; Kooperation zwischen KFZ- und Kraftstoffhersteller
Verbesserung der Abgasnachbehandlungsanlagen	... verminderten Ausstoß von Luftschadstoffen.	Evolution der Kraftfahrzeugtechnik; Kooperation zwischen KFZ- und Kraftstoffhersteller

Fortsetzung der Tabelle 5 auf Seite 29

Fortsetzung der Tabelle 5 von Seite 28

INSTITUTIONELLE MAßNAHMEN		
Anschaffungsförderung von EURO 6/VI Fahrzeugen und umweltfreundlichen Motoren/ Verschrottungsprämien	... erhöhte Flottendurchdringung neuerer, schadstoffärmerer Fahrzeuge.	Wirtschaftlicher Anreiz; Bundesministerium (z.B. Finanzamt)
Steuerrechtliche Begünstigung von emissionsarmen Kraftfahrzeugen	... Schaffung eines wirtschaftlichen Anreizes zum frühzeitigen Flottenaustausch.	Steuerrechtliche Begünstigung von emissionsarmen Kraftfahrzeugen; Finanzamt
Erhöhung der Spritpreise	... Abnahme des Tanktourismus aus Nachbarländern.	Steuerrechtlicher Eingriff; Finanzamt
Strafen bei umwelt- und klimarelevanten Manipulationen	... den ordnungsgemäßen Betrieb von Fahrzeugen mit Abgasnachbehandlungsanlagen.	Exekution von umwelt- und klimarelevanten Manipulationen; Bundesministerium, Exekutive
Forcierung von verbrauchsarmen Fahren	... verminderten Kraftstoffverbrauch.	Bewusstseinsbildung; Unternehmen (durch seine KFZ-Lenker:innen)

Quellen: Eigene Zusammenstellung (Bundeskanzleramt Österreich, 2020: 92-96; Österreichische Bundesregierung o.J.: 20-27)

Es gibt eine Fülle von Maßnahmen, die zur Erreichung des Ziels einer Reduktion der jährlichen NO_x-Emissionen angewendet werden können. Die Einführung und regelmäßige Verschärfung der EURO-Klassen sowie die Einführung von Strafen bei umwelt- und klimarelevanten Manipulationen sind geeignete Maßnahmen, durch welche eine Reduktion von NO_x-Emissionen erreicht werden.

Welchen Reduktionsbeitrag diese Maßnahmen (gemessen an t NO_x/Jahr) im Vergleich zum Reduktionsbeitrag anderer Maßnahmen aus dem Portfolio der planerisch-administrativen Ansatzpunkte hat, wird an dieser Stelle nicht diskutiert. Ebenso wird kein Einblick in die Wechselwirkungen, die aufgrund der Abgasnachbehandlung zwischen anderen Schadstoffen und den NO_x entstehen, gegeben. Beispiele hierfür sind die Entstehung von CO₂ als Nebenprodukt bei der Reinigung des Abgases von NO_x oder die vermehrte Entstehung von Partikeln (PM₁₀ und PM_{2,5}) bei Optimierung des Verbrennungsprozesses auf niedrige NO_x-Emissionen.

Die vorliegende Diplomarbeit konzentriert sich auf die Quantifizierung des Emissionsniveaus (t NO_x/Jahr), welches durch die Einführung der EURO-Abgasnormen eingespart werden kann (Einsparungspotenzial) sowie die Verringerung dieser Einsparung, die durch eine Manipulation von technischen Einrichtungen an modernen Fahrzeugen im Laufe des Fahrzeugbetriebs entstehen (Mehremissionen).

3.5 Ausblick zu den Folgen einer Zielverfehlung

Bis 2019 wurde das festgelegte Ziel des Emissionshöchstwerts von 103 kt/Jahr in Österreich um 27,7 kt verfehlt. Durch die Beantragung und Bewilligung einer Flexibilitätsregelung gemäß der NEC-Richtlinie⁴⁰ ist es der österreichischen Bundesregierung erlaubt, die bis 2019 gemeldeten Emissionshöchstwerte anzupassen und nach unten zu korrigieren. Seither wird das Ziel nicht mehr verfehlt. Durch die Flexibilitätsregelung der NEC-Richtlinie reduzierten sich die jährlichen NO_x-Emissionen in Österreich zwischen 40 bis 56 kt/Jahr, sodass der Emissionshöchstwert von 103 kt/Jahr seit 2014 eingehalten bzw. unterschritten werden kann. (Anderl et al. 2021a: 32; 2021b: 13)

Die Grenz- und Zielwerte für NO₂, die durch das IG-L⁴¹ festgelegt wurden, wurden im Jahr 2019 an einigen Messstellen überschritten. Der Jahresmittelwert von 30 µg/m³ wurde an 19 und der Tagesmittelwert von 80 µg/m³ an 15 Messstellen überschritten. (Spangl/Nagl 2020: 7f)

Bei einer Verfehlung des festgelegten Emissionshöchstwertes von 103 kt/Jahr würde Österreich ein Vertragsverletzungsverfahren drohen, welches Sanktionen und/oder Strafzahlungen zur Folge haben könnte. Ein Vertragsverletzungsverfahren läuft in mehreren Schritten ab und endet mit einem förmlichen Beschluss. Zumeist werden die Verfahren geklärt bevor der europäische Gerichtshof mit einbezogen werden muss.

⁴⁰ Richtlinie (EU) 2016/2284

⁴¹ Bundesgesetz zum Schutz vor Immissionen durch Luftschadstoffe (Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L), BGBl. I 1997/115 idgF.

4 Stickoxidemissionen und ihre Auswirkungen

Als Stickstoffoxide – kurz Stickoxide – werden all jene gasförmigen Verbindungen bezeichnet, welche aus den Atomen Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) aufgebaut sind. Im Abgas von Verbrennungsmotoren sind im Wesentlichen die Stickoxide NO, NO₂ und N₂O enthalten. Der Einfachheit halber werden diese üblicherweise unter der Bezeichnung „NO_x“ zusammengefasst. (Hertzberg 2001: 3, Paschotta 2019a: online)

4.1 Arten von Stickoxiden

Generell gibt es viele verschiedene Stickoxid Verbindungen. Die vier wichtigsten Verbindungen werden im Folgenden kurz erläutert (Paschotta 2019a: online):

- **Stickstoffmonoxid** (NO) – entsteht zum Beispiel in Verbrennungsmotoren, vor allem bei hohen Verbrennungstemperaturen. „Es ist ein farbloses Gas, das zu einer Veränderung der Lungenfunktion und zu Schleimhautreizungen führt. In der Atmosphäre wird NO hauptsächlich durch Ozon zu NO₂ umgesetzt“ (Pischinger 1996, zitiert nach Hertzberg 2001: 4).
- **Stickstoffdioxid** (NO₂) – entsteht, wenn Stickstoffmonoxid (NO) an die Luft gelangt und mit Sauerstoff (O) reagiert. Wenn es in hoher Konzentration vorkommt ist es an seiner rostbraunen Farbe und seinem stechenden Geruch erkennbar. „Es bewirkt Lungenreizungen, ist gewebeschädigend und schleimhautreizend und führt in höheren Konzentrationen zu Schädigungen des Zentralnervensystems“ (Pischinger 1996, zitiert nach Hertzberg 2001: 4).
- **Distickstoffmonoxid** (N₂O) – auch bekannt unter der Bezeichnung Lachgas. Entsteht vor allem in der intensiven Landwirtschaft durch den Einsatz von Stickstoffdüngern.
- Weitere Stickoxide sind **Distickstofftrioxid** (N₂O₃), **Distickstofftetroxid** (N₂O₄) und **Distickstoffpentoxid** (N₂O₅).

Da es aufgrund der vielen Oxidationsstufen des Stickstoffs mehrere Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen gibt, werden sie unter der Bezeichnung NO_x zusammengefasst (VCÖ 2019). Meist wird in der Literatur die Abkürzung NO_x synonym verwendet, wenn von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid die Rede ist. In der vorliegenden Diplomarbeit werden ebenfalls Stickstoffmonoxid und -dioxid unter dem Begriff NO_x zusammengefasst.

4.2 Entstehung von Stickoxiden

Generell kann zwischen elementarem und reaktivem Stickstoff (N_2) unterschieden werden. Während elementarer Stickstoff sehr reaktionsträge ist und von den meisten Lebewesen nicht genutzt werden kann, ist der reaktive Stickstoff für Lebensprozesse hochrelevant. Der reaktive Stickstoff kann vielfältige Bindungen mit organischen wie auch anorganischen Stoffen eingehen. Die Menge an verfügbarem reaktiven Stickstoff ist im natürlichen Stickstoffkreislauf begrenzt. Erst durch vermehrte menschliche Aktivitäten (z.B. „Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion, Nutzung fossiler Brenn- und Treibstoffe in Industrie und Verkehr, ...“) hat sich die Menge an reaktiven Stickstoffverbindungen drastisch erhöht. (Deutsche Umwelthilfe 2018: 4)

Die NO_x sind eine dieser sogenannten reaktiven Stickstoffverbindungen. Sie sind das Produkt unerwünschter Nebenreaktionen bei Verbrennungsprozessen von fossilen Brennstoffen, wie sie auch in den Motoren von Kraftfahrzeugen vorkommen (VCÖ 2019). Die Bildung von NO_x erfolgt nur unter Zuführung von Energie und benötigt in der Regel sehr hohe Temperaturen (ab ca. $1227^\circ C$) (Paschotta 2019a: online, Hertzberg 2001: 4). Durch das langsame Absenken der Temperatur zerfällt ein Großteil der gebildeten NO_x wieder in Stickstoff und Sauerstoff. Dabei wird Wärme freigesetzt. In den Verbrennungsmotoren erfolgt die Abkühlung des Abgases jedoch so schnell, dass ein wesentlicher Teil der NO_x im Abgas enthalten bleibt. (Paschotta 2019a: online)

4.3 Verursacher von Stickoxidemissionen

Zu den Hauptquellen für den NO_x -Ausstoß zählen Verbrennungsmotoren sowie Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfälle (Schneider et al. 2018: 50) aber auch die Landwirtschaft und der Kleinverbrauch. Während jedoch der Großteil der Emissionen der Industrie über hohe Schornsteine ausgestoßen werden, gelangen die Abgase des Verkehrs in Bodennähe in die Luft und haben somit einen direkten Effekt auf die Umwelt, die Tiere und natürlich auch auf die Menschen (VCÖ 2019).

Wie in Kapitel 3.2 erwähnt wurden im Jahr 2019 in Österreich 130,7 kt NO_x (ohne Kraftstoffexport) emittiert – mit dem Kraftstoffexport kommen 13,5 kt NO_x hinzu (Anderl et al. 2021a: 31; 2021b: 7). Größter Verursacher der NO_x -Emissionen ist der Verkehrssektor mit 55,3 % - davon entfallen 45,3 % auf den Verkehr und 9,4 % auf den Kraftstoffexport. Von den NO_x -Emissionen des Verkehrssektors werden circa 68 % vom PKW-Verkehr, 31 % durch den Einsatz von schweren und leichten Nutzfahrzeugen (inkl. Bussen) und <1 % von Mopeds und Motorrädern emittiert. (Anderl et al. 2021a: 90)

Seit 2005 gehen die NO_x-Emissionen kontinuierlich zurück. Diese Entwicklung kann maßgeblich auf die Fortschritte der Abgasnachbehandlung – im Besonderen bei schweren Nutzfahrzeugen – zurückgeführt werden. (Anderl et al. 2021a: 92) In Abbildung 2 wird die prozentuale Verteilung der NO_x-Emissionen je Sektor dargestellt.

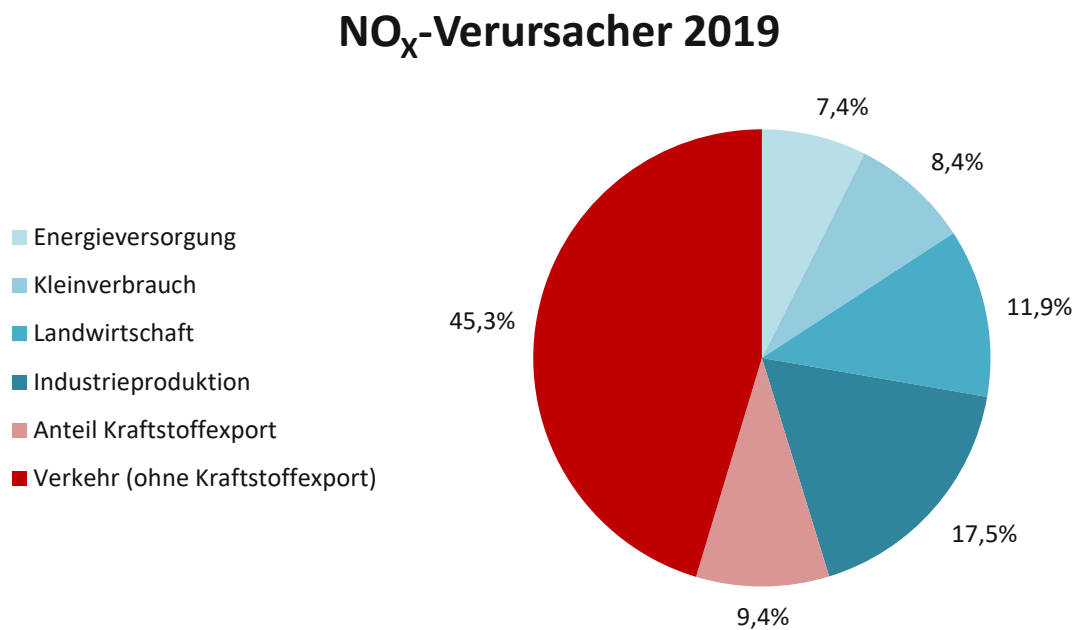


Abbildung 2: Verursacher von NO_x-Emissionen im Jahr 2019 (Anderl et al. 2021a: 32)

4.4 Auswirkungen von Stickoxiden auf Menschen und Umwelt

Stickstoffmonoxid (NO) ist besonders flüchtig und reagiert schnell mit anderen Stoffen. Bei den Verbrennungsprozessen entsteht zuerst hauptsächlich NO, welches in weiterer Folge zu NO₂ oxidiert. Daher ist es nur schwer messbar und birgt eine deutlich geringere Gefahr für die menschliche Gesundheit als Stickstoffdioxid (NO₂) (siehe Tabelle 6). (Spangl/Nagl 2020: 42, GEOMAR 2018)

Stickstoffdioxid (NO₂) ist ein ätzendes Reizgas und wirkt sowohl auf die Menschen, als auch die Umwelt schädlich. Die direkten Wirkungen des NO₂ sind für den Menschen besonders schädlich, da sie die Lungenfunktion beeinträchtigen und Langzeiteffekte auf die kardiovaskuläre Mortalität haben (Schneider et al. 2018: 166). Die NO₂ wirken an den Zellstrukturen der Lunge als sehr reaktives Oxidationsmittel und können somit Entzündungsreaktionen in den Atemwegen verursachen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass NO₂ relativ wenig mit den Strukturen der oberen Atemwege

interagiert und somit tief in den Atemtrakt eindringen kann. Dort angekommen, kann NO_2 Zellschäden auslösen, entzündliche Prozesse verursachen und verstärkte Reizbarkeit der Bronchien nach sich ziehen. Zusätzlich fungieren die NO_x als Vorläufersubstanz von Feinstaub und Ozon. (Umweltbundesamt (D) 2018: 4, Deutsche Umwelthilfe 2018: 4)

Die möglichen Auswirkungen des NO_2 auf den Menschen und die Umwelt werden in der Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Auswirkungen des Stickstoffdioxid auf Menschen und Umwelt

Auswirkungen	
Mensch	<ul style="list-style-type: none"> • Schädigung des Schleimhautgewebes im gesamten Atemtrakt • Reizung der Augen • Zusätzliche Reizwirkung anderer Luftschadstoffe aufgrund der auftretenden Entzündungsreaktion auf das NO_2 • Erhöhte Sterblichkeit • Ansteigen von allergischen Reaktionen • Verschlimmerung bereits bestehender Asthma-Erkrankungen • Verstärkte Empfindlichkeit der Atemwege • Entwicklung von Asthma als Folge lang andauernder Exposition
Umwelt	<ul style="list-style-type: none"> • Schädigung von Pflanzen • Nekrose • Vorzeitiges Altern • Kümmerwuchs • Überdüngung & Versauerung von Böden und Gewässern

Quelle: Deutsche Umwelthilfe 2018; Umweltbundesamt (D) 2018: online; VCÖ 2019.

5 Abgasmesstechnik und Prüfzyklen

Damit die Einhaltung der in der EURO-Abgasnorm definierten Grenzwerte gewährleistet werden kann, müssen neue Fahrzeuge im Zuge der Zertifizierung eine Typprüfung absolvieren. Dabei werden die emittierten Schadstoffe während eines Prüfzyklus gesammelt und deren Konzentration gemessen.

5.1 Typprüfung, Serienprüfung, Feldüberwachung

Mitte der 1960er-Jahre wurden in Kalifornien die ersten Abgasgesetzgebungen für Ottomotoren verabschiedet. Seither hat sich in der weltweiten Emissionsgesetzgebung und der Abgasmesstechnik einiges getan. Heute haben alle Industriestaaten Abgasgesetze, die die Grenzwerte für Otto- sowie Dieselmotoren festlegen. Zur Erlangung der nationalen Typpgenehmigung müssen neue Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren einen Prüfzyklus absolvieren. In den USA, der EU und Japan werden zwischen drei Arten von Prüfungen unterschieden (Schodl 2019: 7, Flämig et al. 2020: 400f):

- **Typprüfung** – wird zur Erlangung der allgemeinen Betriebserlaubnis für einen Fahrzeug- oder Motortyp angewendet. Bei der Typpenehmigung muss der Hersteller belegen, dass er die materiellen gesetzlichen Vorgaben eingehalten hat. Das beinhaltet auch die Abgasemissionsvorschriften. Die Prüfzyklen müssen unter definierten Randbedingungen gefahren werden, während gleichzeitig die Emissionsgrenzwerte nicht überschritten werden.
- **Serienprüfung** – ist eine stichprobenartige Kontrolle der laufenden Fertigungen und wird in der Regel vom Hersteller selbst als Teil der Qualitätskontrolle durchgeführt. Dabei werden im Wesentlichen die gleichen Prüfverfahren und Grenzwerte angewandt wie bei der Typprüfung. Die Zulassungsbehörde kann beliebig oft Nachprüfungen anordnen.
- **Feldüberwachung** – wird zur Überprüfung bestimmter Abgaskomponenten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen herangezogen. Dadurch soll die dauerhafte Einhaltung von Emissionsvorschriften gewährleistet werden. Für die Feldüberwachung müssen die Laufleistung und das Alter des Fahrzeuges innerhalb festgelegter Grenzen liegen. Dieses Verfahren ist im Gegensatz zur Typprüfung stark vereinfacht.

Diese drei Prüfungsarten orientieren sich nach den jeweilig länderspezifischen Abgasgesetzgebungen (Flämig et al. 2020: 400).

5.2 Arten von Fahrzeugklassen

Seit der Einführung der ersten Abgasgesetzgebung wurden die zulässigen Grenzwerte für die verschiedenen Schadstoffe immer weiter reduziert. Für die Absolvierung der Emissionsprüfung wird zwischen folgenden Fahrzeugklassen unterschieden (Flämig et al. 2020: 400f):

- PKW: Die Emissionsprüfung erfolgt auf einem Fahrzeug-Rollenprüfstand. In Europa werden außerdem zusätzliche Fahrten im realen Straßenverkehr vorgesehen (Real Driving Emissions, RDE).
- Leichte Nutzfahrzeuge: Nach österreichischer Gesetzgebung liegt die Obergrenze des zulässigen Gesamtgewichts bei 3,5 t. In der Regel werden leichte Nutzfahrzeuge ebenfalls auf einem Fahrzeug-Rollenprüfstand geprüft.
- Schwere Nutzfahrzeuge: Bei Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t erfolgt die Emissionsprüfung auf dem Motorenprüfstand. Seit der Einführung der Schadstoffklasse EURO VI ist eine stichprobenartige Nachprüfung von bereits in Betrieb befindlichen Nutzfahrzeugen im Straßenverkehr erforderlich (Feldüberwachung). Dazu werden während einer Fahrt im realen Straßenbetrieb mittels eines mobilen Emissionsmessgeräts⁴² Messungen durchgeführt.
- Non-Road-Anwendungen (Baufahrzeuge, Kühl-, Notstromaggregate, ...): Bei dieser Fahrzeugklasse werden die Emissionsmessungen ebenfalls am Motorenprüfstand durchgeführt.

