



Jörg Keller, BSc

# Messung, Berechnung und Analyse von Stickoxidkonzentrationen sowie Ermittlung von Emissionsfaktoren für verkehrsbedingte Schadstoffe in Straßentunneln

## MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Sturm  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Gregor Schmölzer  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, August 2017



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik  
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder



# Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr. Peter Sturm, für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Masterarbeit sowie für die gesamte Betreuung.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei der Firma SICK AG Deutschland, welche durch die Bereitstellung von Messgeräten die Durchführung dieser Arbeit in diesem Umfang ermöglicht hat.

Ein weiteres großes Dankeschön gilt den Kolleginnen und Kollegen des Fachbereiches Verkehr und Umwelt für die fachliche Unterstützung sowie für die Hilfe beim Messaufbau.

Bei Reinhard möchte ich mich für seine überaus nützlichen Tipps in  $\text{\LaTeX}$  und R bedanken.

Zum Abschluss möchte ich mich bei meiner Familie und besonders bei meiner Freundin Alexandra bedanken, die mir immer mit wertvollen Ratschlägen zur Seite gestanden sind.



# Eidesstattliche Erklärung

## *Affidavit*

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used.*

Graz, am

Jörg Keller



# Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich im ersten Teil mit Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) im Allgemeinen, deren Entstehung und Auswirkung sowie mit geeigneten Messtechniken zur Ermittlung der Konzentrationen. Um die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen in Straßentunneln zu untersuchen, wurde mittels eines Chemilumineszenz-Detektors (CLD) eine Messung im Plabutschunnel bei Graz durchgeführt, wobei hohe Konzentrationen an Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) nachgewiesen wurden. Ein starker Zusammenhang zwischen der NO- bzw.  $\text{NO}_2$ -Konzentration und dem Verkehrsaufkommen konnte mittels linearer Regression festgestellt werden. Um auch die Auswirkungen auf den Menschen zu berücksichtigen, wurde eine Umrechnung der  $\text{NO}_x$ -Konzentration im Tunnel auf die Konzentration im Fahrgastinnenraum durchgeführt. Zusätzlich wurde der Anteil von  $\text{NO}_2$  am gesamten  $\text{NO}_x$  näher beleuchtet, die Konzentrationen an »Black Carbon« gemessen und ein möglicher Zusammenhang mit der Trübe und dem Verkehrsaufkommen untersucht.

Ein weiterer Teil beschäftigt sich mit der Überprüfung von speziell für den Einsatz in Straßentunneln entwickelten Kompaktmessgeräten, welche nach dem Prinzip der Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) arbeiten. Es wurde festgestellt, dass die DOAS-Messung im Vergleich zu einer CLD-Messung etwas höhere Werte liefert, die Messwerte in Summe aber eine gute Übereinstimmung liefern. Zusätzlich wurden die NO- und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen mittels eines eigen entwickelten Berechnungsmodells aus dem Verkehrsaufkommen und der Luftgeschwindigkeit berechnet. Es wurde gezeigt, dass die Berechnung für die Abschätzung von  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen brauchbare Werte liefert, für andere Anwendungsgebiete jedoch zu ungenau ist. Des Weiteren wurden mit Hilfe einer multiplen linearen Regressionsanalyse Emissionsfaktoren aus den gemessenen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen ermittelt und mit den Werten gemäß HBEFA verglichen.

Es erfolgte eine weitere Analyse von NO- und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen, welche aus einem schwedischen Straßentunnel stammen. Hier wurde ebenfalls der Zusammenhang mit dem Verkehr sowie der Anteil des  $\text{NO}_2$  am gesamten  $\text{NO}_x$  untersucht und mit den Werten aus dem Plabutschunnel verglichen.

Zum Abschluss wurden mit den Simulationsmodellen NEMO und PHEMlight Emissionsfaktoren für  $\text{NO}_x$ , CO und Trübe für leichte Nutzfahrzeuge ermittelt. Dabei wurden die Werte der Trübe aus den verbrennungsbedingten Partikeln mittels eines linearen

---

Zusammenhangs errechnet. Die gewonnenen Emissionsfaktoren sollen für die Aktualisierung der Werte dienen, welche von der PIARC als Grundlage für die Berechnung des Frischluftbedarfs in Straßentunneln veröffentlicht werden.