5.3 Testzyklus bei Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen

Für die Zulassung eines PKW oder leichten Nutzfahrzeugs, werden die Fahrzeuge auf einem Rollenprüfstand der Typprüfung unterzogen. Dazu gehört auch die Messung der ausgestoßenen Emissionen. Die EU-Kommission legte auf Grundlage der Richtlinie 70/220/EWG aus dem Jahr 1970 die Richtlinien der Abgasgesetzgebung für PKW und leichte Nutzfahrzeuge fest. Seit September 2017 wird in der EU für die Zertifizierung von PKW und leichten Nutzfahrzeugen der Schadstoffklasse EURO VI der Testzyklus WLTC⁴³ samt der dazugehörigen Testprozedur WLTP⁴⁴ herangezogen. Der WLTC löste den damals gültigen NEFZ⁴⁵ ab und umfasst bis zu vier Phasen (Low, Medium, High, Extra

⁴² engl.: Portable Emissions Measurement System, PEMS

⁴³ engl.: Worldwide Harmonised Light Duty Test Cycle

⁴⁴ engl.: World Harmonized Light Duty Test Procedure

⁴⁵ Neuer Europäischer Fahrzyklus

High), welche vom Leistungsgewicht sowie von der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges abhängig sind. (Flämig et al. 2020: 422)

Der neue Prüfzyklus WLTC bringt im Vergleich zum NEFZ folgende Änderungen mit sich: der Prüfzyklus ist „länger, die Maximal- bzw. Durchschnittsgeschwindigkeit höher, die Stoppzeiten reduziert und die Schaltpunkte eher fahrzeugspezifisch, wodurch letztendlich realistischere Verbrauchs- und Emissionswerte pro Fahrzeug vorliegen“ (Schodl 2019: 7). Für die Bestimmung der ausgestoßenen Schadstoffmassen wird eine Reihe von Abschnitten mit konstanter Beschleunigung und Geschwindigkeit nachgefahren. Nach Beendigung der Fahrt auf dem Rollenprüfstand werden die gesammelten Emissionen auf ihren Schadstoffgehalt in Bezug auf die gefahrene Strecke analysiert (Flämig et al. 2020: 401). Zusätzlich werden während einer 90 bis 120-minütigen realen Straßenfahrt RDE-Messungen durchgeführt. Diese Messungen sollen sicherstellen, dass die Emissionsgrenzwerte nicht nur im genormten Zyklus, sondern auch unter realen Straßenbedingungen eingehalten werden. Die festgelegten Grenzwerte für PKW und leichte Nutzfahrzeuge unterscheiden sich zwischen Diesel- und Ottomotoren, werden auf die Fahrstrecke bezogen und in Gramm pro Kilometer (g/km) angegeben. (Flämig et al. 2020: 409ff, Schodl 2019: 7)

5.4 Testzyklus bei schweren Nutzfahrzeugen

Zu den schweren Nutzfahrzeugen zählen in Österreich alle Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t. Grundlage für die Emissionsvorschriften (EURO-Abgasnormen) für die schweren Nutzfahrzeuge ist die Basisverordnung (EG) 595/2009⁴⁶. Diese wird laufend aktualisiert und inhaltlich durch weitere Verordnungen⁴⁷ erweitert. Für die Bestimmung der Emissionen eines schweren Nutzfahrzeugs werden auf dem Motorenprüfstand stationäre (WHSC⁴⁸) oder dynamische Tests (WHTC⁴⁹) durchgeführt. Zusätzlich werden auch Tests mit willkürlichen oder zufälligen Messpunkten innerhalb eines definierten Motorkennfeldes gefahren. Anders als bei den PKW werden die zulässigen Grenzwerte nicht auf die gefahrene Fahrstrecke, sondern auf die Motorleistung bezogen (g/kWh) angegeben. (Flämig et al. 2020: 416)

Der WHSC und der WHTC lösten im Jahr 2013 – zeitgleich mit der Einführung der Schadstoffklasse EURO VI – den zuvor gültigen stationären 13-Stufentest ESC⁵⁰ ab. Hinzu kam außerdem, dass mit Einführung der Schadstoffklasse EURO VI nicht mehr ausschließlich die Messungen vom

⁴⁶ Verordnung (EG) 595/2009

⁴⁷ Verordnung (EU) 582/2011; Verordnung (EU) 2016/1718

⁴⁸ engl.: Worldwide Harmonised Stationary Cycle

⁴⁹ engl.: Worldwide Harmonised Tansient Cycle

⁵⁰ engl.: European Steady State Cycle

Motorprüfstand herangezogen, sondern dass im Zuge der Typprüfung auch Messungen im realen Verkehr mithilfe eines mobilen Emissionsmessgeräts durchgeführt werden. Ein Überblick über die Entwicklung der Grenzwerte je EURO-Abgasnorm kann der Tabelle 4 entnommen werden.

6 Methoden zur Reduktion der Schadstoffemissionen in Verbrennungsmotoren

Um den Schadstoffgehalt in den Abgasen zu reduzieren, gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen, die angewendet werden können – unterschieden nach Maßnahmen vor, im und nach dem Motor (Pucher et al. 2017: 938). Eine Maßnahme „vor dem Motor“ ist z.B. die Verbesserung der Kraftstoffqualität – auf diese wird im Weiteren nicht näher eingegangen. Maßnahmen „im und nach dem Motor“ werden in den nachfolgenden Kapiteln kurz erläutert, wobei die Kapitel 6.1 und 6.2 Maßnahmen „im Motor“ und das Kapitel 6.3 Maßnahmen „nach dem Motor“ benennen. Zu Beginn dieses Kapitels soll ein kurzer Abriss über die innermotorischen Möglichkeiten gegeben werden, bevor ein besonderes Augenmerk auf die außermotorischen Methoden zur Minderung der Schadstoffemissionen gelegt wird.

6.1 Innermotorische Maßnahmen

Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass durch die unterschiedliche Funktionsweise von Otto- und Dieselmotoren nicht nur verschiedene Arten der Abgasnachbehandlung herangezogen werden müssen, sondern auch verschiedene Adaptionen des Motorraums zielführend sind. Bei den Ottomotoren wird zwischen Direkt- und Saugrohreinspritzung unterschieden, jedoch sind viele der unten genannten Ausführungen für beide Bauarten gültig (Pucher et al. 2017: 938). Ein bekannter Kompromiss, der bei innermotorischen Emissionsoptimierung gemacht werden muss, betrifft die Bildung von NO_x und Partikeln, die gegenläufige Trends aufweisen. Die NO_x Reduktion geht einher mit einer Erhöhung der Partikel und umgekehrt (Tatschl/Wurzenberger 2011: 479).

Folgende innermotorische Maßnahmen können zur Minderung der Schadstoffemissionen bei Ottomotoren beitragen (Pucher et al. 2017: 938-941):

- Gemischbildung: Das Verhältnis zwischen Luft und Kraftstoff im Brennraum hat den dominantesten Einfluss auf die motorischen Rohemissionen⁵¹.
- Brennverlauf und –verfahren: Kurze Verweildauern bei hohen Temperaturen verringern die NO_x -Bildung. Optimal sind Brennverfahren, die eine Maximaltemperatur von 1726 °C nicht überschreiten.
- Ventilsteuerung: Eine zentrale Kerzenanlage und ein durch vier Ventile symmetrischer Brennraum sind optimale Voraussetzungen für eine schadstoffarme Verbrennung.

⁵¹ Der Begriff Rohemissionen bezeichnet die Schadstoffemissionen im Abgas, bevor es eine Abgasnachbehandlungsanlage durchlaufen hat (Paschotta 2021).

- Verdichtungsverhältnis: Eine hohe Verdichtung führt zu einem besseren thermischen Wirkungsgrad des Prozesses, was wiederum zu einer Erhöhung der Verbrennungspitztemperatur und somit auch höheren NO_x-Emissionen führt.

Bei Dieselmotoren führen folgende Maßnahmen zu einer Senkung der Rohemissionen (Pucher et al. 2017: 941-943):

- Brennverlauf und –verfahren: Durch eine homogene Dieselerbrennung mit einer mageren Vormischverbrennung und einer höheren Einspritzrate könnte zu einer nahezu rußfreien Verbrennung mit minimalen NO_x-Emissionen führen. Jedoch stehen eine unzureichende Gemischbildung sowie inhomogene Gemischverteilung und ein begrenzter Betriebsbereich im Last-Drehzahlkennfeld der praktischen Realisierung dieses Verfahrens entgegen.
- Aufladung: Die Turboaufladung bei Dieselmotoren ist nach wie vor eine der effizientesten Möglichkeiten, um sämtliche Schadstoffkomponenten zu vermindern. Dabei ist es essenziell, dass die Parameter Ladedruck und Ladelufttemperatur zu jedem Lastpunkt variiert werden können.
- Einspritzsysteme und –verfahren: Die Kombination aus einem hohem Einspritzdruck (1500 – 2000 bar) und neuen Einspritzventilen führen zu einer optimierten Aufbereitung des Kraftstoffes und senken im Speziellen die Partikelemissionen.
- Ventilsteuerung: Die Mehrventiltechnik begünstigt einen höheren Füllungsgrad, was wiederum positive Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch und das allgemeine Rohemissionsverhalten hat.
- Brennraumgestaltung: Generell gelten für den Dieselmotor ähnliche Gestaltungsregeln wie für den Ottomotor. Jedoch sind die Anforderungen für die Brennraumgeometrie vom Einspritzverfahren und dem Hubvolumen abhängig.

Eine weitere innermotorische Maßnahme, die sowohl beim Otto- als auch beim Dieselmotor zur Schadstoffreduktion angewendet wird, ist die Abgasrückführung. Diese wird nachfolgend im Kapitel 6.2 näher beschrieben.

6.2 Abgasrückführung

Die Abgasrückführung (AGR) zielt vor allem auf die Reduktion von NO_x-Emissionen ab und wird zumeist im Teillastbetrieb angewendet. Die AGR ist den außermotorischen Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung vorgelagert und kann in Kombination mit einem Abgaskatalysator verwendet werden (Paschotta 2019b: online).

Bei der AGR wird Abgas vom Abgasstrang abgezweigt und wieder in die Zylinder gemeinsam mit frischem Treibstoff bzw. im Falle eines Ottomotors mit einem Luft-Kraftstoff-Gemisch eingeleitet. Es kommt dadurch zu einer Ladungsverdünnung. Das Abgas ist sauerstoffarm, wodurch es nicht mehr an

der Verbrennungsreaktion im Zylinder teilnimmt. Dadurch verläuft die Verbrennung insgesamt gedämpft und die Spitzentemperatur im Brennraum wird abgesenkt. Der Temperaturabfall mindert wiederum die Entstehung von NO_x drastisch. Durch die Kühlung des Abgases vor der Rückleitung in den Zylinder, lässt sich der Effekt der AGR zusätzlich verbessern (Kech et al. 2014: online, Paschotta 2019b: online).

Die AGR trägt v.a. bei Diesel- und Magermotoren⁵² zu einer Senkung der NO_x -Emissionen bei, da diese mit Luftüberschuss arbeiten. Durch die Rückführung des Abgases in die Brennkammer sinkt die Verbrennungstemperatur und die NO_x -Emissionen gehen zurück. Es muss jedoch beachtet werden, dass es bei zu hohen Abgasrückführaten zu einer vermehrten Rußproduktion kommt. Zwischen der Verringerung der NO_x und der Partikelanteile im Abgas besteht ein Zielkonflikt. Verbrennt der Kraftstoff mit hoher Temperatur im Zylinder, entstehen zwar wenige Rußpartikel, aber viele NO_x . Bei niedriger Verbrennungstemperatur sind die NO_x -Emissionen gering, aber es bilden sich mehr Rußpartikel. (Paschotta 2019b: online; Pucher et al. 2017: 937; Kech et al. 2014: online).

Im Teillastbetrieb bei Ottomotoren kann mithilfe der AGR zwar der Wirkungsgrad erhöht werden, jedoch ist sie für die NO_x -Reduktion weniger relevant, da diese durch den Drei-Wege-Katalysator bereits recht effektiv vorgenommen wird. Bei Ottomotoren muss beachtet werden, dass nicht zu viel Abgas rückgeführt wird, weil sonst die Verbrennung nicht mehr zuverlässig abläuft. Die Folge dessen wäre ein drastischer Anstieg der unverbrannten Kohlenwasserstoffe. Generell kann aber durch die AGR bei Ottomotoren eine Absenkung des Kraftstoffverbrauchs erreicht werden, ohne dabei Motorleistung einzusparen. (Paschotta 2019b: online)

Im Nutzfahrzeugbereich war die gekühlte AGR bis zur Schadstoffklasse EURO III sowohl bei diesel- als auch benzinbetriebenen Motoren Standard, aber seit der Einführung der Schadstoffklasse EURO IV ist die Verwendung der AGR zurückgegangen, da viele Hersteller auf die selektive katalytische Reduktion (SCR) (siehe Kapitel 6.3.5) zur NO_x -Reduktion setzen.

Der volle Effekt der AGR ist nur in einem gewissen Temperaturfenster verfügbar, das in der Praxis oft verlassen wird. Der im April 2016 bekannt gewordene Diesel-Abgasskandal deckte auf, dass viele Hersteller von Dieselfahrzeugen den Grad der Abgasrückführung stark reduzieren, wenn die Außentemperatur unter $10\text{ }^\circ\text{C}$ oder $15\text{ }^\circ\text{C}$ fällt. Der genannte Grund dafür war, dass bei starker Abgasrückführung bei tieferen Temperaturen Ablagerungen im Abgaskühler, am AGR-Ventil oder in den Einlasskanälen befürchtet werden können. (Paschotta 2019b: online)

⁵² Bei Magermotoren handelt es sich um Ottomotoren, die mit einem relativ mageren Kraftstoff-Luft-Gemisch arbeiten (Paschotta 2020a: online).

6.3 Außermotorische Maßnahmen

Um Schadstoffe wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x) aus den Abgasen zu filtern benötigt es die Hilfe von Abgaskatalysatoren. Diese Katalysatoren sind außermotorische technische Einrichtungen zur Reduktion des Schadstoffgehalts der Abgase z.B. von Verbrennungsmotoren oder auch von Kraftwerksfeuerungen. Die meisten Schadstoffe, die in den Abgasen enthalten sind, sind das Resultat einer unvollständigen Verbrennung oder einer unerwünschten chemischen Nebenreaktion. All diese Schadstoffe wären grundsätzlich vermeidbar, wenn die Verbrennungsprozesse vollständig abliefen und die Oxidation von Stickstoff unterbliebe. Dies wäre dann der Fall, wenn die Verbrennung mit angemessener Luftzufuhr, nicht zu schnell und bei günstigen Temperaturen abliefe. Solche Bedingungen sind aber bei Otto- sowie Dieselmotoren kaum realisierbar (Paschotta 2018a: online).

Um diesem Problem entgegen zu wirken, können Abgaskatalysatoren als außermotorische Maßnahme herangezogen werden. Diese können bei einer optimalen Wirkungsweise einen Großteil des Schadstoffgehalts in den Abgasen vermindern. In der Automobil-Industrie gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Katalysatoren. Dabei lassen sich vier Haupttypen identifizieren:

- Drei-Wege-Katalysator
- NO_x -Speicherkatalysator
- SCR-Katalysator
- Diesel-Oxidationskatalysator

Diese Katalysatoren können je nach Motor und Abgasnachbehandlungsanlage einzeln oder kombiniert eingesetzt werden (Tatschl/Wurzenberger 2011: 485). Die generelle Funktion eines Katalysators ist es, bestimmte erwünschte chemische Reaktionen auch bei niedrigen Temperaturen beschleunigt ablaufen zu lassen:

- Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe sollen oxidiert werden. Das bedeutet, sie sollen mit dem restlichen Sauerstoff im Abgas reagieren und dabei zu ungiftigem Kohlendioxid und Wasserdampf werden.
- NO_x hingegen sollen reduziert werden. Dies wiederum bedeutet, dass die Oxidation des Stickstoffs rückgängig gemacht werden soll (Paschotta 2018a: online).

Diese Reaktionen könnten zwar im Prinzip auch ohne einen Katalysator ablaufen, jedoch wären sie viel zu langsam. Die Beschleunigung der Reaktionen innerhalb des Katalysators funktioniert vereinfacht gesagt folgendermaßen: Moleküle des Schadstoffs lagern sich für kurze Zeit an Elementen des Katalysators an – sie gehen somit eine schwache Bindung ein. Wenn die Schadstoff-Moleküle jedoch auf ein passendes anderes Molekül (z.B. Sauerstoffmolekül) treffen, lösen sie ihre Verbindung

mit dem Katalysator und reagieren mit dem neuen Molekül. Nach Ablauf dieses Prozesses bleibt der Katalysator unverändert und kann somit weitere Schadstoffmoleküle umsetzen. Katalysatoren können jedoch nicht unerwünschte chemische Elemente entfernen – z.B. Schwefel als Bestandteil von Schwefeldioxid. Und sie können ebenfalls nicht die Bildung von Kohlendioxid verhindern. Dies ist immerhin die am wenigsten schädliche Form, in der der im Brennstoff enthaltene Kohlenstoff das System verlassen kann (Paschotta 2018a: online).

Der ideale Katalysator würde all die genannten erwünschten chemischen Reaktionen schnell und vollständig ablaufen lassen, ohne dass dabei gleichzeitig unerwünschte Reaktionen stattfinden. Dies ist technisch jedoch nicht möglich. Die Effizienz der Abgasnachbehandlungsprozesse hängt sowohl vom Typ des Katalysators als auch von den übrigen Betriebsbedingungen ab (Paschotta 2018a: online).

Im Folgenden werden die einzelnen Arten von Abgaskatalysatoren und ihre Funktionsweise vorgestellt. Zu Beginn werden der Oxidationskatalysator sowie der Dieselpartikelfilter erläutert. Diese beiden außermotorischen Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung haben zwar keinen nennenswerten Einfluss auf die Reduktion von NO_x , jedoch werden sie aus Gründen der Vollständigkeit an dieser Stelle angeführt.

6.3.1 Oxidationskatalysator

Der Oxidationskatalysator wird hauptsächlich bei Dieselmotoren bzw. bei mager betriebenen Ottomotoren angewendet (Paschotta 2018a: online, Eckert/Rakowski 2019: 984f). Das bedeutet, dass der Motor mit einem Sauerstoffüberschuss betrieben werden muss. In einem Oxidationskatalysator findet einerseits eine Oxidation bereits teiloxidierter Komponenten wie CO zu CO_2 und NO zu NO_2 statt. Andererseits werden auch teil- und unverbrannte Kohlenwasserstoffe oxidiert, die vor allem in der Phase kurz nach Motorstart entstehen, vorausgesetzt es ist ein ausreichender Luftüberschuss vorhanden.

Neben den oben genannten primären Funktionen haben Oxidationskatalysatoren in aktuellen Dieselabgasnachbehandlungsanlagen zwei zusätzliche Aufgaben. Zum einen die Optimierung der Effektivität des nachfolgenden Dieselpartikelfilters und SCR-Katalysators und zum anderen die Erhöhung des NO_2 zu NO -Verhältnisses in Richtung 50:50, damit eine Erhöhung der NO_x -Konvertierungsrate im SCR-Katalysator gewährleistet werden kann.

6.3.2 Dieselpartikelfilter

Bei den motorischen Verbrennungsprozessen unter extremen Luftmangel entstehen Partikel und Ruß, welche über das Abgas an die Außenluft gelangen. Partikel zählen zu den Schwebstoffen und treten vor allem bei Dieselfahrzeugen auf. Sie bestehen vorwiegend aus elementarem Kohlenstoff und daran angelagerten Substanzen, hauptsächlich Kohlenwasserstoffen (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2020: online). Da den Partikelemissionen eine erhebliche gesundheitsschädigende Wirkung zugeschrieben wird, wird das Abgas mithilfe von Dieselpartikelfiltern gereinigt (Paschotta 2020b: online).

Man unterscheidet generell zwischen geschlossenen Partikelfiltern (Wall-Flow-Filter) und Partikel-Katalysatoren („Offene“ Filter). Der bekannteste Vertreter der geschlossenen Partikelfilter ist der keramische Wabenfilter. Der wabenförmige Aufbau des Filters mit im Schachbrettmuster wechselseitig verschlossenen Kanälen erzeugt eine große Filteroberfläche, durch die das Abgas gezwungen wird. (Wiertalla/Severin, 2012: 47)

Ähnlich wie beim Stickoxid-Speicherkatalysator (siehe 6.3.4) muss auch der Dieselpartikelfilter nach einiger Zeit regeneriert werden. Die Reinigung erfolgt durch die Verbrennung der eingelagerten Partikel. Dafür wird eine Temperatur von mindestens 350 °C benötigt. Diese Bedingungen können jedoch im Stadtverkehr nur selten erreicht werden, wodurch der Filter aktiv freigebrannt werden muss. Dazu wird die Abgastemperatur über die Motorsteuerung auf 600 °C erhöht, was wiederum einen kurzzeitigen Mehrverbrauch von Kraftstoff und damit höhere CO₂-Emissionen nach sich zieht (Richter 2018: online).

6.3.3 Drei-Wege-Katalysator

Der Drei-Wege-Katalysator wird bei Fahrzeugen, die mit Benzin betrieben werden, eingesetzt. Wie der Name bereits darauf hindeutet, kann der Drei-Wege-Katalysator drei verschiedene Arten von Schadstoffen gleichzeitig abbauen. Baulich unterscheidet sich der Drei-Wege-Katalysator kaum von einem reinen Oxidationskatalysator. Jedoch ist es mit diesem Katalysator möglich nicht nur Kohlenmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe durch Oxidation abzubauen, sondern gleichzeitig auch NO_x zu reduzieren (Tatschl/Wurzenberger 2011: 486, Paschotta 2019c: online).

Im Falle des Drei-Wege-Katalysators sollen die verschiedenen Schadstoffe im Abgas miteinander chemisch reagieren. Dabei sollen die NO_x genau die Menge an Sauerstoff abgeben, die zur Oxidation von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen notwendig ist. Begünstigt wird diese Reaktion durch die Oberfläche des Katalysators, jedoch kann sie nur funktionieren, wenn das Abgas zu oxidierende und zu reduzierende Schadstoffe in einem ausgewogenen Verhältnis enthält. Diese Voraussetzung kann

erfüllt werden, wenn das Verbrennungsluftverhältnis (Lambda-Wert, λ), mit dem der Motor betrieben wird, auf einen Wert nahe 1 geregelt wird. Man spricht dann von einer stöchiometrischen Verbrennung. Das bedeutet, dass das Abgas weder einen Sauerstoffmangel noch einen Sauerstoffüberschuss aufweisen darf (Tatschl/Wurzenberger 2011: 486ff, Paschotta 2019c: online).

- Bei einem Sauerstoffüberschuss (zu mageres Gemisch, $\lambda > 1$) würde das Kohlenmonoxid eher mit dem überschüssigen Sauerstoff reagieren anstatt mit dem Sauerstoff der Stickoxide. Somit würde eine Entstickung unterbleiben.
- Wenn dagegen ein Sauerstoffmangel (zu fettes Gemisch, $\lambda < 1$) auftritt, steigen die Emissionen von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen stark an, da nicht genügend Sauerstoff für deren Oxidation zur Verfügung steht.

Um eine stöchiometrische Verbrennung und somit ein Verbrennungsluftverhältnis nahe bei 1 zu gewährleisten, benötigt es eine automatische Regelung. Eine sogenannte Lambdasonde misst vor dem Katalysator kontinuierlich den Restsauerstoffgehalt im Abgas und eine Regeleinrichtung korrigiert bei Bedarf das Verhältnis von Luft- und Kraftstoffzufuhr zum Motor. Aufgrund dieser Vorrichtung wird der Drei-Wege-Katalysator auch oft geregelter Katalysator genannt (Paschotta 2019c: online).

Eine Herausforderung mit der die Hersteller der Drei-Wege-Katalysatoren konfrontiert sind, ist die Anspringtemperatur des Katalysators. Generell erreicht der Katalysator eine sehr gute Abgasreinigung, jedoch erst, wenn Motor und Katalysator die erforderliche Betriebstemperatur erreicht haben. Das bedeutet, dass die Funktion in der Warmlaufphase nach einem Kaltstart nicht bzw. nur eingeschränkt funktioniert. Dabei handelt es sich bedauerlicherweise um die Phase, in welcher der Motor am meisten Schadstoffe emittiert. Ergo sind selbst moderne Katalysatoren auf Kurzstrecken so gut wie unwirksam. Bei modernen Fahrzeugen wird versucht die Warmlaufphase mit bestimmten Maßnahmen soweit wie möglich zu verkürzen. Dies kann beispielsweise durch die Positionierung des Katalysators nahe dem Abgaskrümmer oder eine modifizierte Betriebsweise des Motors in der Warmlaufphase erreicht werden. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung eines elektrischen Heizelements im Katalysator, welches eine stark beschleunigte Aufwärmung erbringen kann (Paschotta 2019c: online).

6.3.4 Stickoxid-Speicherkatalysator

Der Stickoxid-Speicherkatalysator eignet sich vorwiegend für die Erfüllung der Grenzwerte laut EURO 6-Abgasnorm für leichte bis mittelschwere KFZ. Wie der Name bereits vermuten lässt, werden die Stickoxide (NO_x) im Katalysator gespeichert. In einem späteren Schritt wird – wenn die Aufnahmekapazität des Katalysators erschöpft ist – der Motor für wenige Sekunden auf ein fettes Gemisch (Luftmangel) umgestellt und die Abgastemperatur erhöht. Die Erhöhung der Abgastemperatur wird durch die Verwendung eines späten Zünd- bzw. Einspritzzeitpunkts in Verbindung mit erhöhter Kraftstoffzufuhr bewerkstelligt. Dies leitet die Regeneration des Katalysators ein. Die geänderte Abgaszusammensetzung (weniger Sauerstoff und etwas mehr Kohlenmonoxid) ermöglicht die Beseitigung der angelagerten NO_x im Katalysator. (Hertzberg 2001: 15, Paschotta 2018b: online; Schodl 2019: 10)

Eine wichtige Voraussetzung für eine optimale Funktionsweise des NO_x -Speicherkatalysators ist die Verwendung von schwefelarmen Kraftstoff, da Schwefeldioxid die Effektivität eines NO_x -Speicherkatalysators stark reduzieren kann, wenn es sich in an die für NO_x vorgesehenen Stellen anlagert. Zwar kann ein Katalysator nach so einer „Verschwefelung“ durchaus wieder regeneriert werden, jedoch sind hierfür deutlich höhere Temperaturen und längere Zeiten als für die Entfernung von Nitraten⁵³ notwendig. Selbst bei der Verwendung sehr schwefelarmen Kraftstoffes nimmt die Wirksamkeit der Entstickung mit der Zeit allmählich ab. Deswegen muss gelegentlich eine Desulfatisierung durchgeführt werden, welche automatisch von der Motorsteuerung vorgenommen wird.

Um die Regeneration bzw. die Desulfatisierung des Katalysators vornehmen zu können, müssen deutlich höhere Temperaturen erreicht werden. Die Erreichung dieser Bedingungen beim Einsatz des Katalysators in Fahrzeugen stellt sich aufgrund der wechselnden Lastbedingungen als Herausforderung dar. Besonders bei Dieselmotoren besteht das Problem, dass die Abgastemperatur bei niedriger Last stark abfällt. Somit ist es schwierig die Katalysatortemperatur für eine optimale Wirksamkeit immer im richtigen Bereich zu halten – insbesondere im Stadtverkehr bzw. in der Warmlaufphase nach einem Kaltstart (Paschotta 2018b: online).

6.3.5 SCR-Katalysator

Der SCR-Katalysator ist die derzeit wirksamste Einrichtung zum Abbau von NO_x in Dieselaabgasen. Dieser Katalysator basiert auf der selektiven katalytischen Reduktion (SCR = selective catalytic reduction), die ihren Ursprung in den 1980er-Jahren hat, wo sie in großen stationären

⁵³ Nitrate sind wasserlösliche Salze der Salpetersäure (HNO_3) – (Spektrum.de 2021: online)

Verbrennungsanlagen, wie bspw. kohle- und gasgefeuerten Kraftwerken, eingesetzt wurde (Paschotta 2019d: online, Eckert/Rakowski 2019: 992).

Bei der Verwendung der SCR bei stationären Anlagen wird üblicherweise direkt Ammoniak als Reduktionsmittel in das Abgas eingebracht. Da es sich bei Ammoniak jedoch um ein giftiges und ätzendes Gas handelt, ist in der mobilen Anwendung das Mitführen von reinem Ammoniak aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Für die aktuell in Serie befindlichen Systeme hat sich die Verwendung einer Harnstoff-Wasser-Lösung (Markenname: „AdBlue®“) zur Reduktionsmittelbereitstellung etabliert (Eckert/Rakowski 2019: 993, Kröcher et al. 2008: 9, Birkhold 2007: 4). Mittels chemischer Prozesse wird das AdBlue im Abgasstrang zu Ammoniak umgewandelt und erst danach findet die Reduktion von NO_x statt.

Generell ist hervorzuheben, dass bei der SCR zwischen der Reduktion mit Ammoniak und Kohlenwasserstoffen unterschieden werden kann. Zum derzeitigen Stand der Forschung wird jedoch ausschließlich die SCR mittels Ammoniak zur Entstickung von motorischen Abgasen herangezogen (Eckert/Rakowski 2019: 993). Aus diesem Grund wird im Zuge dieser Diplomarbeit ausschließlich auf Systeme, welche die Reduktion von NO_x mittels Ammoniak vornehmen, eingegangen.

Der SCR-Katalysator wird bei mager betriebenen Motoren eingesetzt. Erst mit der Einführung der Emissionsstufen EURO IV und V für Nutzfahrzeuge kam es zum ersten Großserieneinsatz der SCR in mobilen Anwendungen. Seit der Einführung der EURO 6-Abgasnorm für PKW im September 2014, kam der SCR-Katalysator auch im PKW-Bereich sowie bei Motoren für mobile Arbeitsmaschinen verstärkt zum Einsatz (Eckert/Rakowski 2019: 993; ADAC 2020a: online).

Die Zuführung des Reduktionsmittels in den Abgasstrang erfolgt typischerweise stromaufwärts des SCR-Katalysators durch Einsprühung in den Abgasstrom. Innerhalb des SCR-Katalysators wandeln sich die NO_x -Emissionen in den Schritten der Thermolyse und Hydrolyse zu NH_3 , H_2O und CO_2 um. Nennenswerte NO_x -Umsätze können bei der SCR erst oberhalb von etwa 200 °C erzielt werden. Wenn der Motor und die Abgasnachbehandlungsanlage die Betriebstemperatur erreicht haben, können mithilfe des SCR-Katalysators bis zu 90% der NO_x -Emissionen aus dem Abgas entfernt werden (Tatschl/Wurzenberger 2011: 487f, Richter 2018: online). Der hohe Wirkungsgrad dieses Katalysators ermöglicht es, den Verbrennungsprozess auf einen geringen Verbrauch einzustellen, was wiederum in niedrigeren CO_2 -Emissionen resultiert. Laut Richter (2018: online) lassen sich durch die Verwendung von AdBlue Kraftstoffeinsparungen von bis zu 5 % erreichen.

7 Schadstoffminderung bei Diesel-Fahrzeugen durch den Einsatz von AdBlue

Wie bereits zuvor beschrieben, können bei der SCR entweder Ammoniak oder Kohlwasserstoffe zur Reduktion von Stickoxiden verwendet werden. Im Transportwesen hat sich die Verwendung von Ammoniak in Form einer flüssigen Harnstofflösung mit dem Markennamen „AdBlue®“ etabliert – in weiterer Folge AdBlue genannt. Im folgenden Kapitel soll genauer auf die Wirkungsweise sowie die Herausforderungen und Kosten der Verwendung von AdBlue eingegangen werden. Des Weiteren werden die verschiedenen Arten der Manipulationen sowie Möglichkeiten der messtechnischen Erfassung des Emissionsverhaltens (manipulierter) Fahrzeuge erläutert.

7.1 Zusammensetzung und Wirkungsweise von AdBlue

Die Bezeichnung AdBlue ist eine vom Verband der Automobilindustrie (VDA) eingetragene Marke. Dabei handelt es sich um eine hochreine, wasserklare, synthetisch hergestellte Lösung, die zu 32,5 % aus Harnstoff und 67,5 % aus demineralisiertem Wasser besteht. Das AdBlue wird in einem separaten Tank im Fahrzeug mitgeführt. In Abhängigkeit des Lastzustands wird die Lösung mittels einer Dosierpumpe in den Abgasstrang eingespritzt, bevor das Abgasgemisch den SCR-Katalysator erreicht. Im Abgasstrang reagiert das AdBlue mit dem Abgas und bildet über die Thermo- sowie die Hydrolyse Ammoniak (ADAC 2020a: online). Durch die Einspritzung des AdBlue in den Abgasstrang können rund 90 % der Stickoxide in Wasser und Stickstoff umgewandelt werden (Pöhler/Adler 2017: 15, ASTRA 2017: online). In der Abbildung 3 wird der Aufbau einer Abgasnachbehandlungsanlage mit AdBlue dargestellt.

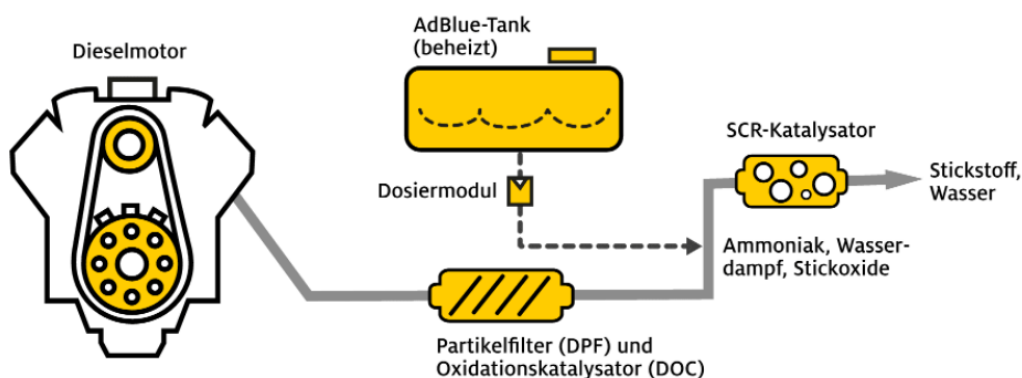


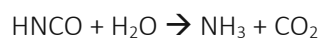
Abbildung 3: Aufbau einer Abgasnachbehandlungsanlage mit AdBlue (ADAC 2020a: online)

AdBlue ist als Harnstoff-Wasser-Lösung das Trägermittel für das Ammoniak (NH_3). Nach der Eindüsung des Harnstoffs in den Abgasstrang muss für die SCR-Reaktion zunächst NH_3 gebildet werden. Die Aufbereitung unterteilt sich in die folgenden beiden Reaktionsschritte:

Bei der **Thermolyse** wird durch den Einfluss der Temperatur Harnstoff in NH_3 und Isocyanensäure (HNCO) umgewandelt.



Im zweiten Schritt folgt unter der Anwesenheit von Wasser die **Hydrolyse**, bei der die HNCO unter der Bildung von CO_2 in NH_3 umgewandelt wird.



Nach der Umwandlung des Harnstoffs in NH_3 lagert sich dieses an den aktiven Zentren des SCR-Katalysators ab. In dem SCR-Katalysator reagieren die NO_x -Emissionen mit dem NH_3 zu den neutralen Komponenten Stickstoff (N_2), Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2). (Eckert/Rakowski 2019: 993; Exomission 2012: online, Richter 2018: online)

7.2 Herausforderungen der Verwendung von AdBlue

Die Verwendung von AdBlue als Reduktionsmittel hat den Vorteil, dass der hohe Wirkungsgrad bei der NO_x -Reduktion es ermöglicht, die Verbrennung auf geringen Kraftstoffverbrauch und damit niedrigere CO_2 -Emissionen einzustellen. Dadurch sind durch die Verwendung von AdBlue Kraftstoffeinsparungen möglich (Richter 2018: online). Leider bringt die Abgasreinigung mit AdBlue nicht nur die positiven NO_x -Minderungseffekte und Kraftstoffeinsparungen, sondern auch einige Herausforderungen mit sich.

AdBlue muss in einem separaten Tank im Fahrzeug mitgeführt werden. Bei LKW stellt dies oftmals ein geringeres Problem dar, als bei PKW. Die Autohersteller stehen vor der Herausforderung einen zusätzlichen Tank in bereits begrenzten Raum unterzubringen. Ein zusätzlicher Tank zieht einen erhöhten Platzverbrauch und zusätzliches Gewicht nach sich, was wiederum dazu führt, dass es zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch kommen kann. Diese Problematik führt dazu, dass bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge die AdBlue-Tanks oft unterdimensioniert werden. Ein zu kleiner Tank bedeutet wiederum, dass ein häufigeres Nachfüllen von AdBlue erforderlich wird und es nicht ausreicht, dass der Tank im Rahmen der Inspektion durch die Werkstatt wieder aufgefüllt wird (ADAC 2020a: online).

Des Weiteren besitzt AdBlue eine begrenzte Lagerstabilität. Bereits bei Temperaturen, die 40 °C übersteigen, entsteht das Ammoniak in der Lösung. Je höher die Temperatur, desto schneller kommt es zur Ammoniak Bildung. Fällt jedoch die Temperatur unter -11 °C, gefriert die Harnstoff-Lösung, wodurch im Winter Heizmaßnahmen erforderlich werden. Das bedeutet wiederum den Einbau kostspieliger, elektrischer Begleitheizungen im Dosier- und Fördermodul sowie im Tank oder bei den Abfüllstationen (Eckert/Rakowski 2019: 994f, ADAC 2020a: online).

Neben der Problematik des hohen Gefrierpunktes des AdBlue, ziehen niedrigere Außentemperaturen auch die Gefahr einer unvollständigen Thermolyse und Hydrolyse des Harnstoffs nach sich. Dadurch können sich an den Wänden der Abgasrohre, welche nicht mit katalytischem Material beschichtet sind, Ablagerungen bilden. Diese Ablagerungen können erst bei höheren Temperaturen wieder abgebaut werden, was wiederum zu einer Beeinträchtigung der Funktionalität der Abgasnachbehandlungsanlage führen kann (Eckert/Rakowski 2019: 994f).

Eine weitere Herausforderung der Abgasnachbehandlung mit AdBlue ist die Dosierung des Reduktionsmittels. Die daraus resultierende NH_3 Konzentration muss auf die vorhandene NO_x Konzentration abgestimmt sein. Wenn bei der Reduktion des NO_x im SCR-Katalysator mehr Harnstoff bereitgestellt wird, als benötigt wird, kommt es zum sogenannten Ammoniakslupf. Dieser Begriff bezieht sich auf die NH_3 -Konzentration im Abgas. Bereits bei geringem Ammoniakslupf kommt es zu einer Geruchsbelästigung. NH_3 ist ebenso wie NO_x ein Schadstoff und kann bei höheren Konzentrationen zu Verätzungen der Augen, Atemwege sowie der Haut führen (Pöhler/Adler 2017: 16). Es muss also darauf geachtet werden, dass sich beim Versuch der Reduktion des einen Schadstoffes die Konzentration eines anderen nicht erhöht.

7.3 Gründe und ökonomische Perspektive der Manipulation von Abgasnachbehandlungsanlagen bei Diesel-LKW

Durch die Manipulation von Abgasnachbehandlungsanlagen, die AdBlue verwenden, können Fuhrparkbetreiber einen betriebswirtschaftlichen Vorteil erlangen. Welche Einsparungen bei den laufenden Kosten durch eine Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlage generiert werden können wird im Folgenden skizziert.

Eine Manipulation der Abgasreinigung erfolgt primär erst dann, wenn nach einer bestimmten Laufleistung der Fahrzeuge Probleme oder Defekte der Abgasnachbehandlungsanlage vorliegen. Da einige Bauteile der Abgasnachbehandlungsanlage Verschleißteile (z.B. Ventile zur Dosierung des Harnstoffs) sind, sind Defekte nach einer bestimmten Laufleistung zwangsläufig. Der Austausch dieser

Teile wäre mit Kosten verbunden, die höher sind als z.B. die Anschaffung eines AdBlue-Emulators. Die kostengünstigste und schnellste Art, um das Fahrzeug wieder auf die Straße zu schicken, ist demnach die Deaktivierung der Abgasnachbehandlung (Pöhler/Engel 2018: 39).

Die Verwendung von AdBlue zur Abgasreinigung ist ein zusätzlicher Kostenfaktor für die Fuhrparkbetreiber. Dies beinhaltet nicht nur die laufenden Kosten für das AdBlue selbst, sondern auch die Wartungskosten, die durch den Verschleiß am SCR-System selbst entstehen. Der Preis für einen Liter AdBlue unterscheidet sich stark danach, wann und wo das AdBlue nachgefüllt wird. AdBlue wird in Baumärkten, KFZ-Zubehörläden, Tankstellen, Werkstätten und mittlerweile auch bei Discountern angeboten. Der Literpreis unterliegt starken Schwankungen – größere Gebinde oder „lose Ware“ in Werkstätten und Tankstellen sind oft preisgünstiger. In der Literatur wird von Literpreisen zwischen € 0,50 bis zu € 3,70 gesprochen (ADAC 2020b: online, Schodl 2019: 26, Pöhler /Engel 2018: 6).