# Abstract

This thesis deals firstly with nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) in general, their formation and impact. Suitable measurement techniques for determining their concentrations are also examined. In order to investigate the  $\text{NO}_x$  concentrations in road tunnels, measurements were carried out in the Plabutsch tunnel in Graz using a chemiluminescence (CLD) detector, whereby high concentrations of nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) were detected. A strong correlation between NO and  $\text{NO}_2$  concentration and traffic volume could be established via linear regression. In order to take account of the impact on humans, the  $\text{NO}_x$  concentration in the tunnel was converted into the concentration in vehicle interiors. Furthermore, the proportion of  $\text{NO}_2$  within the total  $\text{NO}_x$  was examined in more detail, concentrations of Black Carbon (BC) were measured and a possible connection between opacity and traffic volume was investigated.

This thesis also examines compact measuring devices, which are specially developed for use in road tunnels. These devices operate according to the principle of Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). DOAS measurements were found to deliver somewhat higher values compared to CLD measurements, but overall the measured values correlate well. In addition, NO and  $\text{NO}_2$  concentrations were calculated using a calculation model developed by the author based on traffic volume and air velocity. The calculation model was shown to provide useful values for the estimation of  $\text{NO}_x$  concentrations, but it was not accurate enough for other applications. Additionally, emission factors from the measured NO and  $\text{NO}_2$  concentrations were determined using a multiple linear regression analysis and compared with the HBEFA values.

A further analysis of  $\text{NO}_x$  concentrations, originating from a Swedish road tunnel, was carried out. Here too the relationship with traffic as well as the share of  $\text{NO}_2$  in total  $\text{NO}_x$  was investigated and compared with the values from the Plabutsch tunnel.

Finally, the simulation models NEMO and PHEMlight were used to determine emission factors for  $\text{NO}_x$ , CO and opacity for light commercial vehicles. Opacity values of the combustion-related particles were calculated by means of a linear relationship. The resulting emission factors should be used to update the values published by the PIARC as the basis for calculating fresh air requirements in road tunnels.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Luftschadstoffe</b>	<b>3</b>
2.1 Emission und Immission . . . . .	3
2.2 Überblick über Luftschadstoffe . . . . .	4
2.2.1 Emission . . . . .	4
2.2.2 Immission . . . . .	4
2.3 Stickoxide . . . . .	5
2.3.1 Stickstoffmonoxid (NO) . . . . .	5
2.3.2 Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> ) . . . . .	6
2.3.3 Distickstoffmonoxid (N <sub>2</sub> O) . . . . .	6
2.4 Bildung von Stickoxiden . . . . .	6
2.4.1 Thermisches NO (Zeldovich-NO) . . . . .	7
2.4.2 Promptes NO (Fenimore-NO) . . . . .	8
2.4.3 Brennstoff-NO . . . . .	9
2.5 Emissionen von Dieselmotoren . . . . .	9
2.6 NO <sub>x</sub> -Emissionen in Österreich . . . . .	10
2.7 Grenzwerte von Stickoxiden . . . . .	11
2.7.1 Emissionsgrenzwerte . . . . .	12
2.7.2 Immissionsgrenzwerte . . . . .	16
2.8 Auswirkungen von Stickoxiden auf die Umwelt und den Menschen . . . . .	18
2.8.1 Sekundäre Auswirkungen von Stickoxiden . . . . .	19
2.8.1.1 Ozon . . . . .	19
2.8.1.2 Saurer Regen . . . . .	20
2.8.1.3 Sekundäre Partikel . . . . .	20
2.9 Entstickungsmaßnahmen . . . . .	21
2.9.1 Primärmaßnahmen . . . . .	21
2.9.2 Sekundärmaßnahmen . . . . .	21
2.9.2.1 Selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR) . . . . .	22
2.9.2.2 Selektive katalytische Reduktion (SCR) . . . . .	23
2.9.2.3 3-Wege-Katalysator . . . . .	23
2.9.2.4 NO <sub>x</sub> -Speicher-katalysator (NSC) . . . . .	24

<b>3</b>	<b>Messtechnik</b>	<b>27</b>
3.1	Messverfahren . . . . .	27
3.1.1	Chemilumineszenz . . . . .	27
3.1.2	Absorptionsspektroskopie . . . . .	29
3.1.2.1	NDIR (Nondispersive Infrared Spectroscopy) . . . . .	32
3.1.2.2	FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) . . . . .	33
3.1.2.3	LIDAR (Light Detection and Ranging) und DIAL (Differential Absorption LIDAR) . . . . .	34
3.1.2.4	DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) . . . . .	36
3.1.3	Elektrochemisches Verfahren (Amperometrie) . . . . .	38
3.2	Messsysteme für den Einsatz von NO <sub>x</sub> -Messungen in Straßentunneln . . . . .	39
3.3	Messabweichungen . . . . .	41
3.4	Kalibrierung . . . . .	44
3.5	Zusammenhang Volums- und Massenkonzentration . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Durchführung der Messungen im Plabutschtunnel</b>	<b>47</b>
4.1	Methoden der Datenanalyse . . . . .	47
4.2	Allgemeines zum Plabutschtunnel . . . . .	51
4.3	Messaufbau . . . . .	54
4.4	Verkehrsaufkommen und Längsströmung . . . . .	55
4.5	Analyse der Stickoxidkonzentrationen und des Verkehrs . . . . .	56
4.6	Vergleich der Messwerte aus der CLD- und der DOAS-Messung . . . . .	66
4.7	Messung der Ruß-Konzentrationen (Black Carbon) . . . . .	70
4.8	Konzentrationen im Fahrzeuginnenraum . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Berechnung von Stickoxidkonzentrationen in Straßentunneln</b>	<b>77</b>
5.1	Grundlagen zur Berechnung . . . . .	77
5.2	Berechnung der Stickoxidkonzentrationen im Plabutschtunnel . . . . .	79
5.3	Berechnung von Emissionsfaktoren . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Stickoxidkonzentrationen im Norra Länken Tunnel</b>	<b>91</b>
6.1	Allgemeines zum Tunnel . . . . .	91
6.2	Analyse der Daten . . . . .	92
6.3	Massenbilanz . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Emissionsfaktoren PIARC</b>	<b>109</b>
7.1	Allgemeines . . . . .	109
7.2	Ermittlung der Emissionsfaktoren . . . . .	110
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>117</b>
	<b>Literatur</b>	<b>119</b>

<b>Anhang</b>	<b>127</b>
A Emissionsfaktoren für LNF . . . . .	127
B Emissionsfaktoren für PKW . . . . .	140
C Emissionsfaktoren für SNF . . . . .	156



# Formelzeichen und Abkürzungen

## Lateinische Formelzeichen

$A$	$m^2$	Fläche, Querschnittsfläche
$ANZ$	Stk.	Anzahl der Fahrzeuge
$c$	$m/s$	Geschwindigkeit
$d$	$m$	Durchmesser
$I$	$W/m^2$	Itensität
$k$	ppb	Konzentration
$k$	–	Erweiterungsfaktor
$K$	–	Licht-Extinktion
$l$	$m$	Länge
$m$	$kg$	Masse
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
$Ma$	–	Mach-Zahl
$N$	$m^{-3}$	Teilchendichte
$n$	–	Laufvariable
$p$	Pa, bar	Druck
$R$	$J/(kg K)$	spezifische Gaskonstante
$R^2$	–	Bestimmtheitsmaß
$R_a^2$	–	adjustiertes Bestimmtheitsmaß
$s$	–	Standardabweichung
$s^2$	–	Varianz
$T$	$K$	thermodynamische Temperatur
$V$	$m^3$	Volumen
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$x$	$m$	Koordinate

## Griechische Formelzeichen

$\alpha$	–	Signifikanzniveau
$\lambda$	–	Luftverhältnis
$\lambda$	$m$	Wellenlänge

## Formelzeichen und Abkürzungen

---

$\mu$	kg/m <sup>3</sup>	Massenkonzentration
$\nu$	Hz	(Licht-)Frequenz
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	m <sup>2</sup>	Absorptionsquerschnitt
$\tau$	s	Zeit
$\varepsilon_\lambda$	mol <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	molarer Extinktionskoeffizient