Der AdBlue-Verbrauch ist abhängig vom Fahrstil und der Jahresfahrleistung und macht zwischen 3-10 % des Dieserverbrauchs aus (Schodl 2019: 26). In der Tabelle 7 wird ein beispielhafter Überblick über die möglichen Kosten, die bei einem Fuhrparkbetreiber entstehen könnten, gegeben. Dazu wurden die schweren Nutzfahrzeuge in vier Klassen unterteilt und für den Kraftstoffverbrauch und die Jahresfahrleistung (JFL) je Fahrzeugklasse Durchschnittswerte angenommen (UBA 2019b: online). Weil die Meinungen in der Literatur auseinander gehen, wurden für den AdBlue Verbrauch sowohl 3 %, 5 % wie auch 10 % des Kraftstoffverbrauchs dargestellt. Für die Berechnung der Kosten wurde ein Literpreis von € 0,60 pro Liter gewählt (Pöhler/Engel 2018: 6).

Tabelle 7: Jährliche AdBlue-Kosten für ein schweres Nutzfahrzeug nach LKW-Klasse anhand eines Beispiels

LKW-Klasse	Ø JFL [km/a]	Ø-Kraftstoff- verbrauch [l/100 km]	AdBlue Verbrauch bei			Kosten für AdBlue pro Jahr		
			unterschiedlichen Volumens- anteilen am Kraftstoffverbrauch			bei einem Anteil von		
			[l/100km]			[€]		
			3 %	5 %	10 %	3 %	5 %	10 %
LKW (<18t)	89.900	19,4	0,58	0,97	1,94	314	523	1.046
LKW (>18t)	66.900	31,2	0,94	1,56	3,12	376	626	1.252
Sattelzüge	76.900	34,3	1,03	1,72	3,43	475	791	1.583
Durchschnitt	74.500	29,6	0,89	1,48	2,96	397	662	1.323

Quelle: Pöhler/Engel 2018; UBA 2019b: online

Das Rechenbeispiel zeigt die jährlichen laufenden AdBlue-Kosten für ein schweres Nutzfahrzeug auf. Dabei wird nach drei Klassen unterschieden: Fahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse (zGM) <18 t, Fahrzeuge mit einer zGM >18 t und Sattelzüge, welche eine zGM bis zu 40 t erreichen dürfen. Unter den gegebenen Annahmen belaufen sich die jährlichen Kosten für ein durchschnittliches schweres Nutzfahrzeug für das AdBlue bei einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch und durchschnittlicher Fahrleistung zwischen € 397 und € 1.323. Bei einem Sattelzug liegen diese Kosten aufgrund der höheren Verbrauchswerte darüber und bei Fahrzeugen mit einer zGM <18 t sind diese am geringsten. Ein Fuhrparkbetreiber könnte sich demnach bei jedem manipulierten Fahrzeug je nach Klasse jährlich zwischen € 1.000 bis € 1.600 an AdBlue-Kosten ersparen. Bei diesen Werten wird jedoch die Kostenersparnis, die durch die Anschaffung eines Emulators anstelle einer Reparatur entsteht, nicht berücksichtigt.

7.4 Manipulation der AdBlue-Einspritzung durch elektronische Emulatoren bei Diesel-LKW

Im Jahr 2017 wurden erste Berichte veröffentlicht, die berichteten, dass LKW auf deutschen Autobahnen die NO_x-Emissionsgrenzwerte um ein Vielfaches überschreiten. Es wurde der Verdacht geäußert, dass die erhöhten Emissionen auf Grund von Manipulationen der Abgasnachbehandlung zu Stande kommen. Die NO_x-Grenzwerte für LKW der Schadstoffklasse EURO V und VI belaufen sich auf 2.000 und 400 mg/kWh, welche sich bei einer vorliegenden Manipulation deutlich erhöhen. In der Studie von Pöhler und Engel (2018: 19) konnte festgestellt werden, dass manipulierte EURO V-Fahrzeuge ihren Grenzwert um den Faktor 2,5 und manipulierte EURO VI-Fahrzeuge ihren Grenzwert um den Faktor 4 überschritten.

Eine Möglichkeit, um die Abgasnachbehandlung und die AdBlue-Dosiereinheit zu manipulieren, ist der Einbau eines AdBlue-Emulators. Es handelt sich dabei um ein kleines elektronisches Bauteil, welches in die Bordelektronik eines LKW eingebaut werden kann. Der Emulator greift in die Kommunikation zwischen der Abgasnachbehandlungsanlage ein und täuscht dem Boardcomputer volle Funktionalität der Abgasnachbehandlungsanlage vor, während diese entweder ausgeschaltet oder sogar gänzlich ausgebaut wurde. Diese Bauteile sind im Internet frei verfügbar und können für wenig Geld (zwischen € 40 - € 130) erworben werden. Eine weitere Möglichkeit der Manipulation ist der Einbau von Widerständen in der Temperatursensorik. Da AdBlue bei etwa -11 °C zu kristallisieren beginnt, wurden standardmäßig Abschaltvorrichtungen eingebaut, um den Motor vor Beschädigungen zu schützen. Bei einer Manipulation der Temperatursensorik werden dem System extrem tiefe Temperaturen vorgetäuscht, wodurch die Abschaltvorrichtung aktiviert wird. (Baumann 2019: online)

Ein verbauter AdBlue-Emulator kann bei einer Verkehrskontrolle nur schwer gefunden werden, da er mittlerweile dem Format einer Streichholzschachtel entspricht. Ein Emulator kann überall im LKW versteckt werden und braucht lediglich eine Verbindung zum Kabelstrang oder Sicherungskasten (Pöhler/Engel 2018: 7). Manipulationen können oftmals nur in einer Fachwerkstatt nachgewiesen werden und können sogar ein komplettes Zerlegen des LKW voraussetzen und für den Nachweis einer softwareseitigen Manipulation benötigt es bestimmte Auslesegeräte. Wenn eine Manipulation nachgewiesen werden kann, dann erlischt die Betriebserlaubnis und die Garantie für diesen LKW. (Baumann 2019: online)

Während in Deutschland bei einem begründeten Verdacht eine sofortige Überprüfung in einer Fachwerkstatt angeordnet werden darf, fällt in Österreich die Manipulation von Abgasnachbehandlungsanlagen in den Bereich des Verwaltungsrechts. Somit sind Maßnahmen wie in Deutschland nicht möglich. (Schodl 2019: 28)

Um den Verdacht der Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlagen zu bestätigen wurden in den Studien von Pöhler und Adler (2017) und Pöhler und Engel (2018) das tatsächliche Emissionsverhalten im Fließverkehr nach dem „Plume Chasing“ Verfahren geprüft. Generell gibt es drei unterschiedlichen Methoden, um die Emissionen im Fließverkehr zu messen (Schodl 2019: 26):

1. Portable Emission Measurement System (PEMS)

Die Messung mittels PEMS ist die genaueste Methode um die Emissionen festzustellen. Das PEMS wird direkt am Heck und ein Trichter am Auspuff befestigt. Die Abgase werden somit direkt in das PEMS geleitet und auf ihren Schadstoffgehalt analysiert. Diese Methode liefert zwar sehr genaue Ergebnisse, ist aber sehr aufwendig, was darin resultiert, dass nur wenige Fahrzeuge pro Tag vermessen werden können.

2. Sniffing/Plume Chasing

Beim Plume Chasing wird mithilfe eines Messfahrzeuges direkt hinter dem begutachteten Fahrzeug hergefahren. An der Messfahrzeugfront ist eine Messsonde montiert, die die Abgase untersucht. Die NO_x-Emissionen von manipulierten Fahrzeugen unterscheiden sich in der Regel so stark, dass eine Identifikation leicht möglich ist. Auch die Zuordnung der einzelnen Fahrzeuge zu einer EURO-Klasse ist in den meisten Fällen möglich. Diese Methode ist etwas ungenauer, da oftmals nicht nur ein LKW auf der Straße unterwegs ist, jedoch können auf diese Art und Weise mehrere Fahrzeuge pro Tag überprüft werden.

3. Remote Sensing Device (RSD)

Bei der RSD Messmethode werden die Schadstoffe CO, CO₂, NO, NO₂ und PM gemessen. Wenn ein Fahrzeug das RSD passiert, wird die Abgasfahne mittels optischer Absorptionsspektroskopie⁵⁴ analysiert. Die Zuordnung zu einer EURO-Klasse ist bei dieser Methode deutlich schwieriger, jedoch kann mit dieser Methode eine große Anzahl an Fahrzeugen pro Tag vermessen werden. (Gruening et al. 2019: 4)

Damit eine aussagekräftige Messung durchgeführt werden kann, muss bei der Wahl der Messstrecke auf eine geeignete Streckentopographie geachtet werden. Eine optimale Messstrecke verläuft nahezu eben oder mit einer moderaten Steigung. Lange Bergab-Passagen oder Straßenabschnitte mit extremer Steigung eignen sich nicht als Messstrecken, da die LKW dort entweder im Schubbetrieb unterwegs sind bzw. Maximalleistungen erbringen müssen. Bei einem Kaltstart sowie im Stadtverkehr oder Fahrten auf Landstraßen treten oftmals erhöhte Emissionen auf. Daher eignen sich Autobahnabschnitte am besten, um eine Abgasnachbehandlungsanlage auf ihre Funktionalität zu prüfen. (Pöhler/Engel 2018: 9)

⁵⁴ Absorptionsspektroskopie ist ein Verfahren zur Bestimmung der Spektren von Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern durch Messung der Absorption, die eingestrahktes Licht beim Durchgang durch die Substanz erfährt. (Spektrum.de 2021)

8 Grundlagen für die Ermittlung der Verkehrsteilnahme manipulierter schwerer Nutzfahrzeuge in Österreich

Ob und in welchem Ausmaß Manipulationen an LKW-Abgasanlagen von Fahrzeugen, die auf österreichischen Straßen verkehren, durchgeführt werden, kann nicht mit letzter Sicherheit beantwortet werden. Dessen ungeachtet sollen die Kapitel 8 und 9 einen Einblick in die Auswirkungen, die eine Manipulation nach sich ziehen würde, geben. In Kapitel 8 werden zum einen die Ergebnisse zweier Studien, welche die Verkehrsteilnahme manipulierter LKW untersuchten, zusammengefasst und zum anderen werden die Grundlagen für die späteren Berechnungen in Kapitel 9 detailliert dargestellt.

8.1 Auswertungen von Studien über die Verkehrsteilnahme manipulierter schwerer Nutzfahrzeuge

Durch die Verkehrsteilnahme von manipulierten schweren Nutzfahrzeugen kann ein Schaden aufgrund von NO_x-Mehremissionen erwartet werden, wie die Studien von Pöhler und Adler (2017) sowie Pöhler und Engel (2018) darlegen.

Das Ziel dieser beiden Studien war es, einen Eindruck über das Ausmaß von Manipulationen von in- wie auch ausländischen schweren Nutzfahrzeugen zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurde eine zufällig ausgewählte Stichprobe von schweren Nutzfahrzeugen auf Autobahnabschnitten in Deutschland und Österreich (Tirol) und deren NO_x-Emissionen mittels eines Plume-Chasing-Messverfahrens unter realen Verkehrsbedingungen überprüft. Anhand dieser Messdaten wurde auf die Rate möglicher Abgasmanipulationen durch AdBlue-Emulatoren in der Stichprobe geschlossen. (Pöhler/Adler 2017: 5; Pöhler/Engel 2018: 3)

Konkret wurde für die Messung der LKW-Emissionen das an der Universität Heidelberg entwickelte NO_x/CO₂ ICAD-Messgerät verwendet, um die CO₂- und NO_x-Konzentration in der Abgasfahne des überprüften LKW zu bestimmen. Die Messung beider Schadstoffe hat folgenden Vorteil: Das Verhältnis beider Gase ist unabhängig von der Verdünnung und Ausbreitung der Abgasfahne, wodurch eine Bestimmung der NO_x-Emissionen für jeden Messpunkt möglich wird. Daraus resultiert eine hohe Genauigkeit der gemessenen Werte. Wenn es also zu erhöhten NO_x-Emissionen bei einem Fahrzeug kommt, kann mithilfe der gemessenen CO₂-Emissionen rückgeschlossen werden, ob es sich bei der Ursache um eine defekte Abgasnachbehandlungsanlage oder eine erhöhte Motorleistung handelt. (Pöhler/Adler 2017: 25ff; Pöhler/Engel 2018: 7f)

Zusätzlich wurde bei der Messung darauf geachtet, eine geeignete Teststrecke auszuwählen. Dabei galt es, die Streckentopographie zu berücksichtigen. Idealerweise sollte der Streckenabschnitt eine Steigung aufweisen – wenngleich diese eher gering ausfallen sollte, um keine zu hohe Motorlast zu verursachen – und nicht direkt an eine lange Bergab-Passage anschließen. Sollte Letzteres im Untersuchungsfall nicht gegeben sein, darf die Messung nicht unweigerlich nach der Bergab-Passage starten. Der Grund hierfür liegt darin, dass während einer Bergabfahrt der Motor kaum Arbeit verrichten muss und die Temperaturen im Motor sowie der Abgasnachbehandlungsanlage daher absinken. Da ein Einspritzen des Harnstoffes bei diesen Temperaturen zu Schäden in dem System führen kann, ist es werkseitig vorgesehen, dass das AdBlue erst wieder nach Erreichen der Betriebstemperatur zugeführt wird. Daher sollte erst dann eine Messung vorgenommen werden, um aussagekräftige Messdaten zu erhalten. (Pöhler/Engel 2018: 9)

Im Jahr 2017 wurden insgesamt 254 LKW untersucht, wobei aus verschiedenen Gründen nur 128 verwertbare Ergebnisse aufwiesen. Im darauffolgenden Jahr konnten in Österreich Emissionswerte von 215 LKW gemessen und daraus 185 verwertbare Ergebnisse gesammelt werden. Bei der Untersuchung wurde anhand äußerer Merkmale (EURO-Kennzeichnung, AdBlue Tank mit blauem Deckel, EEV Kennzeichnung, ...) die Zuweisung der untersuchten LKW zu einer EURO-Klasse vorgenommen. Ergebnis dieser Studien war, dass im Jahr 2017 bei 19 % (24 von 128 Fahrzeugen) und 2018 bei 27 % (50 von 185 Fahrzeugen) der beobachteten LKW Überschreitungen der NO_x-Emissionsgrenzwerte festgestellt werden konnten. Dabei handelte es sich hauptsächlich um Fahrzeuge der Schadstoffklassen EURO IV bis VI, wobei der Anteil der EURO IV-Fahrzeuge mit vier und zwei gemessenen Ergebnissen sehr gering war. (Pöhler/Adler 2017: 32, 78, Pöhler/Engel 2018: 12f)

Bei der Interpretation beider Studienergebnisse ist es wichtig zu beachten, dass der für die Studien definierte Grenzwert für die NO_x-Emissionen sich aus dem Grenzwert der EURO-Abgasnorm plus einer Toleranz von 1000 mg/kWh zusammensetzt. Konkret bedeutet das, dass im Falle eines EURO VI-Fahrzeuges nicht lediglich der Grenzwert aus der EURO-Abgasnorm von 400 mg/kWh, sondern ein Grenzwert von 1400 mg/kWh eingehalten werden muss, um in der Studie als werkskonformes schweres Nutzfahrzeug eingestuft zu werden. Bei jenem Anteil von Fahrzeugen, für den eine Grenzwertüberschreitung entsprechend den obigen Kriterien festgestellt wurde, wurde eine durchschnittliche NO_x-Schadstoffkonzentration von 5282 mg/kWh bei EURO V-Fahrzeugen und 2560 mg/kWh bei EURO VI-Fahrzeugen ermittelt – das ist eine durchschnittliche Überschreitung um einen Faktor 2,6 bei EURO V-Fahrzeugen bzw. 6,4 bei EURO VI-Fahrzeugen. (Pöhler/Adler 2017: 78, Pöhler/Engel 2018: 40)

In den Histogrammen in Abbildung 4 wird die Anzahl jener schweren Nutzfahrzeuge dargestellt, deren gemessene NO_x-Emissionskonzentration innerhalb der zwölf Emissionsintervalle liegt. Zudem wird in Abbildung 4 ersichtlich, bei welcher NO_x-Konzentration der Grenzwert in der EURO-Abgasnorm und in der Studie von Pöhler und Engel (2018) festgelegt wird. Für die vorliegende Diplomarbeit wurde auf Basis der Studie von Pöhler und Engel (2018) eine Bandbreite der Verschlechterung für manipulierte schwere Nutzfahrzeuge errechnet. Diese Bandbreite ist in Abbildung 4 durch eine rote Umrandung gekennzeichnet. Für EURO V-Fahrzeuge wurde eine Bandbreite für die Verschlechterung bei den festgestellten NO_x-Emissionen von 1,25 bis 3 und für EURO VI-Fahrzeuge eine Bandbreite der festgestellten NO_x-Emissionen von 1,33 bis 6,67 festgelegt. Das bedeutet, dass einige der untersuchten EURO VI-Fahrzeuge ihren Grenzwert beinahe um das 7-fache überschreiten.

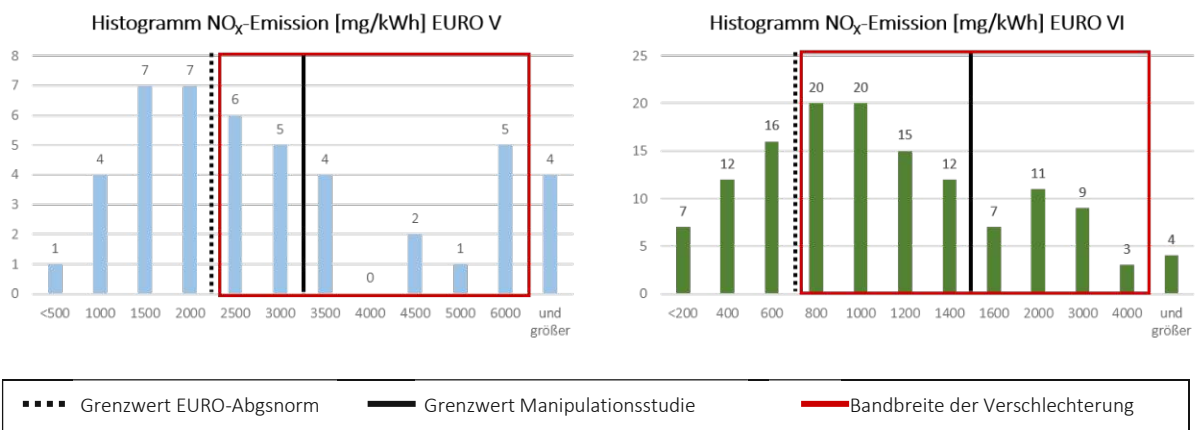


Abbildung 4: Verteilung der Emissionsmittelwerte für die Schadstoffklassen EURO V und VI. Anzahl der Fahrzeuge je NO_x Emissionsintervall (Pöhler/Engel 2018: 18)

Bei der Darstellung der Messergebnisse wird deutlich, dass es im Realbetrieb durchaus Fahrzeuge gibt, die den Grenzwert laut EURO-Abgasnorm unterschreiten. Dies wiederum lässt die gemessenen Überschreitungen der festgelegten Grenzwerte, die eine Toleranz von 1000 mg/kWh inkludieren, umso drastischer wirken. Die Ergebnisse dieser Studie (Pöhler/Engel 2018) und die festgelegten Bandbreiten bilden die Grundlage für das Manipulationsszenario in Kapitel 9.3.2.

8.2 Statistische Datengrundlagen

Für die Berechnung des NO_x-Einsparungspotenzials und der NO_x-Mehremissionen wurden die Daten aus dem Jahr 2018 herangezogen, da es zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieser Diplomarbeit für dieses Jahr die meisten und vollständigsten Daten gab. Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass die Berechnungen auf jedes beliebige Jahr umgelegt werden können, sofern die Daten zur Verfügung stehen. Für die Berechnungen wird auf die jährliche Transportleistung des Straßengüterverkehrs zurückgegriffen sowie auf die Anteile der EURO-Klassen an der gesamten Transportleistung.

Die Transportleistung im österreichischen Straßengüterverkehr im Basisjahr 2018 wird in der Tabelle 8 dargestellt (Karner et al. 2019: 20). Bei dieser Statistik werden ausschließlich Fahrzeuge mit einem höchst zulässigen Gesamtgewicht größer 3,5 t herangezogen (Karner et al. 2020: 299).

Tabelle 8: Transportleistung im österreichischen Straßengüterverkehr im Jahr 2018

Transportleistung im Inland in 1.000 tkm	Straße (österr. FZG)	Straße (ausl. FZG) ¹⁾	Drittstaaten ²⁾	Summe
Inlandverkehr	16.393.030	1.351.279	17.000	17.761.309
Grenzüberschr. Empfang	971.335	7.448.751	161.000	8.581.086
Grenzüberschr. Versand	1.122.707	6 248 079	169.000	7.539.786
Transitverkehr	106.536	16 317 382	1.561.000	17.984.918
Insgesamt	18.593.608	31.365.491	1.908.000	51.867.099

Quelle: Karner et al. 2019: 27

1) EU(28) ohne Malta zuzüglich Norwegen, der Schweiz und Liechtenstein

2) Alle Staaten, die kein Mitglied der EU sind

Ergänzend zu der Transportleistung wurde die Verteilung der am Straßengüterverkehr teilnehmenden schweren Nutzfahrzeuge nach EURO-Klassen für das Basisjahr 2018 herangezogen. Dadurch konnten ebenfalls der geringe Anteil an Fahrzeugen der Schadstoffklasse EURO III und niedriger und deren spezifische Emissionsfaktoren mitberücksichtigt werden. Die Anteile der EURO-Klassen EURO V und EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle) werden im Weiteren zusammengefasst, da sie in Bezug auf die NO_x-Emissionen dieselben Grenzwerte aufweisen. Im Jahr 2018 wurden bereits 93,4 % der gesamten Transportleistung von Fahrzeugen der Schadstoffklassen EURO V (inkl. EEV) und EURO VI transportiert. Die Verteilung der Transportleistung auf die Schadstoffklassen wird in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Anteile der EURO-Klassen an der Gesamtfahrleistung von LKW auf Autobahnen und Schnellstraßen im Jahr 2018

Euro-Klassen	Anteile an der Transportleistung in %
EURO 0-III	4,4
EURO IV	2,3
EURO V (+EEV)	26,3
EURO VI	67,1

Quelle: WKO 2019: 59

Für die Berechnungen in Kapitel 9 wird die Unterteilung der Transportleistung auf die Verkehrsbereiche und Herkunftsländer nicht mehr berücksichtigt. Es muss jedoch beachtet werden, dass keine genauen Erhebungen von Drittstaaten verfügbar sind, was wiederum bedingt, dass keine Informationen darüber gegeben werden kann, welchen Anteil die Fahrzeuge aus Drittstaaten an den jährlichen Schadstoffemissionen in Österreich haben. Außerdem konnte keine Annahme darüber getroffen werden an welchen Schadstoff-Grenzwerten sich die Fahrzeuge aus Drittstaaten orientieren. Für die weiteren Berechnungen wurde der Anteil der EURO V (inkl. EEV) und EURO VI-Fahrzeuge an der gesamten Transportleistung herangezogen. Diese belaufen sich auf 48,4 Mrd. tkm. Die konkreten Szenarien, Berechnungsschritte und Ergebnisse werden im Kapitel 9 dargestellt und interpretiert.

9 Ermittlung der Stickoxid-Einsparungspotenziale und -Mehremissionen

Das im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit entwickelte Modell baut auf zwei Ansätzen zur Beantwortung der Forschungsfragen auf. Zur Abschätzung des Reduktionsbeitrages, der durch die Einführung sowie Verschärfung der EURO-Klassen erzielt werden konnte, wurden das Referenz- und das Basisszenario definiert (Forschungsfrage 1: Ermittlung des Einsparungspotenzials).

Für die Abschätzung der NO_x-Mehremissionen, welche aufgrund einer Manipulation zu erwarten sind, wurden das OLI- und Manipulationsszenario umgesetzt (Forschungsfrage 2: Ermittlung der NO_x-Mehremissionen). Da der Literatur leider kein EURO-Klassen spezifischer Emissionsfaktor (g NO_x/tkm) entnommen werden kann, welcher geeignet wäre, um beide Forschungsfragen gleichermaßen beantworten zu können, musste auf zwei Ansätze zurückgegriffen werden. Diese werden im Folgenden genauer beschrieben.

9.1 Grundlagen für die Szenarienbildung

Zur Beantwortung der Frage, wie sich eine Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlage auf die jährlich ausgestoßenen NO_x-Emissionen im österreichischen Straßengüterverkehr auswirken kann, muss zunächst die Berechnungsmethode für die jährlichen Emissionen betrachtet werden. Im Fall von großen Industrieanlagen und Kraftwerken können die jährlichen Emissionen direkt gemessen und in die Österreichische Luftschadstoffinventur (OLI) übernommen werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch bei unzähligen kleinen Flächenemittenten, wie Haushalte, Verkehrsteilnehmer etc., nicht möglich. Hierfür werden verallgemeinerte Ergebnisse aus Einzelmessungen, auch Emissionsfaktoren genannt, herangezogen. Diese werden mittels statistischer Hilfsgrößen in Rechenmodellen auf die jährlichen Emissionen je Sektor hochgerechnet. (Anderl et al. 2020c: 11) Die Emissionsfaktoren sowie die gängigen Rechenmodelle zur Emissionsberechnung (z.B. NEMO, siehe auch Kapitel 2.4) unterliegen einem ständigen Wandel und werden laufend verbessert und aktualisiert.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde zur Darstellung einer groben Größenordnung dessen, wie viel NO_x-Mehremissionen durch die Verkehrsteilnahme von manipulierten schweren Nutzfahrzeugen verursacht werden, zunächst eine Modellierung der österreichweiten NO_x-Emissionen des Straßengüterverkehrs erstellt. Dazu wurden vier Szenarien definiert, um die Wirkung der EURO-Abgasnormen sowie einer Manipulation der AdBlue-Abgasnachbehandlung abschätzen zu können. Für die Modellierung konnte jedoch nicht ausschließlich auf die in der OLI verwendeten

Emissionsfaktoren zurückgegriffen werden, da es sich bei den publizierten Werten lediglich um Durchschnittswerte nach Gewichtsklassen und Auslastungsgraden handelt.

Für die Ermittlung des NO_x-Einsparungspotenzials wurde daher

- a) auf eigene Berechnungen zu den Emissionsfaktoren differenziert nach EURO-Klasse sowie
- b) auf die jährliche Transportleistung in- und ausländischer schwerer Nutzfahrzeuge auf österreichischen Straßen zurückgegriffen.

Auf eine Berechnung der NO_x-Emissionen über den Top-Down Ansatz (Kraftstoffverbrauch) wurde in der vorliegenden Diplomarbeit verzichtet, da es aufgrund der Fragestellung in der Modellierung nicht notwendig war, Off-Road-Fahrzeuge sowie den Tanktourismus zu berücksichtigen. Es wird angenommen, dass bei Off-Road-Fahrzeugen keine Manipulation der Abgasnachbehandlung mit AdBlue vorgenommen wird und somit sind diese Fahrzeuge außerhalb der Forschungsfrage.

Den vier Szenarien gemein ist dabei die Annahme, dass die auf den österreichischen Straßen verkehrenden schweren Nutzfahrzeuge nicht stets die jeweiligen Grenzwerte ausreizen (Pöhler/Engel 2018: 18). Die Ergebnisse des **Referenz- und Basisszenarios** dienen der Darstellung des Einsparungspotenzials, welches durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und EURO VI generiert wurde.

Das **OLI- und Manipulationsszenario** dienen der Berechnung der NO_x-Mehremissionen, die durch die Manipulation von AdBlue Abgasnachbehandlungsanlagen entstehen. Dazu wurde mit Hilfe der dokumentierten NO_x-Emissionen der Manipulationsstudien (Pöhler/Adler 2017, Pöhler/Engel 2018) und deren festgestellter Verteilungskurve die Bandbreite der Verschlechterung spezifischer NO_x-Emissionen ermittelt. Dieser Vergleich dient der Berechnung minimaler und maximaler Mehremissionen durch manipulierte EURO V- und VI-Fahrzeuge.

Für die Abschätzung des Reduktionsbeitrages der Einführung und Verschärfung der EURO-Klassen wurden spezifische Emissionsfaktoren nach EURO-Klassen ermittelt, während für die Abschätzung der NO_x-Mehremissionen auf den vom UBA (2018a: online) publizierten durchschnittlichen spezifischen Emissionsfaktor zurückgegriffen werden konnte. Diesem methodischen Unterschied in der Szenariengestaltung zur Ermittlung der beiden Forschungsfragen ist es geschuldet, dass ein Vergleich zwischen den Szenarien mit Bedacht vorgenommen werden muss.

9.2 Ermittlung des Stickoxid-Einsparungspotenzials durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI

Der Vergleich des Referenzszenarios mit dem Basisszenario ergibt das theoretische Einsparungspotenzial und dient der Beantwortung der ersten Forschungsfrage. Im Basisszenario wird das reduzierte Emissionsniveau durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI abgebildet. Die Ergebnisse der Berechnung werden im Kapitel 9.2.5 detailliert angeführt.

Die Ermittlung der jährlichen NO_x-Emissionen erfolgt– vereinfacht gesagt – durch die Multiplikation der Jahresfahrleistung mit dem NO_x-Emissionsfaktor. Im Falle des Referenzszenarios kann jedoch nicht der aktuell gültige NO_x-Emissionsfaktor herangezogen werden, da dieser die Verkehrsteilnahme von Fahrzeugen der Schadstoffklassen EURO V und EURO VI mitberücksichtigt. Aus diesem Grund wurden im ersten Schritt die spezifischen NO_x-Emissionsfaktoren je EURO-Klasse ermittelt.

9.2.1 Berechnung der spezifischen Stickoxid-Emissionsfaktoren

Für die Berechnung der NO_x-Emissionen des Straßengüterverkehrs in Österreich ist es nicht plausibel anzunehmen, dass alle Fahrzeuge einer EURO-Klasse stets die erlaubten NO_x-Emissionsgrenzwerte erreichen. Stattdessen werden die NO_x-Emissionen einiger Fahrzeuge einer EURO-Klasse deutlich unter den festgelegten Grenzwerten und einige am oberen Rand dieser liegen. Das liegt unter anderem an den vielfältigen Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch und somit auch auf die Emissionswerte im Abgas, wie etwa Wind- und Witterungsverhältnisse sowie Längsneigung etc. (siehe auch Kapitel 2.4). Aus diesem Grund wurde eine Verteilung für die Emissionswerte von Fahrzeugen einer EURO-Klasse angenommen. Diese angenommene Verteilung orientiert sich an der Verteilung, welche im Rahmen der Studie von Pöhler und Engel (2018) bei ihren Abgasmessungen festgestellt wurde (siehe Abbildung 4). In einem ersten Schritt werden anhand dieser Verteilung die durchschnittlichen spezifischen NO_x-Emissionen je EURO-Klasse errechnet.

In einem zweiten Schritt werden die spezifischen NO_x-Emissionsfaktoren je Schadstoffklasse ermittelt. Dafür werden die NO_x-Grenzwerte der EURO-Abgasnormen [mg/kWh] herangezogen. Um aus diesen Werten eine fahrleistungsabhängige Variable [g/tkm] zu erhalten, werden folgende Daten benötigt:

1. der durchschnittliche Treibstoffverbrauch [30,2 l/100 FZG-km] (UBA 2018b: online)
2. spezifischen Energiedichte des Kraftstoffes Tankstellendiesel von 9,8 kWh/l (Chemie.de o.J.: online)
3. die durchschnittliche Beladung von 10,35 t (UBA 2018a: online)

Aus diesen Werten ergibt sich ein **durchschnittlicher Energiewert von 0,29 kWh/tkm**. Die Multiplikation des rechnerischen Durchschnittswertes der spezifischen NO_x-Emissionen je EURO-Klasse mit dem durchschnittlichen Energiewert ergibt den spezifischen NO_x-Emissionsfaktoren je EURO-Klasse. In der Tabelle 10 werden die errechneten spezifischen NO_x-Emissionsfaktoren dargestellt.

Tabelle 10: Spezifische NO_x-Emissionsfaktoren je EURO-Klasse

EURO-Klassen der Fahrzeuge	NO _x -Emissionsgrenzwerte [mg/kWh]	rechnerischer Durchschnittswert der spez. NO _x -Emissionen [mg/kWh]	Spezifische NO _x -Emissionsfaktoren [g/tkm]
EURO III	5000	3614,29	1,03
EURO IV	3500	2530	0,72
EURO V	2000	1526,32	0,44
EURO VI	400	451,43	0,13

Quelle: Pöhler/Engel 2018; UBA 2018a: online, eigene Berechnungen

9.2.2 Referenzszenario

Die Reduktion von NO_x-Emissionen wurde durch die Einführung der EURO-Abgasnormen vorangetrieben. Fahrzeuge höherer (späterer) EURO-Abgasnormen müssen, um den europäischen Vorgaben zu entsprechen, geringere Schadstoffemissionen in ihren Abgasen aufweisen. Demnach stellen die Einführungen neuer EURO-Abgasnormen wichtige Meilensteine in der sukzessiven Reduktion der NO_x-Emissionen des Straßengüterverkehrs dar. Eine besondere Bedeutung nimmt im Kontext der vorliegenden Fragestellung die Einführung der Schadstoffklasse EURO V und VI ein, da Fahrzeuge dieser EURO-Klassen bei Manipulation der AdBlue-Abgasnachbehandlung auf das NO_x-Abgasniveau von Fahrzeugen der Schadstoffklasse EURO IV und niedriger zurückfallen können (Pöhler/Engel 2018: 19).

Hätte die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI nicht stattgefunden, müssten bis zum heutigen Tag die NO_x-Emissionen im Straßengüterverkehr entsprechend der Zunahme des Verkehrsaufkommens gestiegen sein, die spezifischen NO_x-Emissionen eines schweren Nutzfahrzeuges der Schadstoffklasse EURO IV wären jedoch gleichgeblieben. Diese angenommene Situation soll durch das Referenzszenario abgebildet werden, welches somit auch die Ausgangslage für die Ermittlung des NO_x-Einsparungspotenzials darstellt.

9.2.3 Basisszenario

Das Basisszenario baut auf der im Jahr 2018 statistisch erhobenen Verteilung der Fahrzeugklassen im österreichischen Straßengüterverkehr und der nach eigener Berechnung ermittelten durchschnittlichen spezifischen NO_x-Emissionsfaktoren je Fahrzeugklasse auf Basis der

EURO-Grenzemissionswerte auf. Wie auch im Referenzszenario werden, unter der Zuhilfenahme der jährlichen Transportleistung je Fahrzeugklasse, die jährlichen NO_x-Emissionen, verursacht vom Straßengüterverkehr auf österreichischen Straßen, ermittelt. Dabei wird in diesem Szenario auch auf die Verteilung der am Straßengüterverkehr teilnehmenden schweren Nutzfahrzeuge nach EURO-Klassen für das Basisjahr 2018 zurückgegriffen (WKO 2019: 59) (siehe Tabelle 9).

9.2.4 Berechnung des theoretischen Einsparungspotenzials durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI

Für die Ermittlung des theoretischen Einsparungspotenzials werden das Referenz- und Basisszenario miteinander verglichen. Die Ermittlung des Einsparungspotenzials im Modell basiert auf folgender Berechnungsformel:

$$EP = T * \left(\sum_{EURO=0}^{IV} Ref (ESp_{EURO} * EF_{EURO}) - \sum_{EURO=0}^{VI} Basis (ESp_{EURO} * EF_{EURO}) \right)$$

EP	...	Emissionseinsparungspotenzial [g/Jahr] durch Einführung der Schadstoffklassen EURO V & VI
T	...	jährliche Transportleistung [tkm/Jahr]
ESp_{EURO}	...	Anteil der EURO-Klassen an der jährlichen Transportleistung [%]
EF_{EURO}	...	Emissionsfaktor [g/tkm] der EURO-Klasse

Die Berechnung zum Emissionsniveau in den Szenarien folgt der Logik, dass die Transportleistung aus dem Jahr 2018 nach EURO-Klassen differenziert und dann mit dem jeweiligen spezifischen Emissionsfaktor multipliziert wird. Im Anschluss werden die Werte aufsummiert. Im Falle des Referenzszenarios werden die Anteile der EURO V- und VI-Fahrzeuge zu den EURO IV-Fahrzeugen hinzuaddiert.

Es muss außerdem berücksichtigt werden, dass im Jahr 2018 nur 4,4 % der gesamten jährlichen Transportleistung von Fahrzeugen der Schadstoffklasse EURO III und niedriger durchgeführt wurden, für die Berechnungen jedoch nur der Emissionsfaktor für die Schadstoffklasse EURO III zur Verfügung steht. Da angenommen werden kann, dass der Emissionsfaktor Schadstoffklasse EURO 0-II vermutlich hoch ist, ist es durchaus möglich, dass die 4,4 % der Transportleistung stärker für die gesamte Emissionsbelastung verantwortlich sind als deren Anteil an der Transportleistung. Diese Unschärfe muss in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

9.2.5 Ergebnis Einsparungspotenzial

Für die Berechnung des Referenz- und Basisszenarios wurden die Anteile der EURO-Klassen an der gesamten Transportleistung mit den errechneten spezifischen Emissionsfaktoren je EURO-Klasse multipliziert und aufsummiert.

Für das Referenzszenario wurde eine Welt angenommen, in welcher keine schrittweise Verschärfung der Abgasnormen hinsichtlich des NO_x-Ausstoßes seitens der EU vorgeschrieben worden wäre. Das bedeutet, dass die gesamte jährliche Transportleistung nur von Fahrzeugen der Schadstoffklasse EURO IV und niedriger verrichtet wird. Dafür wurde zuerst der Anteil der EURO 0-III Fahrzeuge an der Transportleistung berechnet und mit dem errechneten spezifischen Emissionsfaktor multipliziert. Die restliche Transportleistung, welche sich heute auf die Schadstoffklassen EURO IV bis VI aufteilen würde, wird für das Referenzszenario ausschließlich mit dem spezifischen NO_x-Emissionsfaktor der EURO IV-Fahrzeuge multipliziert. Das ergibt ein jährliches NO_x-Emissionsniveau von **38.231 t**.

Für das Basisszenario wurde die Transportleistung auf alle EURO-Klassen (siehe Tabelle 9) verteilt – wie sie heute vorzufinden ist – und die Anteile mit den jeweiligen errechneten spezifischen Emissionsfaktoren multipliziert und aufsummiert. Dadurch ergibt sich ein jährliches NO_x-Emissionsniveau von **13.656 t**. Das theoretische Einsparungspotenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen den jährlichen NO_x-Emissionen aus dem Referenz- und dem Basisszenario und beläuft sich auf **24.575 t NO_x** pro Jahr. Die ermittelten jährlichen NO_x-Emissionen im Referenz- und Basisszenario sowie das Einsparungspotenzial können der Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11: Modellergebnisse für das theoretische Einsparungspotenzial

EURO-Klasse	Spezifischer NO _x -Emissionsfaktor [g/tkm]	Transportleistung [tkm]
EURO 0-III	1,03	2.282.152.324
EURO IV	0,72	
EURO V (inkl. EEV)	0,44	49.584.945.957
EURO VI	0,13	
Referenzszenario [NO_x t/a]		38.231
Basisszenario [NO_x t/a]		13.656
Einsparungspotenzial [NO_x t/a]		24.575

Quelle: WKO 2019: 59; Karner et al. 2019: 27, eigene Berechnungen auf Datenbasis Jahr 2018

Die Berechnung zeigt, dass die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI einen Rückgang der NO_x-Emissionen aus dem Straßengüterverkehr um 64 % ermöglichte. Damit kann diese Maßnahme als bedeutend für die Reduktion dieses Schadstoffes angesehen werden.

9.3 Ermittlung der Stickoxid-Mehremissionen durch die Verkehrsteilnahme manipulierter schwerer Nutzfahrzeuge

Auf Basis des OLI- und des Manipulationsszenarios werden die NO_x-Mehremissionen quantifiziert und können in Folge dem gesamten NO_x-Emissionsniveau sowie dem Einsparungspotenzial gegenübergestellt werden. Die Darstellung der NO_x-Mehremissionen erfolgt dabei durch die Ermittlung der jährlichen NO_x-Emissionen und der Verschlechterung dieser Werte durch die Manipulation (unter Annahme verschiedener Manipulationsraten) der EURO V- und VI-Fahrzeuge. Die Ergebnisse der Berechnung werden im Kapitel 9.3.4 detailliert angeführt.