## Konstanten

$g$	9.8067	m/s <sup>2</sup>	Normalfallbeschleunigung
$h$	6.6261 · 10 <sup>-34</sup>	J s	Planksches Wirkungsquantum
$R_m$	8314.5	J/(kmol K)	allgemeine (molare) Gaskonstante

## Indizes und Abkürzungen

#	Stück
A	Autobahn
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
AUL	Außenluft
BC	Black Carbon
BGBI	Bundesgesetzblatt
BIPM	Bureau International Poids et Measures
CCD	charge coupled device
CLD	Chemilumineszenz-Detektor (Analysator)
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
CO	Kohlenmonoxid
DIAL	Differential Absorption Light Detection and Ranging
DOAS	Differential Optical Absorption Spectroscopy
Efa	Emissionsfaktor
EG-L	Emissionshöchstmengengesetz-Luft
ELR	European Load Response Test
ESC	European Stationary Cycle
ETC	European Transient Cycle
EU	Europäische Union
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HC	Kohlenwasserstoffe (allgemein)
HGV	Heavy Goods vehicle (schwere Nutzfahrzeuge)



HMW	Halbstundenmittelwert
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
IG-L	Immissionsschutzgesetz-Luft
ISO	International Organization for Standardization
JMW	Jahresmittelwert
KZW	Kurzzeitwert
LDV	Light-Duty vehicle (leichte Nutzfahrzeuge)
LIDAR	Light Detection and Ranging
LKW	Lastkraftwagen
LNF	leichte Nutzfahrzeuge
MAK	maximale Arbeitsplatzkonzentration
NDIR	Nondispersive Infrared Spectroscopy
NEMO	Network Emission Modell
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide, Stickstoffoxide
NSC	NO <sub>x</sub> Storage Catalyst
n/a	not available (nicht verfügbar)
O	(atomarer) Sauerstoff
O <sub>3</sub>	Ozon
OLS	Ordinary Least-Squares
OSD	Optomechanical Scanning Devices
PC	Pessenger Cars (Personenkraftwagen)
PDA	photo diode array
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PIARC	World Road Association
PKW	Personenkraftwagen
PM	particulate matter (Feinstaub)
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
RM	Bezugsmasse
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
S	Schnellstraße
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SMW	Stundenmittelwert
SNCR	Selektive nichtkatalytische Reduktion
SNF	schwere Nutzfahrzeuge
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
TMW	Tagesmittelwert
UML	Umluft
WHO	World Health Organization
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonised Transient Cycle

WLTP     Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure

## Operatoren

d	vollständiges Differential	$\partial$	partielles Differential
$\delta$	unvollständiges Differential	$\Sigma$	Summe

## SI-Präfixe

Y	$10^{24}$	Yotta	d	$10^{-1}$	Dezi
Z	$10^{21}$	Zetta	c	$10^{-2}$	Zenti
E	$10^{18}$	Exa	m	$10^{-3}$	Milli
P	$10^{15}$	Peta	$\mu$	$10^{-6}$	Mikro
T	$10^{12}$	Tera	n	$10^{-9}$	Nano
G	$10^9$	Giga	p	$10^{-12}$	Piko
M	$10^6$	Mega	f	$10^{-15}$	Femto
k	$10^3$	Kilo	a	$10^{-18}$	Atto
h	$10^2$	Hekto	z	$10^{-21}$	Zepto
da	$10^1$	Deka	y	$10^{-24}$	Yokto

# 1 Einleitung

Nicht zuletzt seit den diversen Abgasskandalen einiger Autobauer gerieten Stickoxide durch die Berichterstattung ins Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit. Neben bodennahem Ozon und Feinstaub zählt vor allem das Stickstoffdioxid zu den Luftschadstoffen, die einen erheblich negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit mit sich bringen.

Besonders in Straßentunneln erreichen Stickoxidkonzentrationen teils sehr hohe Werte. So können Spitzenwerte der Stickstoffdioxidkonzentration von über 1000 ppb auftreten ([42], [40]), die den seitens der WHO empfohlenen Grenzwert von 105 ppb (Beurteilungszeitraum eine Stunde) [68] um ein Vielfaches übersteigen.