9.3.1 OLI-Szenario

Für die Berechnung des OLI-Szenarios wird im Gegensatz zum Basisszenario der durchschnittliche NO_x-Emissionsfaktor – der den Ergebnissen der Österreichischen Luftschadstoffinventur (OLI) entnommen werden kann – herangezogen. Dieser Durchschnittswert der NO_x-Emissionsfaktoren für alle schweren Nutzfahrzeuge ($\geq 3,5$ t – 40 t) aus der OLI (UBA 2018a: online) wird in Folge mit der Transportleistung aus dem Jahr 2018 multipliziert. Das OLI-Szenario stellt also eine alternative Variante des Basisszenarios dar, welches sich lediglich hinsichtlich des angewandten Emissionsfaktors unterscheidet. Die darin abgebildete Verkehrssituation im Straßengüterverkehr (jährliche Transportleistung) ist mit jener des Basisszenarios ident. Die Verwendung unterschiedlicher Emissionsfaktoren resultiert in einer Differenz von rund 3.000 t NO_x zwischen dem Basis- und dem OLI-Szenario.

Das OLI-Szenario wurde erstellt, da – im Gegensatz zu den errechneten Emissionsfaktoren des Basisszenarios – der durchschnittliche NO_x-Emissionsfaktor der OLI eine Vielzahl an Einflussfaktoren mitberücksichtigt. Ein genauer Einblick in das Berechnungsmodell der OLI-Emissionsfaktoren war im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich.

9.3.2 Manipulationsszenario

Die Manipulation der AdBlue-Abgasnachbehandlung bei schweren Nutzfahrzeugen reduziert das theoretisch mögliche Einsparungspotenzial von NO_x-Emissionen, welches durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI erreicht werden konnte. Im Manipulationsszenario wird diesem Umstand Rechnung getragen und die NO_x-Mehremissionen, gegenüber dem theoretischen Einsparungspotenzial, dargestellt. Für die Gegenüberstellung wurden zum einen die errechneten jährlichen NO_x-Emissionen aus dem OLI-Szenario herangezogen, da sowohl im Manipulations- als auch im OLI-Szenario dieselbe methodische Herangehensweise hinsichtlich des Emissionsfaktors

verwendet wurde. Zum anderen wurden die NO_x-Mehremissionen dem errechneten theoretischen Einsparungspotenzial gegenübergestellt, um einen Eindruck über die möglichen Einsparungsverluste durch Manipulation vermitteln zu können. Dieses Szenario soll zudem aufzeigen, wie sich die NO_x-Mehremissionen verändern, wenn von verschiedenen Manipulationsraten (Anteil manipulierter schwerer Nutzfahrzeuge) bei den am österreichischen Straßengüterverkehr teilnehmenden EURO V- und VI-Fahrzeugen sowie einer Bandbreite bei der Verschlechterung der spezifischen NO_x-Emissionen ausgegangen wird.

Dabei wird auf Basis der Studie von Pöhler und Engel (2018: 12) angenommen, dass 27% der erbrachten Transportleistung auf österreichischen Straßen durch manipulierte Fahrzeuge erfolgt. Obwohl in Kapitel 7.3 dargelegt wurde, dass die Manipulation der AdBlue-Abgasnachbehandlungsanlagen erst nach einer gewissen Laufleistung wahrscheinlich ist, wird im Manipulationsszenario darauf verzichtet die Annahme abzuleiten, dass vorwiegend Fahrzeuge im Langstreckenverkehr manipuliert werden.

Dies ist dem Umstand geschuldet, dass bei der beobachteten Manipulationsrate in der Studie von Pöhler und Engel (2018) nur eine zufällige Stichprobe von Fahrzeugen herangezogen wurde und keine Unterscheidung zwischen Kurz- und Langstreckenverkehr vorgenommen wurde. Es kann folglich nicht differenziert werden, ob und wie stark sich die Manipulationsrate bei schweren Nutzfahrzeugen im Langstreckenverkehr im Vergleich zu schweren Nutzfahrzeugen der Schadstoffklasse EURO V und VI generell unterscheidet.

Zudem wurde entsprechend den Erkenntnissen der Manipulationsstudien (Pöhler/Adler 2017, Pöhler/Engel 2018) eine Bandbreite der Verschlechterung für die spezifischen NO_x-Emissionen im Falle von EURO V-Fahrzeugen um einen Faktor 1,25 bis 3 und bei EURO VI-Fahrzeugen von 1,33 bis 6,67 angenommen. Diese Bandbreite basiert auf dem Histogramm aus der Studie von Pöhler und Engel (2018: 18, siehe Abbildung 4).

9.3.3 Berechnung der Stickoxid-Mehremissionen

Für die Ermittlung der NO_x-Mehremissionen, die aus einer Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlagen von schweren Nutzfahrzeugen der Schadstoffklassen EURO V und VI resultieren, wurden das OLI- und das Manipulationsszenario miteinander verglichen. Die Ermittlung der NO_x-Mehremissionen erfolgt mit folgender Berechnungsformel:

$$ME_{EURO,min} = (V_{min} - 1) * E_{Euro}$$

und

$$ME_{EURO,max} = (V_{max} - 1) * E_{Euro}$$

$ME_{EURO,max}$...	Mehremissionen durch manipulierte Fahrzeuge [t/Jahr]
E_{Euro}	...	Emissionen je EURO-Klasse [t/Jahr]
V_{min}	...	Faktor für mindeste Verschlechterung der Emissionen
V_{max}	...	Faktor für maximale Verschlechterung der Emissionen

Über die jährliche Transportleistung wurde mithilfe des durchschnittlichen Emissionsfaktors der OLI (0,21 g/tkm) für Fahrzeuge mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 3,5 t und größer (UBA 2018a: online) die ausgestoßenen NO_x-Emissionen des Jahres 2018 ausgerechnet. Daraus ergibt sich für die gesamte Transportleistung ein Ausmaß von 10.892 t NO_x. Von diesem Ergebnis ausgehend, konnten anhand der Verteilung der Transportleistung auf die EURO-Klassen (siehe Tabelle 9) die spezifischen NO_x-Emissionen, die durch Fahrzeuge der Schadstoffklasse EURO V und EURO VI ausgestoßen werden, dargestellt werden. Anhand der Manipulationsrate von 27 % (Pöhler/Engel 2018: 40) sowie der in Kapitel 8.1 festgelegten Bandbreite für eine Verschlechterung bei EURO V-Fahrzeugen (1,25 - 3) und EURO VI-Fahrzeugen (1,33 - 6,67) (Pöhler/Engel 2018: 18) können die NO_x-Mehremissionen berechnet werden.

Da die Bandbreiten für die Verschlechterung ausschließlich getrennt nach Fahrzeugklasse zur Verfügung standen, erfolgte die Ermittlung der NO_x-Mehremissionen in einem ersten Schritt ebenfalls getrennt nach EURO-Klassen. In einem zweiten Schritt wurden die nach EURO-Klasse gewichteten NO_x-Mehremissionen aufsummiert und im Anschluss den gesamten NO_x-Emissionen sowie dem errechneten theoretischen NO_x-Einsparungspotenzial gegenübergestellt.

9.3.4 Ergebnis Stickoxid-Mehremissionen

Für die Berechnung der NO_x-Mehremissionen werden folgende Werte herangezogen:

- Die jeweiligen Anteile der Schadstoffklassen EURO V und EURO VI an der gesamten Transportleistung (WKO 2019: 59)
- Die gesamten jährlichen NO_x-Emissionen
- Der durchschnittliche NO_x-Emissionsfaktor aus der OLI: 0,21 g/tkm (UBA 2018a: online)
- Die Verschlechterungsbandbreiten (Pöhler/Engel 2018: 18) (siehe Abbildung 4)
 - EURO V: 1,25 - 3
 - EURO VI: 1,33 - 6,67

Die NO_x-Mehremissionen durch manipulierte EURO V- und VI-Fahrzeuge wurden auf Basis des Manipulationsszenarios ermittelt. Ausgehend von einer Manipulationsrate von 27 % (Pöhler/Engel 2018: 40) sowie der festgelegten Bandbreite für eine Verschlechterung bei EURO V- und EURO VI-Fahrzeugen (Pöhler/Engel 2018: 18) werden die NO_x-Mehremissionen berechnet.

Wenn davon ausgegangen wird, dass 27 % der eingesetzten schweren Nutzfahrzeuge manipuliert sind, werden diese zusätzliche NO_x-Emissionen verursachen. Diese NO_x-Mehremissionen können – je nachdem, ob es sich bei den manipulierten Fahrzeugen um ein EURO V- oder EURO VI-Fahrzeug handelt – unterschiedlich hoch ausfallen. Wie der Verteilung der WKO (2019: 59) entnommen werden kann, werden 93,4 % der gesamten Transportleistung von Fahrzeugen der Schadstoffklassen EURO V und EURO VI verrichtet. Dies ergibt auf Basis der Daten aus dem Jahr 2018 eine Transportleistung von rund 48.4 Mrd. tkm. Dies ergibt NO_x-Emissionen in Höhe von 10.173 t. Diese Emissionen können wiederum auf die Schadstoffklassen anteilmäßig aufgeteilt werden.

In der Tabelle 12 und der Tabelle 13 werden die NO_x-Mehremissionen je Schadstoffklasse und Manipulationsrate aufgezeigt.

Anhand der Daten aus dem Jahr 2018 wurden 67% der Transportleistung durch EURO VI-Fahrzeuge verrichtet. Durch Multiplikation der Transportleistung mit dem durchschnittlichen Emissionsfaktor ergeben sich daraus 7.309 t NO_x-Emissionen in diesem Jahr. Wenn angenommen wird, dass 27 % davon von manipulierten Fahrzeugen ausgestoßen wurden, dann erhöhen sich die ausgestoßenen NO_x-Emissionen um die Verschlechterungsbandbreite von 1,33 – 6,67. Daraus resultieren NO_x-Mehremissionen von 658 bis zu 11.182 t.

Tabelle 12: NO_x-Mehremissionen durch Manipulation bei EURO VI-Fahrzeugen

NO _x -Mehremissionen durch Manipulation bei EURO VI-Fahrzeugen				
Ausgestoßene NO _x [t]	7.309			
Manipulationsraten	27%	30%	40%	50%
NO _x von manipulierten EURO VI-LKW [t]	1.973	2.193	2.923	3.654
NO _x -Mehremissionen Minimum [t]	658	731	974	1.218
NO _x -Mehremissionen Maximum [t]	11.182	12.425	16.566	20.708

Eigene Berechnungen auf Datenbasis Jahr 2018

Im Jahr 2018 wurden 26,3 % der jährlichen Transportleistung von EURO V-Fahrzeugen verrichtet. Daraus ergeben sich 2.865 t NO_x-Emissionen. Wenn angenommen wird, dass 27 % davon von manipulierten Fahrzeugen ausgestoßen wurden, dann erhöhen sich die ausgestoßenen NO_x-Emissionen um die Verschlechterungsbandbreite von 1,25 – 3. Daraus resultieren NO_x-Mehremissionen von 193 bis zu 1.547 t.

Tabelle 13: NO_x-Mehremissionen durch Manipulation bei EURO V-Fahrzeugen

NO _x -Mehremissionen durch Manipulation bei EURO V-Fahrzeugen				
Ausgestoßene NO _x 2018 [t]	2.865			
Manipulationsraten	27%	30%	40%	50%
NO _x von Manipulierten EURO V-LKW [t]	773	859	1.146	1.432
NO _x -Mehremissionen Minimum [t]	193	215	286	358
NO _x -Mehremissionen Maximum [t]	1.547	1.719	2.292	2.865

Eigene Berechnungen auf Datenbasis Jahr 2018

Eine Manipulationsrate von 50 % würde bei den gegebenen Verschlechterungsbandbreiten und unter Berücksichtigung der Verteilung der EURO-Klassen NO_x-Mehremissionen zwischen 15 - 232 % nach sich ziehen.

Die Berechnungen zeigen, dass die Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlage bei Fahrzeugen der Schadstoffklassen EURO V und VI mit bis zu +125 % NO_x-Mehremissionen bei einer Manipulationsrate von 27 % durchaus Relevanz hat, um das Einsparungspotenzial zu verringern. Trotz der methodischen Unterschiede bei der Ermittlung der jährlichen NO_x-Emissionen im Basis- und im OLI-Szenario soll eine Abschätzung der Einsparungsverluste aufgezeigt werden. Das ermittelte Einsparungspotenzial (24.575 t), welches durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und EURO VI erzielt wird, kann durch eine Manipulationsrate von 27 % bereits um 8 % bis 52 % vermindert

werden. Wenn sich die Manipulationsrate auf 50 % erhöhen würde, dann könnten sogar bis zu 96 % des Einsparungspotenzials vernichtet werden. Die theoretischen Einsparungsverluste je Manipulationsrate können der Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Quantifizierung der NO_x-Einsparungsverluste bedingt durch Manipulation

NO _x -Einsparungsverluste bedingt durch Manipulation								
Einsparungspotenzial [t]	24.575							
Manipulationsraten	27%		30%		40%		50%	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Mehremissionen [t]	851	12.729	946	14.143	1.261	18.858	1.576	23.572
Einsparungsverluste	3%	52%	4%	58%	5%	77%	6%	96%

Eigene Berechnungen auf Datenbasis Jahr 2018

9.3.5 Auswirkungen der Stickoxid-Mehremissionen auf die Straßeninfrastruktur

Aus der Perspektive des Autobahnbetreibers kann ein weiterer und auch kostenrelevanter Aspekt, der durch die NO_x-Mehremissionen entsteht, angeführt werden. Im Falle einer Manipulation fallen EURO V und VI-Fahrzeuge auf ein Abgasniveau der EURO IV-Fahrzeuge und schlechter zurück. Das bedeutet, dass diese Fahrzeuge auf österreichischen Straßen die Maut für ihre ausgewiesene EURO-Klasse bezahlen, während sie aber dieselben Abgaswerte aufweisen, wie die älteren Fahrzeuge. Die Maut in Österreich ist strecken-, achs-, emissionsklassen-, und tageszeitabhängig. Ein EURO VI-Fahrzeug zahlt zwischen € 0,20 und € 0,42 pro km auf der Autobahn, während ein EURO IV-Fahrzeug für einen Autobahnkilometer zwischen € 0,22 bis € 0,45 bezahlt (ASFINAG 2021: online). Dies scheint auf den ersten Blick eine nicht erwähnenswerte Differenz zu sein, jedoch häufen sich die Verluste für den Autobahnbetreiber schnell. Bei einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 74.500 km (UBA 2019b: online) kann der Autobahnbetreiber bei einem manipulierten EURO VI-Fahrzeug der Kategorie 4 zwischen € 2.087 bis € 4.542 pro verlieren. Eine Ermittlung der gesamten jährlichen Einnahmeverluste der ASFINAG durch die Verkehrsteilnahme von manipulierten schweren Nutzfahrzeugen ist nicht möglich, da die vorliegenden Berechnungen und zugrundeliegenden Statistiken auf der Transportleistung und nicht dem Fahrzeugaufkommen basieren. Es kann daher nicht, ohne weitere Annahmen zu treffen, auf die Anzahl der manipulierten Fahrzeuge geschlossen werden.

Zu den Verlusten bei den Mauteinnahmen kommt außerdem eine stärkere Belastung des Straßenbelags durch die vermehrte Belastung des Asphalts durch das NO_x hinzu. Experimente der Technischen Universität Wien haben gezeigt, dass ein erhöhtes NO_x-Emissionsniveau negative

Auswirkungen auf die Asphaltalterung haben. Es kommt zu einer Versprödung des Straßenbelags, wodurch sich vor allem im Winter die Rissanfälligkeit erhöht. (ORF 2017: online) Eine Kostenabschätzung erfolgte hierfür nicht, könnte aber in einer weiterführenden Arbeit aufgezeigt werden.

Die Tabelle 15 und Tabelle 16 stellen die Staffelung der Mautkosten pro km sowie einen Vergleich der jährlichen Kosten für die Benützung der Autobahnen je Kategorie und EURO-Klasse dar. Für die Tabelle 15 wurden ausschließlich die Tagespreise pro km angeführt, da der Unterschied zu den Nachtpreisen gering ist.

Tabelle 15: Staffelung der Maut für KFZ über 3,5 t höchstzulässiges Gesamtgewicht

EURO-Klasse	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4+
	2 Achsen	3 Achsen	4 u. mehr Achsen
EURO VI	€ 0,20	€ 0,28	€ 0,42
EURO V und EEV	€ 0,21	€ 0,29	€ 0,43
EURO IV	€ 0,22	€ 0,30	€ 0,45
EURO 0 bis III	€ 0,24	€ 0,33	€ 0,48

Quelle: ASFINAG 2021

Für die beispielhaften Berechnungen der Mindereinnahmen pro manipuliertem schweren Nutzfahrzeug in Tabelle 16 wurde die durchschnittliche Jahresfahrleistung von 74.500 km herangezogen und auf die Tagespreise pro km zurückgegriffen (UBA 2019b: online).

Tabelle 16: Beispielrechnung zu den Mautkosten für ein schweres Nutzfahrzeug je Kategorie und EURO-Klasse bei durchschnittlicher Jahresfahrleistung

EURO-Klasse	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4+
	2 Achsen	3 Achsen	4 u. mehr Achsen
EURO VI	€ 14.907	€ 20.917	€ 31.068
EURO V und EEV	€ 15.630	€ 21.929	€ 32.332
EURO IV	€ 16.144	€ 22.649	€ 33.155
EURO 0 bis III	€ 17.679	€ 24.797	€ 35.610
Entgangene Mauteinnahmen bei Rückfall eines EURO VI-Fahrzeugs auf EURO IV-Werte	€ 1.237	€ 1.732	€ 2.087
Entgangene Mauteinnahmen bei Rückfall eines EURO VI-Fahrzeugs auf EURO 0-III-Werte	€ 2.772	€ 3.880	€ 4.542

Quelle: UBA 2019b: online; ASFINAG 2021: online, eigene Berechnungen

10 Grenzen der Aussagekraft und Limitationen der Berechnungen

Im Zuge der Erstellung der Berechnungen zum NO_x-Einsparungspotenzial sowie den -Mehremissionen mussten einige Einschränkungen vorgenommen und Annahmen getroffen werden. Diese zentralen Limitationen gilt es in folgendem zu adressieren.

10.1 Ermittlung der Stickoxidemissionen

Der gewählte Aufbau der vorliegenden Diplomarbeit beruht zur Beantwortung der aufgeworfenen Forschungsfrage auf einem induktiven Schluss. Anhand einer empirischen Studie, welche die Diskrepanz von gemessenen NO_x-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen im Realbetrieb entlang einer Autobahnstrecke mit den laut EURO-Abgasnorm zulässigen Emissionsgrenzwerten vergleicht, wird auf eine mögliche Manipulationsrate geschlossen. Künftige Studien, die sich der Wiederholbarkeit der hier zugrunde gelegten Studienergebnisse widmen, wären besonders wünschenswert und könnten auch zu weiteren Erkenntnissen mit Relevanz für die Interpretation der vorliegenden Ergebnisse führen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss zudem beachtet werden, dass einige wichtige Einflussfaktoren auf die tatsächlichen spezifischen NO_x-Emissionen im realen Fahrbetrieb, wie etwa Windverhältnisse, klimatische Bedingungen, Beladungszustand, Fahrstil etc., in der Modellierung nur soweit berücksichtigt werden konnten, wie diese bereits in den verwendeten Primärdaten zu den Emissionsfaktoren eingeflossen sind. Die mengenmäßige Abschätzung der NO_x-Emissionsniveaus in den jeweiligen Szenarien erfolgte in der vorliegenden Diplomarbeit daher näherungsweise. Der Vergleich des Referenz- und Basisszenarios dient der Ermittlung des Einsparungspotenzials, während der Vergleich des Referenz- und OLI-Szenarios aufgrund der unterschiedlichen methodischen Zugänge mit Bedacht vorgenommen werden muss.

Insbesondere der Vergleich von Basis- und OLI-Szenario ist interessant, da dieser es ermöglicht die Größenordnung der methodischen Unsicherheit herauszulesen. Die Bezugnahme von Ergebnissen aus den beiden Ansätzen aufeinander ist allerdings aufgrund der unterschiedlichen methodischen Zugänge der Berechnung eher zu vermeiden bzw. mit Bedacht auf diesen Unterschied zu interpretieren.

10.2 Individuelle Anpassung der Emissionsfaktoren an die österreichische Situation

Eine individuelle Anpassung der Emissionsfaktoren auf die österreichische Situation konnte in der vorliegenden Diplomarbeit nicht berücksichtigt werden. Diese Einschränkung wirkt sich vor allem im Basisszenario aus. Es muss zum Beispiel berücksichtigt werden, dass Fahrzeuge niedrigerer Schadstoffklassen (0-III) zwar nur noch einen geringen Anteil der jährlichen Transportleistung übernehmen, aber aufgrund ihrer höheren Grenzwerte einen durchaus beachtlichen Einfluss auf das NO_x -Emissionsniveau haben können.