Derzeit wird die Luftqualität in Straßentunneln primär über die Kohlenmonoxidkonzentration und die Extinktion, welche einer Trübung der Sichtweite entspricht, bewertet. Die Regelung der Tunnellüftungsanlage erfolgt im Normalfall in Bezug auf diese beiden Stoffe.

Obwohl Stickoxide als gesundheitsschädlich betrachtet werden, sieht der Gesetzgeber in Österreich derzeit keine Limitierung in Straßentunneln vor. Eine stickoxidgeregelte Lüftung kommt lediglich dann zum Einsatz, wenn aufgrund umweltrelevanter Aspekte für den Bereich der Abluftöffnungen die Einhaltung bestimmter Höchstwerte von Stickoxidkonzentrationen gefordert wird.

Diese Arbeit beschäftigt sich im Folgenden mit der Analyse von Stickoxidkonzentrationen in Straßentunneln. Dazu werden die Konzentrationen im Plabutschunnel (Österreich) und im Norra Länken Tunnel (Schweden) untersucht. Im Plabutschunnel werden Messungen mit zwei verschiedenen Messverfahren, einem Chemilumineszenz-Analysator und einem speziell für den Einsatz in Tunneln entwickelten DOAS-Kompaktmessgerät, durchgeführt und miteinander verglichen. Die Messdaten aus Schweden werden durch fix installierte DOAS-Kompaktmessgeräte, die auch für die Überwachung der Luftqualität im Norra Länken Tunnel zuständig sind, erfasst.

Neben den durchgeführten Messungen wird auch versucht, die Konzentrationen an Stickoxiden rechnerisch zu ermitteln. Des Weiteren wird der Anteil des schädlicheren Stickstoffdioxids an den gesamten Stickoxiden näher beleuchtet.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung von Emissionsfaktoren für die Schadstoffe Kohlenmonoxid, Stickoxid und Extinktion. Aufgrund des technischen Fortschritts, der sich ändernden gesetzlichen Vorgaben und der stetigen

Erneuerung der Fahrzeugflotte, müssen diese Emissionsfaktoren immer wieder auf den neuesten Stand gebracht werden. Diese aktualisierten Werte sollen in weiterer Folge in der aktuellen Ausgabe des »Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation« der PIARC mit aufgenommen werden, wo sie als Grundlage zur Dimensionierung von Frischluftanlagen in Straßentunnel herangezogen werden.

## 2 Luftschadstoffe

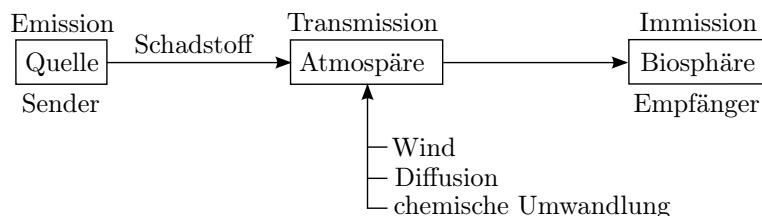
Als Luftschadstoffe werden in der Atmosphäre jene Substanzen bezeichnet, welche die Umwelt in negativer Weise beeinträchtigen. Diese Beeinträchtigungen können durch Partikel, Gase oder Aerosole erfolgen. Luftschadstoffe können sich direkt auf die Gesundheit von Mensch und Tier sowie auf die Vegetation, den Boden und die Gewässer auswirken. Indirekte Auswirkungen beeinflussen beispielsweise das Klima (Treibhauseffekt). [64]

### 2.1 Emission und Immission

Grundsätzlich muss in Bezug auf Luftschadstoffe zwischen Emission und Immission unterschieden werden. Emissionen kennzeichnen luftverunreinigende Stoffe aller Art, die durch Emissionsquellen an die Umgebung abgegeben werden. Unter Immission hingegen versteht man »die Zuführung von Luftverunreinigungen, die ständig oder vorübergehend in Bodennähe verweilen« [23].

Der Transport und alle Vorgänge zwischen Emission und Immission werden als Transmission bezeichnet. Die Transmission beschreibt also die Vorgänge der Schadstoffe unter dem Einfluss von Bewegungsphänomenen und chemischen oder physikalischen Reaktionen in der Atmosphäre [9].

Abbildung 2.1 zeigt eine schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Emission, Transmission und Immission von Schadstoffen.



**Abbildung 2.1:** Einfaches Modell für Emission, Transmission und Immission [9]

## 2.2 Überblick über Luftschadstoffe

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über verschiedene Luftschadstoffe bieten. Es wurden jene Luftschadstoffe angeführt, die nach Ansicht des Gesetzgebers negative Auswirkungen entfalten und somit einer gesetzlichen Regelung bedürfen. Dabei ist wie in Kapitel 2.1 erläutert zwischen Emissionen und Immissionen zu unterscheiden.

### 2.2.1 Emission

Die Zusammensetzung der emittierten Luftschadstoffe hängt stark von der Art des Emittenten ab. Als hauptsächliche Verursacher von Schadstoffen sind der Verkehr, die Energiegewinnung sowie die Industrie zu nennen. [9]

In der nachfolgenden Aufstellung sind die im Emissionshöchstmengengesetz-Luft (EG-L) (BGBI. I 34/2003) und im Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen (EG-K) (BGBI. I 81/2015) geregelten Luftschadstoffe angeführt.

- Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) - EG-L, EG-K
- Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) - EG-L, EG-K
- flüchtige organische Verbindungen außer Methan (NMVOC) - EG-L
- Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) - EG-L
- Staub - EG-K
- Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) - EG-K

### 2.2.2 Immission

Die wichtigsten Luftschadstoffe die einen Einfluss auf die menschliche Gesundheit ausüben, wurden im Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) (BGBI. I 58/2017) zusammengefasst und deren Grenzwerte festgelegt. Unterschieden wird zwischen Konzentrationen in der Luft und Depositionen, also Niederschlägen.

Konzentrationen:

- Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ )
- Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ )
- Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ )
- Feinstaub ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ )

- Blei (Pb) im Feinstaub (PM<sub>10</sub>)
- Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

Depositionen:

- Staubniederschlag
- Blei (Pb) im Staubniederschlag
- Cadmium (Cd) im Staubniederschlag

Weitere Luftschadstoffe welche Auswirkungen auf die Vegetation mit sich bringen, finden sich in der zweiten Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen (BGBL. 199/1984). Die gesetzlichen Grenzwerte für Stickoxide werden in Kapitel 2.7 näher behandelt.

In weiterer Folge soll nun auf die für diese Arbeit wichtigen Stickoxide näher eingegangen werden.

## 2.3 Stickoxide

Als Stickoxide oder auch Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) versteht man generell ein Gemisch aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>). NO<sub>x</sub>-Konzentrationen beschreiben die Summe der Konzentrationen aus NO + NO<sub>2</sub> und sind meist auf NO<sub>2</sub> bezogen. [9]

### 2.3.1 Stickstoffmonoxid (NO)

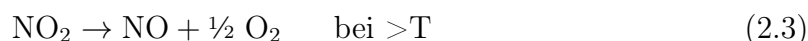
Stickstoffmonoxid entsteht als unerwünschtes Nebenprodukt bei der Verbrennung unter hohen Temperaturen. Die 3 Hauptmechanismen zur Bildung von NO werden in Kapitel 2.4 beschrieben.

Unter Normalbedingungen ist NO ein farb- und geruchloses Gas. In Kontakt mit Sauerstoff (O<sub>2</sub>) oder Ozon (O<sub>3</sub>) oxidiert es zu Stickstoffdioxid (Reaktion 2.1 und 2.2) [56]. Die Molmasse beträgt 30,01 g/mol.



### 2.3.2 Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)

Stickstoffdioxid ist ein rotbraunes, erstickend riechendes Gas [56]. Oberhalb von 150°C beginnt sich NO<sub>2</sub> wieder in NO und O<sub>2</sub> zu zersetzen (Reaktion 2.3) [9]. Die Molmasse beträgt 46,01 g/mol.