Hingegen sollte eine solche Anpassung an die österreichische Situation im OLI-Szenario durch die Verwendung des in der OLI angepassten Emissionsfaktors eher berücksichtigt sein. Diese Einschätzung erscheint jedoch schwierig, da Hintergrundinformationen zum Modell der OLI trotz guter Dokumentation nicht vollumfänglich zugänglich sind.

10.3 Berücksichtigung von fahrzeugklassen-spezifischen Emissionsfaktoren

Während der OLI-Emissionsfaktor bereits den Fahrzeugklassen-Mix berücksichtigt und eine Unterscheidung je EURO-Klasse nicht mehr möglich ist, wurden für das Basisszenario fahrzeugklassen-spezifische Emissionsfaktoren berechnet. Die fahrzeugklassen-spezifischen Emissionsfaktoren orientierten sich an den Grenzwerten der EURO-Abgasnorm. Da jedoch nicht angenommen werden kann, dass die NO_x -Emissionen im Abgas jedes Fahrzeuges einer EURO-Klasse genau den erlaubten Grenzwert erreichen – einige werden darunterliegen – musste von einer Verteilung ausgegangen werden. Dazu wurde die von Pöhler und Engel (2018: 18) erhobene Verteilung der gemessenen NO_x -Emissionen herangezogen. Mithilfe umfassenderer Statistiken der tatsächlichen NO_x -Emissionen könnten die fahrzeugklassen-spezifischen Emissionsfaktoren genauer ermittelt werden.

Des Weiteren berücksichtigt das hier beschriebene Modell ausschließlich die mögliche Einsparung von NO_x -Emissionen. Es wird hierbei keine Rücksicht auf vermeintliche Wechselwirkungen zwischen der Reduktion von NO_x -Emissionen und der Belastung mit anderen Luftschadstoffen genommen.

10.4 Stichprobengröße

Die Studien von Pöhler/Adler (2017) und Pöhler/Engel (2018) umfassen insgesamt eine Stichprobengröße von 313 verwertbaren Abgasmessungen. Bei der Menge an Fahrzeugen, die im Gütertransport auf österreichischen Straßen eingesetzt werden, erscheint diese Stichprobengröße etwas gering. Dies ist sicherlich dem hohen investigativen sowie dem zeitlichen Aufwand für die Studiendurchführung geschuldet. Wenngleich diese Anzahl recht gering ist, ist der Anteil jener Fahrzeuge mit erhöhten NO_x-Emissionen im Abgas – trotz der Berücksichtigung eines zusätzlichen Toleranzbereiches (+ 1000 mg) – mit 27 % recht hoch. Sowohl die Manipulationsrate als auch die Verteilung der Messwerte der NO_x-Emissionen im Abgas – welche für die Ermittlung des fahrzeugklassen-spezifischen Emissionsfaktors herangezogen wurde – könnten mithilfe zusätzlicher Daten oder umfassender Untersuchungen verifiziert werden. Besonders interessant scheint außerdem eine Untersuchung des Unterschieds von NO_x-Emissionen bei werkskonformen Fahrzeugen im realen Fahrbetrieb mit dem von Pöhler/Adler (2017) sowie Pöhler/Engel (2018) angewandten „Plume-Chasing“-Messverfahren.

10.5 Anwendung der Manipulationsrate auf die jährliche Transportleistung von EURO V- und EURO VI-Fahrzeugen

Die Motivation zur Manipulation der AdBlue-basierten Abgasnachbehandlungsanlage wird in wirtschaftlichen Gründen vermutet. Die Abgasnachbehandlungsanlagen verfügen über einige Verschleißteile, welche nach entsprechender Laufleistung ausgetauscht werden müssen. Der Austausch dieser Teile wäre mit Kosten verbunden, die höher sind als z.B. die Anschaffung eines AdBlue-Emulators. Die kostengünstigste und schnellste Art, um das Fahrzeug wieder auf die Straße zu schicken, ist demnach die Deaktivierung bzw. Manipulation der Abgasnachbehandlung. Obwohl eine Manipulation erst nach einer gewissen Laufleistung wahrscheinlich ist, kann aus dieser Information alleine nicht abgeleitet werden, dass vor allem Fahrzeuge im Langstreckenverkehr von Manipulationen betroffen sind.

Die Studie von Pöhler und Engel (2018) legt eine Manipulationsrate von 27% bei zufällig untersuchten schweren Nutzfahrzeugen auf einem Autobahnabschnitt nahe. Da Pöhler und Engel (ibid.) jedoch keine Differenzierung der untersuchten schweren Nutzfahrzeuge nach gefahrener Entfernung vorgenommen haben und die Stichprobengröße der untersuchten Fahrzeuge eine solche Differenzierung auch nicht erlauben würde, wurde die beobachtete Manipulationsrate in den Berechnungen des Manipulationsszenarios auf die jährliche Transportleistung, die von EURO V- und EURO VI-Fahrzeugen auf österreichischen Straßen verrichtet wird, angewendet.

Mit der gewählten Vorgehensweise wird einer Unterschätzung des Aufkommens von Manipulationen bei schweren Nutzfahrzeugen entgegengewirkt. Dennoch ist eine Überprüfung der Manipulationsrate sinnvoll und könnte durch eine weiterführende Studie erfolgen, welche einerseits eine größere Stichprobe untersuchter schwerer Nutzfahrzeuge aufweisen sollte. Andererseits könnte eine solche Studie auch eine repräsentative Verteilung der auf österreichischen Straßen verkehrenden Nutzfahrzeuge hinsichtlich Fahrzeuggrößen (Achslasten, Gewichtsklassen), Herkunftsland der Fahrzeuge, Fahrzeugalter etc. berücksichtigen.

Es kann folglich aufgrund der Studien von Pöhler nicht differenziert werden, ob und wie stark sich die Manipulationsrate bei schweren Nutzfahrzeugen im Langstreckenverkehr im Vergleich zu schweren Nutzfahrzeugen der Schadstoffklassen EURO V und EURO VI generell unterscheidet. Zudem sind keine statistischen Daten hinsichtlich der erbrachten jährlichen Transportleistung [tkm] differenziert nach Entfernungsklassen verfügbar – die Statistik bezieht sich hier lediglich auf das Transportaufkommen [t]. Um von einer bestimmten Manipulationsrate im Langstreckenverkehr (etwa definiert über Fahrten weiter als 150 km) auszugehen, müsste daher eine näherungsweise Ermittlung der Transportleistung im Langstreckenverkehr erfolgen.

11 Ausblick und Schlussfolgerung

Die Berechnungen in der vorliegenden Diplomarbeit haben gezeigt, dass sich durch die Einführung der Schadstoffklassen EURO V und VI und die damit zusammenhängende Veränderung der Abgasnachbehandlung ein großes Potenzial zur Einsparung von NO_x-Emissionen erzielen lässt. Jedoch kann dieses Einsparungspotenzial durch eine Manipulation der Abgasnachbehandlungsanlagen beinahe gänzlich vernichtet werden. Dabei können die Einsparungsverluste je nach angenommener Manipulationsrate unterschiedlich hoch sein. Gemessen an dem heutigen Emissionsniveau – erzeugt durch schwere Nutzfahrzeuge – entstehen bei einer Manipulationsrate von 27 % NO_x-Mehremissionen von bis zu +52 %. Der Anteil der ermittelten NO_x-Mehremissionen aus dem Straßengüterverkehr⁵⁵ belaufen sich auf beinahe 10 % der gesamten jährlichen NO_x-Emissionen, die in Österreich ausgestoßen werden (130,7 kt). Nach Anpassung der jährlichen NO_x-Emissionswerte nach der Flexibilitätsregelung (90,3 kt) erhöht sich dieser Anteil auf rund 14 %.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass eine Aufdeckung und Nachverfolgung von Manipulationen sowie die Setzung von Maßnahmen zur Reduktion der Manipulationsrate durchaus relevant sein kann. Jedes manipulierte Fahrzeug, egal ob im Kurz- oder Langstreckenverkehr eingesetzt, muss am Ende seiner Tour auch in urbane Gebiete, um seine transportierten Waren abzuliefern. Damit sind die NO_x-Mehremissionen auch gesundheitlich relevant. Das inkludiert nicht nur die lokal entstehenden NO_x-Emissionen, sondern auch die Immissionen, die fern der Straße auf die Umwelt und die Menschen einwirken.

Durch die stetige Erneuerung der Fahrzeugflotte im Gütertransport kann angenommen werden, dass das jährliche NO_x-Emissionsniveau in Österreich weiter abnehmen wird. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Erhöhung der Anteile an EURO VI-Fahrzeugen kein alleiniger Garant für die Reduktion der NO_x-Emissionen ist. Wenn sich die Manipulationsrate gleichzeitig erhöht, können die Einsparungspotenziale nicht vollends ausgeschöpft werden. Dies gilt auch für die Einführung neuer Fahrzeugklassen mit strengeren Emissionsgrenzwerten.

Die Vielzahl von Einflussfaktoren auf die NO_x-Emissionen und deren wechselseitige Dynamik sind modellhaft nicht abbildbar. Eine Einschätzung der Veränderung der Folgen einer Manipulation bei neueren Fahrzeugen kann kaum vorgenommen werden.

⁵⁵ Unter der Annahme der Manipulationsrate von 27 % und dem obersten Ende der Verschlechterungsbandbreite.

Als weiterer Forschungsbedarf scheint die Quantifizierung des ökonomischen Schadens bei Autobahnbetreibern durch die Verkehrsteilnahme manipulierter Fahrzeuge mit höheren Emissionen interessant. Die Autobahnbetreiber sind dadurch nicht nur mit Mautverlusten, sondern auch mit erhöhten Wartungskosten konfrontiert. Experimente der Technischen Universität Wien haben gezeigt, dass sich die NO_x-Emissionen auch auf die Alterung des Straßenbelags auswirken. Je höher der NO_x-Anteil im Abgas desto schneller altert das Material (ORF 2017: online). Es kommt zu einer Versprödung des Straßenbelags, wodurch sich vor allem im Winter die Rissanfälligkeit erhöht. Die NO_x-Mehremissionen, die durch eine Manipulation der Abgasnachbehandlung bei schweren Nutzfahrzeugen entstehen, beschleunigen die Alterung des Asphalts, was darin resultiert, dass der Straßenbelag in kürzeren Intervallen erneuert werden muss.

Die gesamtwirtschaftliche wie auch die betriebswirtschaftliche Betrachtung der Wettbewerbsverzerrung, die durch eine Manipulation von Fahrzeugen entsteht, stellt eine weitere Fragestellung für künftige Forschungsarbeiten dar.

12 Verzeichnisse

12.1 Quellenverzeichnis

- ACHTNICHT, M., KESTERNICH, M., STURM, B., 2018: „Die „Diesel-Debatte“: ökonomische Handlungsempfehlungen an die Politik.“ Wirtschaftsdienst, 1998, Heft 8, 574 - 577.
URL: <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2018/heft/8/beitrag/die-diesel-debatte-oekonomische-handlungsempfehlungen-an-die-politik.html>, letzter Zugriff: 10.07.2020.
- ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club), 2020a: „Sauber durch AdBlue: So filtern SCR-Systeme giftige Autoabgase“.
URL: www.adac.de/verkehr/abgas-diesel-fahrverbote/dieselkauf/funktion-scr-system-adblue/, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club), 2020b: „AdBlue kaufen, tanken und nachfüllen“.
URL: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/benzin-und-diesel/adblue-nachfuellen/>, letzter Zugriff: 07.12.2021.
- ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club), 2022: „EURO-7-Abgasnorm: Die geplante Reform im ADAC Check“.
URL: <https://www.adac.de/verkehr/abgas-diesel-fahrverbote/abgasnorm/euro-7/>, letzter Zugriff: 21.02.2022.
- ANDERL, M., GANGL, M., HAIDER, S., IBESICH, N., LAMPERT, C., POUPA, S., PURZNER, M., SCHIEDER, W., SCHODL, B., TITZ, M., ZECHMEISTER, A., 2019: „Bundesländer Luftschadstoffinventur 1990-2017. Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Grundlage von EU-Berichtspflichten (Datenstand 2019)“. Ein Kooperationsprojekt der Bundesländer mit dem Umweltbundesamt. 2019 Reports, Band 0703, Wien: Umweltbundesamt GmbH.
URL: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/68ff8db4-4a7b-430e-bbe5-5775d1d389df>, letzter Zugriff: 05.01.2021.
- ANDERL, M., GANGL, M., HAIDER, S., LAMPERT, C., PERL, D., PINTERITS, M., POUPA, S., PURZNER, M., SCHMIDT, G., SCHODL, B., TITZ, M., 2020a: „Austria’s annual air emission inventory 1990-2018.“ 2020 Reports, Band 0717, Wien: Umweltbundesamt GmbH.
URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0717.pdf>, letzter Zugriff: 15.01.2021.

- ANDERL, M., GANGL, M., HAIDER, S., KÖTHER, T., LAMPERT, C., PAZDERNIK, K., PERL, D., PINTERITS, M., POUPA, S., PURZNER, M., SCHIEDER, W., SCHMIDT, G., SCHODL, B., TITZ, M., WIESER, M., ZECHMEISTER, A., 2020b: „Austria’s informative inventory report (IIR) 2020“. 2020 Reports, Band 0723, Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- ANDERL, M., GANGL, M., LAMPERT, C., PERL, D., POUPA, S., PURZNER, M., STORCH, A., SCHODL, B., TITZ, M., ZECHMEISTER, A., 2020c: „Emissionstrends 1990-2018. Ein Überblick über die Verursacher von Luftschadstoffen in Österreich (Datenstand 2020)“. 2020 Reports, Band 0736, Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- ANDERL, M., GANGL, M., HAIDER, S., HEINFELLNER, H., LAMPERT, C., PERL, D., POUPA, S., PURZNER, M., SCHIEDER, W., TITZ, M., ZECHMEISTER, A., 2021a: „Emissionstrends 1990-2019. Ein Überblick über die Verursacher von Luftschadstoffen in Österreich (Datenstand 2021)“. 2021 Reports, Band 0770, Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- ANDERL, M., HAIDER, S., LAMPERT, C., PERL, D., PINTERITS, M., POUPA, S., PURZNER, M., SCHIEDER, W., SCHMIDT, G., SCHODL, B., TITZ, M., WIESER, M., 2021b: „Austria’s annual air emission inventory 1990-2019. Emissions of SO₂, NO_x, NMVOC, NH₃ and PM_{2,5}“. 2021 Reports, Band 0760, Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- ASFINAG (Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft), 2021: „GO-Maut für Fahrzeuge über 3,5 Tonnen“.
URL: www.asfinag.at/maut-vignette/maut-fuer-lkw-und-bus/, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- ASTRA (Bundesämter für Strassen), 2017: „Geschlossenes Vorgehen gegen AdBlue-Manipulationen“.
URL: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/medienmitteilungen/anzeigemeldungen.msg-id-66432.html>, letzter Zugriff: 29.11.2021.
- BAUMANN U., 2019: „Abgasmanipulation bei LKW. Über 300 Fahrer wurden 2018 erwischt“.
URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/abgasmanipulation-bei-lkw/>, letzter Zugriff: 13.12.2021.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2020: „Was sind Dieselpartikel?“.
URL: <https://www.stmuvm.bayern.de/themen/luftreinhaltung/massnahmen/partikelfilter/partikel.htm>
letzter Zugriff: 07.01.2021.
- BESCHLUSS (EU) 2016/1841 DES RATES vom 5. Oktober 2016 über den Abschluss des im Rahmen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen geschlossenen

Übereinkommens von Paris im Namen der Europäischen Union, ABl. L 282/1.
URL: <http://data.europa.eu/eli/dec/2016/1841/oj>, letzter Zugriff: 08.02.2022.

BESCHLUSS (EU) 2016/590 DES RATES vom 11. April 2016 über die Unterzeichnung des im Rahmen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen geschlossenen Übereinkommens von Paris im Namen der Europäischen Union, ABl. L 103/1.
URL: <http://data.europa.eu/eli/dec/2016/590/oj>, letzter Zugriff: 08.02.2022.

BESCHLUSS 2003/507/EG DES RATES vom 13. Juni 2003 über den Beitritt der Europäischen Gemeinschaft zum Protokoll zu dem Übereinkommen von 1979 über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung betreffend die Verringerung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon, ABl. L 179/1.

BESCHLUSS (EU) 2017/1757 DES RATES vom 17. Juli 2017 zur Annahme — im Namen der Europäischen Union — einer Änderung des Protokolls von 1999 zu dem Übereinkommen von 1979 über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung betreffend die Verringerung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon, ABl. L 248/3.

BIRKHOLOLD, F., 2007: „Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden in Kraftfahrzeugen: Untersuchung der Einspritzung von Harnstoffwasserlösung“. Dissertation, Universität Karlsruhe.

BMK (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie), 2021a: „Luftgüte in Österreich“.
URL: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/luft/luftguete/luftguete_oe.html, letzter Zugriff: 08.01.2021.

BMK (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie), 2021b: „Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L)“.
URL: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/recht/ig_l.html, letzter Zugriff: 24.10.2021.

BMK (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie), 2021c: „Emissionsgesetz-Luft 20182021c“.
URL: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/recht/eg_l.html, letzter Zugriff: 24.10.2021.

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft), 2015: „Klima-Zielpfade für Österreich bis 2050. Wege zum 2°C-Ziel“. 2. Auflage, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

URL: www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/klimazielpfadrechner.html, letzter Zugriff: 07.01.2021.

BMNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus), 2018: „#mission2030. Die österreichische Klima- und Energiestrategie“. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

BMNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus), 2019a: „Nationales Luftreinhalteprogramm 2019“. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

BMNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus), 2019b: „Integrierter nationaler Energie—und Klimaplan für Österreich. Periode 2021-2030“. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

BUNDESGESETZ ÜBER NATIONALE EMISSIONSREDUKTIONSVERPFLICHTUNGEN FÜR BESTIMMTE LUFTSCHADSTOFFE (Emissionsgesetz-Luft 2018 - EG-L 2018), BGBl. I 2018/75.

BUNDESGESETZ ZUM SCHUTZ VOR IMMISSIONEN DURCH LUFTSCHADSTOFFE (Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L), BGBl. I 1997/115.

BUNDESGESETZ ZUR EINHALTUNG VON HÖCHSTMENGEN VON TREIBHAUSGASEMISSIONEN UND ZUR ERARBEITUNG VON WIRKSAMEN MAßNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ (Klimaschutzgesetz-KSG), BGBl. I 2011/106.

BUNDESKANZLERAMT ÖSTERREICH, 2020: Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024. Wien: Bundeskanzleramt Österreich.

CHEMIE.DE, o.J.: „Dieselkraftstoff“.

URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Dieselkraftstoff.html>, letzter Zugriff: 19.02.2021.

DEUTSCHE UMWELTHILFE, 2018: „Stickstoffverbindungen. Was sind sie, wo entstehen sie und was bewirken sie?“. Berlin: Umweltbundesamt.

DIPPOLD, M., 2016: „Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ermittlung von Energieverbrauch und Emissionen auf Verkehrsnetzwerken.“ Dissertation, Technische Universität Graz.

ECKERT, P., RAKOWSKI, S., 2011: „Schadstoffbildung“. In: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. 5. Auflage. Hrsg.: Merker, G. P., Teichmann, R., Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011, 259-286.

ECKERT, P., RAKOWSKI, S., 2019: „Nachmotorische Schadstoffreduktion“. In: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise und alternative Antriebssysteme. Verbrennung, Messtechnik und Simulation. 9. Auflage. Hrsg.: Merker, G. P., Schwarz, C., Teichmann, R., Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2019, 979-1008.

EEA (European Environment Agency), 2017: „Luftverschmutzung“.
URL: www.eea.europa.eu/de/themes/air/intro, letzter Zugriff: 07.01.2021.

EEA (European Environment Agency), 2018: „Air quality in Europe – 2018 report“. Luxemburg: Publications Office of the European Union.

EEA (European Environment Agency), 2019: „Air quality in Europe – 2019 report“. Luxemburg: Publications Office of the European Union.

EEA (European Environment Agency), 2020: „Air quality in Europe – 2020 report“. Luxemburg: Publications Office of the European Union.

ENTSCHEIDUNG 406/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020, ABl. L 140/136.

EU (Europäische Union), 2007: Verordnung (EG) 715/2008 des europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32007R0715>, letzter Zugriff: 01.02.2021.

EU (Europäische Union), 2018: Verordnung (EU) 2018/858 des europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32018R0858>, letzter Zugriff: 01.02.2021.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, o.J.: „Lastenteilung: Emissionsziele der Mitgliedstaaten“.

URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/effort_de, letzter Zugriff: 14.02.2022.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2013: „Questions and answers on the EU Clean Air Policy Package“.

URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/MEMO_13_1169, letzter Zugriff: 21.01.2021.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2017: „Maßnahmen der EU zur Verringerung der Luftverschmutzung durch Fahrzeuge“. Factsheet. Brüssel: Europäische Kommission.

URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/MEMO_17_2821, letzter Zugriff: 19.12.2021.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2018a: „Ein Europa, das schützt: Saubere Luft für alle“. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel: Europäische Kommission.

URL: eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52018DC0330, letzter Zugriff: 29.01.2022.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2018b: „Luftqualität: Kommission ergreift Maßnahmen zum Schutz der Bürger vor Luftverschmutzung“. Pressemitteilung.

URL: europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3450_de.htm, letzter Zugriff: 21.02.2022.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2019: „Der europäische Grüne Deal“. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.

URL: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_de.pdf, letzter Zugriff: 27.10.2021.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021a: „Übereinkommen von Paris“.

URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de, letzter Zugriff: 02.10.2021.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021b.: „Clean Air“.

URL: https://ec.europa.eu/environment/air/index_en.htm, letzter Zugriff: 21.01.2021.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021c: „Primärrecht versus Sekundärrecht“.

URL: https://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/types-eu-law_de, letzter Zugriff:
27.09.2021.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021d: „Lastenteilung: Emissionsziele der Mitgliedstaaten.“

URL: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/effort-sharing-member-states-emission-targets_de,
letzter Zugriff: 27.11.2021.

EUROPÄISCHER RAT, 2018: „Maßnahmenpaket für saubere Luft: Verbesserung der Luftqualität in Europa“.

URL: www.consilium.europa.eu/de/policies/clean-air/, letzter Zugriff: 07.01.2021.

EXOMISSION, 2012: „Stickoxidminderung“.

URL: www.exomission.de/index.php/technologien-2/stickoxidminderung-scr, letzter Zugriff:
07.01.2021.

FLÄMIG, M., HINNER, B., BENDER, M., WILLIMOWSKI, M., 2020: „Emissionsgesetzgebung und Abgasmesstechnik“.

In: Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. Hrsg.: Reif, K.,
Ravensburg: Springer Fachmedien, 2020, 400-441.

GEOMAR, 2018: „Seltene Spuren eines flüchtigen Gases.“

URL: <https://www.geomar.de/news/article/seltene-spuren-eines-fluechtigen-gases>, letzter Zugriff:
20.11.2021.

GRUENING, C., BONNEL, P., CLAIROTTE, M., GIECHASKIEL, B., VALVERDE, V., ZARDINI, A., CARRIERO, M., 2019: „Potential of Remote Sensing Devices (RSDs) to screen vehicle emissions“. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

HERTZBERG, A., 2001: „Betriebsstrategien für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und NO_x-Speicher-Katalysator“. Dissertation, Universität Karlsruhe.

Iwo (Institut für Wärme und Öltechnik), 2017: „Luftreinhalteung – Rechtslage Österreich“.

URL: www.iwo-austria.at/energie-umweltpolitik/luftreinhalteung-oesterreich/, letzter Zugriff:
07.01.2021.

KARNER, T., SCHUSTER, S., WENINGER, B., RUDLOF, M., 2019: „Verkehrstatistik 2018“. Wien: Statistik Austria.

- KARNER, T., SCHUSTER, S., WENINGER, B., 2020: „Mautdaten als ergänzende Datenquelle für die Straßengüterverkehrsstatistik“. Statistische Nachrichten, Heft 04, 297-307.
- KECH, J., SCHMIDT, G., PHILIPP, C., RALL, H., 2014: „Abgasrückführung: Innermotorische Technologie zur Verringerung von Stickoxiden“.
URL: https://pdf.directindustry.de/pdf/mtu-friedrichshafen/abgasrueckfuehrung-innermotorische-technologie-zur-verringerung-stickoxiden/22806-311263-_4.html, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- KRÖCHER, O., ELSENER, M., JACOB, E., 2008: „Neue Reduktionsmittel für die Low NO_x-SCR-Technik“. AVL Partikelforum.
URL: www.psi.ch/sites/default/files/import/ceg/PublicationsEN/Krocher_Emission_Forum_2008.pdf, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- MERKER, G. P., TEICHMANN, R., 2019: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise und alternative Antriebssysteme. Verbrennung, Messtechnik und Simulation. 9. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- ÖAMTC (Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club), 2020: „Informationen zum VW Abgas-Skandal bezüglich Stickstoffoxide NO_x“.
URL: <https://www.oeamtc.at/thema/autokauf/informationen-zum-vw-abgas-skandal-bezueglich-stickstoffoxide-nox-16179350>, letzter Zugriff: 18.10.2021.
- ORF (Österreichischer Rundfunk), 2017: „Stickoxide lassen Straßen schneller altern.“
URL: <https://science.orf.at/v2/stories/2862966/>; letzter Zugriff: 31.12.2021.
- ÖSTERREICHISCHE BUNDESREGIERUNG, O.J.: Programm der österreichischen Bundesregierung zur Einhaltung der nationalen Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe gemäß § 6 Emissionshöchstmengengesetz-Luft.
- PASCHOTTA, R., 2018a: „Abgaskatalysator“. RP-Energie-Lexikon.
URL: www.energie-lexikon.info/abgaskatalysator.html?s=ak , letzter Zugriff: 07.01.2021.
- PASCHOTTA, R., 2018b: „Speicherkatalysator“. RP-Energie-Lexikon.
URL: www.energie-lexikon.info/speicherkatalysator.html?s=ak, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- PASCHOTTA, R., 2019a: „Stickoxide“. RP-Energie-Lexikon.
URL: www.energie-lexikon.info/stickoxide.html , letzter Zugriff: 07.01.2021.

- PASCHOTTA, R., 2019b: „Abgasrückführung“. RP-Energie-Lexikon.
URL: www.energie-lexikon.info/abgasrueckfuehrung.html , letzter Zugriff: 07.01.2021.
- PASCHOTTA, R., 2019c: „Drei-Wege-Katalysator“. RP-Energie-Lexikon.
URL: www.energie-lexikon.info/drei_wege_katalysator.html?s=ak , letzter Zugriff: 07.01.2021.
- PASCHOTTA, R., 2019d: „SCR-Katalysator“. RP-Energie-Lexikon.
URL: www.energie-lexikon.info/scr_katalysator.html?s=ak , letzter Zugriff: 07.01.2021.
- PASCHOTTA, R., 2020a: „Magermotor“. RP-Energie-Lexikon.
URL: <https://www.energie-lexikon.info/magermotor.html>, letzter Zugriff: 31.01.2022.
- PASCHOTTA, R., 2020b: „Rußpartikelfilter“. RP-Energie-Lexikon.
URL: <https://www.energie-lexikon.info/russpartikelfilter.html>, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- PASCHOTTA, R., 2021: „Rohemissionen“. RP-Energie-Lexikon.
URL: <https://www.energie-lexikon.info/rohemissionen.html>, letzter Zugriff: 14.12.2021.
- PISCHINGER, F., 1996: „Verbrennungsmotoren. Vorlesungsumdruck“. Band 2. Aachen: Rheinisch Westfälische Technische Hochschule.
- PÖHLER, D., ADLER, T., 2017: „Bestimmung von realen LKW NO_x Emissionen (Real Driving Emissions) auf deutschen Autobahnen“. Gutachten im Auftrag von Camion Pro e.V. Deutschland. Universität Heidelberg: Institut für Umweltphysik.
- PÖHLER, D., ENGEL, T., 2018: „Bestimmung von LKW NO_x Emissionen (Real Driving Emissions) auf Tiroler Autobahnen und potenziellen Abgasmanipulationen“. Universität Heidelberg: Institut für Umweltphysik.
- PUCHER, E., SCHÄFER, F., BERGMANN, A., VAN BASSHUYSEN, R., MAYER, A. C. R., KASPER, M., BURTSCHER, H., 2017: „Abgasemissionen“. In: Handbuch Verbrennungsmotor. 8. Auflage. Hrsg.: Van Basshuysen, R., Schäfer, F., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, 923-1010.
- REIF, K., 2020: Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. Ravensburg: Springer Fachmedien.

RICHTER, P., 2018: „Die Technik. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.“.

URL: bdi.eu/artikel/news/die-technik/, letzter Zugriff: 07.01.2021.

RICHTLINIE (EU) 2016/2284 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG, ABl. L 344/1.

URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/2284/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

RICHTLINIE 1999/96/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Dezember 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Selbstzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und die Emission gasförmiger Schadstoffe aus mit Erdgas oder Flüssiggas betriebenen Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 88/77/EWG des Rates, ABl. L 44/1.

RICHTLINIE 2004/107/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Dezember 2004 über Arsen, Kadmium, Quecksilber, Nickel und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Luft, ABl. L 23/3.

URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, ABl. L 152/1.

URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

RICHTLINIE 70/220/EWG DES RATES vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung, ABl. L 76/1

RICHTLINIE 88/77/EWG DES RATES vom 3. Dezember 1987 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen, ABl. L 36/33.

RICHTLINIE 91/542/EWG DES RATES vom 1. Oktober 1991 zur Änderung der Richtlinie 88/77/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen, ABl. L 295/1.

- SCHMIDT, T., 2021: „Normen und Recht. Rechtsverbindlichkeit von Normen.“
URL: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/normen-und-recht/rechtsverbindlichkeit-durch-normen>, letzter Zugriff: 14.04.2021.
- SCHNEIDER, A., CYRYS, J., BREITNER, S., KRAUS, U., PETERS, A., DIEGMANN, V., NEUNHÄUSERER, L., 2018:
„Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland“. Dressau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- SCHODL, B., 2019: „Nachrüstung von Diesel-PKW; Überprüfung manipulierter LKW“. REP-0707, Wien:
Umweltbundesamt GmbH.
- SCHÖGL, T., 2021: „IG-L Was das Immissionsschutzgesetz-Luft für Autofahrer bedeutet. Die wichtigsten Informationen rund um die Tempolimits nach IG-L in Österreich.“
URL: <https://autorevue.at/ratgeber/ig-l-immissionsschutzgesetz-luft>, letzter Zugriff: 01.11.2021.
- SNV (Standards connect the world), 2021: „Sind Normen Gesetze?“
URL: <https://www.snv.ch/de/ueber-normen/sind-normen-gesetze.html>, Zugriff: 14.04.2021.
- SPANGL, W., NAGL, C., 2019: „Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2018“. Report 0675, Wien:
Umweltbundesamt GmbH.
- SPANGL, W., NAGL, C., 2020: „Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2019“. 2020 Reports, Band 0713, Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- SPEKTRUM.DE, 2021: „Lexikon der Physik. Absorptionsspektroskopie“.
URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/absorptionsspektroskopie/141>, letzter Zugriff: 13.12.2021.
- STRASSER, M., 2021: „Umweltgesamtrechnungen. Modul – Luftemissionsrechnung 1995 bis 2019“. Wien:
Statistik Austria.
- TATSCHL, R., WURZENBERGER, J., 2011: „Abgasnachbehandlungssysteme“. In: Grundlagen
Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. 5. Auflage. Hrsg.: Merker, G. P.,
Schwarz, C., Teichmann, R., Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011, 479-498.

- UBA (Umweltbundesamt Österreich), 2018a: „Emissionskennzahlen Datenbasis 2018. Bezogen auf Besetzungs-/Auslastungsgrad (g/Pkm bzw. g/Tkm)“.
URL: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/fahrzeugtechnik/lkw/>, letzter Zugriff: 15.02.2021.
- UBA (Umweltbundesamt Österreich), 2018b: „2018 Verkehrsmittel Österreich Beschreibung“.
URL: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/fahrzeugtechnik/lkw/>, letzter Zugriff: 15.02.2021.
- UBA (Umweltbundesamt Österreich), 2019a: „Transport von Gütern auf der Straße“.
URL: www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/fahrzeugtechnik/lkw/, letzter Zugriff: 28.07.2019.
- UBA (Umweltbundesamt Österreich), 2019b: „2019 Verkehrsmittel Österreich Beschreibung“.
URL: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/fahrzeugtechnik/lkw/>, letzter Zugriff: 07.12.2021.
- UBA (Umweltbundesamt Österreich), 2020: „Hintergrundinformation. Trends der NO_x-, SO₂-, NMVOC-, NH₃-Emissionen und PM_{2,5}“. Wien: Umweltbundesamt.
URL: https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/luft/hintergrundinfo_luftschadstoff_fe_032020.pdf, letzter Zugriff: 18.01.2021.
- UBA (Umweltbundesamt Österreich), 2021a: „Luftschadstoffe“.
URL: <https://www.umweltbundesamt.at/news210922-3>, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- UBA (Umweltbundesamt Österreich), 2021b: „WHO Richtwerte 2021“.
URL: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/luft/luftschadstoffe>, letzter Zugriff: 07.02.2022.
- UMWELTBUNDESAMT (D), 2013: „Was heißt „DeNOx“? Wie werden Abgase „entstickt“?“.
URL: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-heisst-denox-wie-werden-abgase-entstickt>, letzter Zugriff: 27.12.2021.
- UMWELTBUNDESAMT (D), 2017: Hintergrundinformationen zum Handbuch für Emissionsfaktoren für Straßenverkehr.
URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/faqs_hbefa.pdf, letzter Zugriff: 12.01.2021.

- UMWELTBUNDESAMT (D), 2018: „Wie sehr beeinträchtigt Stickstoffdioxid (NO₂) die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland? Ergebnisse der Studie zur Krankheitslast von NO₂ in der Außenluft“.
URL: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_factsheet_krankheitslasten_no2.pdf, letzter Zugriff: 01.02.2020.
- UMWELTBUNDESAMT (D), 2019: „Stickstoffdioxid: Gesundheitliche Bedeutung von Grenzwerten“.
URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide/stickstoffdioxid-gesundheitliche-bedeutung-von#fragen-und-antworten>, letzter Zugriff: 16.10.2021.
- UMWELTBUNDESAMT (D), 2021: „Schwere Nutzfahrzeuge. Die Schadstoffemissionen von schweren Nutzfahrzeugen, wie Lkws und Bussen, werden durch europaweite Richtlinien und Verordnungen reguliert“.
URL: www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge, letzter Zugriff: 27.12.2021.
- ÜBEREINKOMMEN ÜBER WEITRÄUMIGE GRENZÜBERSCHREITENDE LUFTVERUNREINIGUNG, BGBl. 1983/158.
URL: https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1983_158_0/1983_158_0.pdf, letzter Zugriff: 07.02.2022.
- ÜBEREINKOMMEN VON PARIS, ABl. L 282/4.
URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=DE](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=DE), letzter Zugriff: 10.02.2022.
- VAN BASSHUYSEN, R., SCHÄFER, F., 2017: Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 8. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- VCÖ (Verkehrsclub Österreich), 2019: „Was sind Stickoxide und wie schädlich sind sie?“.
URL: www.vcoe.at/service/fragen-und-antworten/was-sind-stickoxide-und-wie-schaedlich-sind-sie, letzter Zugriff: 07.01.2021.
- VERORDNUNG (EG) 595/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Juni 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 80/1269/EWG, 2005/55/EG und 2005/78/EG, ABl. L 188/1.
URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/595/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

VERORDNUNG (EG) 715/2007 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, ABl. L 171/1.

URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/715/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

VERORDNUNG (EU) 2016/1718 DER KOMMISSION vom 20. September 2016 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen in Bezug auf die Bestimmungen über Prüfungen mit portablen Emissionsmesssystemen (PEMS) und das Verfahren zur Prüfung der Dauerhaltbarkeit von emissionsmindernden Einrichtungen für den Austausch, ABl. L 259/1.

URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/1718/oj>, letzter Zugriff: 15.02.2022.

VERORDNUNG (EU) 2018/1999 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates, ABl. L 328/1.

URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

VERORDNUNG (EU) 2018/858 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG, ABl. L 151/1.

URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/858/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

VERORDNUNG (EU) 459/2012 DER KOMMISSION vom 29. Mai 2012 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6), ABl. L 142/16.

URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2012/459/oj>, letzter Zugriff: 05.02.2022.

- VERORDNUNG (EU) 582/2011 DER KOMMISSION vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, ABl. L 167/1.
URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/582/oj>, letzter Zugriff: 15.02.2022.
- VLEHMANN, S., 2021: „Benziner-Verbot wäre klimaschädlich: EU geht bei Abgasnorm EURO 7 Kompromisse ein“.
URL: https://www.focus.de/auto/news/neue-auto-regeln-benziner-verbot-waere-klimaschaedlich-eu-geht-bei-abgasnorm-euro-7-kompromisse-ein_id_13173753.html , letzter Zugriff: 14.04.2021.
- WHO (World Health Organization), 2019: „Überwindung der Luftverschmutzung zum Schutz der Gesundheit: Weltumwelttag 2019“.
URL: <https://www.euro.who.int/de/health-topics/environment-and-health/pages/news/news/2019/6/beat-air-pollution-to-protect-health-world-environment-day-2019>, letzter Zugriff: 27.09.2021.
- WHO (World Health Organization), 2021: „WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) , ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide“.
URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>, letzter Zugriff: 01.02.2022.
- WIARTALLA, A., SEVERIN, C., 2012: „Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und –emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln“. Aachen: FEV GmbH.
- WKO (Wirtschaftskammer Österreich), 2019: „Die österreichische Verkehrswirtschaft. Daten und Fakten. 2019“ Wien: Bundessparte Transport und Verkehr in der Wirtschaftskammer Österreich.
URL: www.wko.at/branchen/transport-verkehr/die_oesterreichische_verkehrswirtschaft_in_zahlen.html, letzter Zugriff: 25.01.2021.
- WKO (Wirtschaftskammer Österreich), 2020: „Feststellung der richtigen Euro-Abgasklasse“.
URL: www.wko.at/service/verkehr-betriebsstandort/Abgasklassenzuordnung.html, letzter Zugriff: 23.06.2021.

12.2 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Übersicht internationaler sowie nationaler Dokumente zum Schutz der Luft</i>	8
<i>Tabelle 2: Emissionsreduktionsverpflichtungen gemäß NEC-Richtlinie für Österreich</i>	14
<i>Tabelle 3: Luftschadstoffgrenzwerte aus Leitlinien und Rechtdokumenten im Vergleich</i>	22
<i>Tabelle 4: Grenzwerte nach EURO-Klasse für schwere Nutzfahrzeuge ab 3,5 t</i>	27
<i>Tabelle 5: Maßnahmen zur Reduktion von Luftschadstoffemissionen</i>	28
<i>Tabelle 6: Auswirkungen des Stickstoffdioxid auf Menschen und Umwelt</i>	34
<i>Tabelle 7: Jährliche AdBlue-Kosten für ein schweres Nutzfahrzeug nach LKW-Klasse anhand eines Beispiels</i>	52
<i>Tabelle 8: Transportleistung im österreichischen Straßengüterverkehr im Jahr 2018</i>	60
<i>Tabelle 9: Anteile der EURO-Klassen an der Gesamtfahrleistung von LKW auf Autobahnen und Schnellstraßen im Jahr 2018</i>	61
<i>Tabelle 10: Spezifische NO_x-Emissionsfaktoren je EURO-Klasse</i>	66
<i>Tabelle 11: Modellergebnisse für das theoretische Einsparungspotenzial</i>	68
<i>Tabelle 12: NO_x-Mehremissionen durch Manipulation bei EURO VI-Fahrzeugen</i>	73
<i>Tabelle 13: NO_x-Mehremissionen durch Manipulation bei EURO V-Fahrzeugen</i>	73
<i>Tabelle 14: Quantifizierung der NO_x-Einsparungsverluste bedingt durch Manipulation</i>	74
<i>Tabelle 15: Staffelung der Maut für KFZ über 3,5 t höchstzulässiges Gesamtgewicht</i>	75
<i>Tabelle 16: Beispielrechnung zu den Mautkosten für ein schweres Nutzfahrzeug je Kategorie und EURO-Klasse bei durchschnittlicher Jahresfahrleistung</i>	75

12.3 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Entwicklung der jährlichen NO_x-Emissionen 2000-2019 in Österreich (Anderl et al. 2021b: 7; 13)</i>	24
<i>Abbildung 2: Verursacher von NO_x-Emissionen im Jahr 2019 (Anderl et al. 2021a: 32)</i>	33
<i>Abbildung 3: Aufbau einer Abgasnachbehandlungsanlage mit AdBlue (ADAC 2020a: online)</i>	49
<i>Abbildung 4: Verteilung der Emissionsmittelwerte für die Schadstoffklassen EURO V und VI. Anzahl der Fahrzeuge je NO_x Emissionsintervall (Pöhler / Engel 2018: 18)</i>	59