### 2.3.3 Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O)

Ein weiteres Oxid des Stickstoffs ist das Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O), das auch unter dem Trivialnamen Lachgas bekannt ist. Es zählt zwar nicht direkt zu den als NO<sub>x</sub> bezeichneten Stickoxiden, ist aber aufgrund seines hohen Treibhauspotentials ein sehr wichtiges Oxid des Stickstoffs und soll der Vollständigkeit halber hier erwähnt sein. Gebildet wird es hauptsächlich durch Umwandlung von stickstoffhaltigem Dünger und durch Tierhaltung. Prinzipiell ist N<sub>2</sub>O eine Quelle für NO (Reaktion 2.4). Diese Umwandlung geschieht aber hauptsächlich in der Stratosphäre. In der erdnahen Lufthülle ist N<sub>2</sub>O chemisch inert. [66] [9]



## 2.4 Bildung von Stickoxiden

Auf natürlichem Wege entstehen Stickoxide hauptsächlich durch Blitze oder bakterielle Prozesse im Boden. Der Großteil der Stickoxide hat aber anthropogene Quellen (ca. 80%) [23]. Im Allgemeinen entstehen Stickoxide bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen und Biomasse unter hohen Temperaturen. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über den Anteil der anthropogenen und natürlichen Quellen bei der Stickoxidbildung. Anzumerken ist, dass besonders die Bewertung der natürlichen Quellen sehr komplex und ungenau ist [32]. Somit sind diese Werte nur als grobe Richtwerte zu verstehen.

Bei Verbrennungen entsteht im Brennraum hauptsächlich NO welches nach genügend langer Verweilzeit in der Atmosphäre fast vollständig zu NO<sub>2</sub> umgewandelt wird [19]. Prinzipiell ist bei der Bildung von NO zwischen drei Prozessen zu unterscheiden. Dem thermischen NO, welches bei hohen Temperaturen gebildet wird, dem prompten NO, das auch bei relativ niedrigen Temperaturen entsteht und dem Brennstoff-NO. [66]

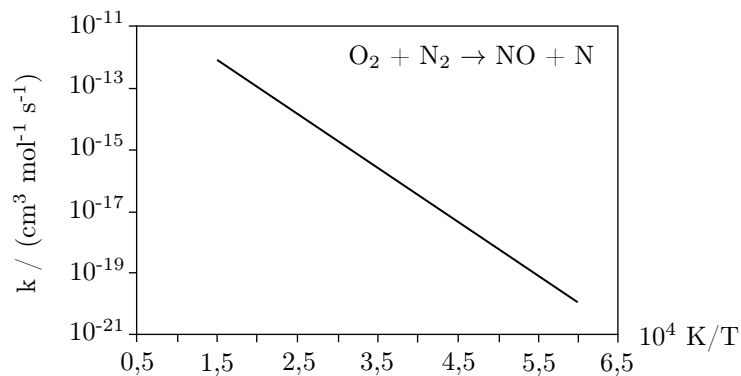


**Tabelle 2.1:** Quellen der Stickoxide (NO<sub>x</sub>) in der Troposphäre [38]

Quelle	Tg N/a	
Gewitter	3 (2-6)	9 %
Böden und Vegetation	3,2 (1,9-4,5)	10 %
natürliche Quellen:	6,2	19 %
Landwirtschaft	2,3 (1,4-3,2)	7 %
Biomasseverbrennung	3,3 (2,1-5,5)	10 %
Fossile Brennstoffe	21 (20-23)	64 %
anthropogene Quellen:	26,6	81 %

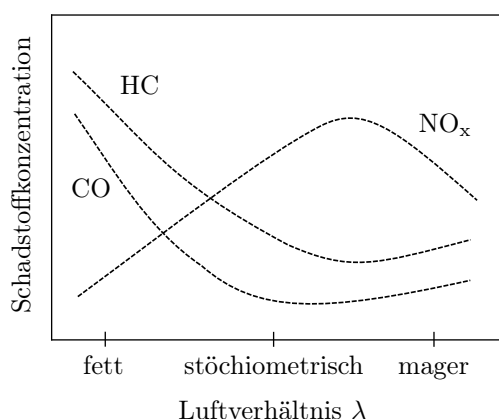
### 2.4.1 Thermisches NO (Zeldovich-NO)

Thermisches NO entsteht aus der Reaktion von Luftstickstoff mit Sauerstoff. Aufgrund der starken N<sub>2</sub>-Dreifachbindung besitzt die Reaktion 2.5 eine hohe Aktivierungsenergie und benötigt hohe Temperaturen, um ausreichend schnell abzulaufen. Das gebildete Stickstoffatom reagiert weiter mit dem molekularen Sauerstoff (Reaktion 2.6). Die Reaktionsgeschwindigkeit ist eine Funktion der Temperatur und nimmt exponentiell mit ihr zu. In Abbildung 2.2 ist die Temperaturabhängigkeit des Geschwindigkeitskoeffizienten  $k_1$  der geschwindigkeitsbestimmenden Reaktion dargestellt.

**Abbildung 2.2:** Temperaturabhängigkeit des Geschwindigkeitskoeffizienten  $k_1$  ([67], zitiert nach [36])

Ebenfalls stark temperaturabhängig ist die vorgelagerte Dissoziation von molekularem Sauerstoff in Sauerstoffatome. Die gebildeten Sauerstoffatome reagieren wie gezeigt mit dem molekularen Stickstoff. [66] [9].

Abbildung 2.3 zeigt die Konzentration von  $\text{NO}_x$  in Abhängigkeit des Luftverhältnisses. Gut zu erkennen ist, dass die Konzentration bei hohen Temperaturen und ausreichendem Sauerstoffangebot am höchsten ist ( $\lambda \sim 1,1$ ). Bei weiterer Erhöhung des Luftüberschusses sinkt auch die Temperatur und somit die  $\text{NO}_x$ -Konzentration.

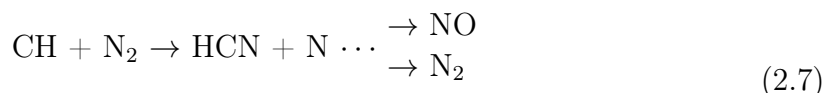


**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung der Schadstoffbildung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses [19]

### 2.4.2 Promptes NO (Fenimore-NO)

Als Hauptquelle bei der Bildung von promptem NO dient das CH-Radikal welches mit Luftstickstoff reagiert. Der genaue Bildungsweg des Fenimore-NO in der Flammenfront ist sehr komplex und lässt sich zurzeit noch nicht genau nachbilden. [19] [66]

Ein weit verbreiteter Ansatz ist der Bildungsweg über HCN (Blausäure) als Zwischenpezies (Reaktion 2.7). Untersuchungen (z.B. [15]) zeigen jedoch, dass die berechnete Reaktionsrate um 2 Größenordnungen kleiner als die der experimentell ermittelten Rate ist. Ein möglicher alternativer Bildungsweg könnte über die Bildung von NCN als Zwischenprodukt erfolgen. [19]



Die Bildung von promptem NO erfolgt vor allem bei sauerstoffarmen Verbrennungen. Der Beitrag am gesamten NO spielt aber derzeit bei gängigen Feuerungsanlagen mit hohen Temperaturen eine untergeordnete Rolle. [23] [9]

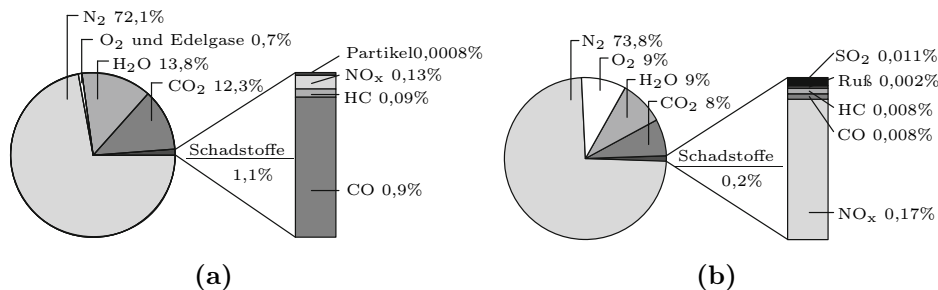
### 2.4.3 Brennstoff-NO

Brennstoff-NO tritt bei der Oxidation von stickstoffhaltigen Brennstoffen auf. Dies geschieht fast ausschließlich bei Kohlefeuerungen, da selbst sehr reine Kohle einen Stickstoffanteil von etwa 1% aufweist. Der im Brennstoff gebundene Stickstoff entweicht durch die Pyrolyse und Vergasung. In der Gasphase kommt es daraufhin zur Bildung von NO [66].

## 2.5 Emissionen von Dieselmotoren

Moderne, direkteinspritzende Dieselmotoren besitzen den höchsten thermischen Wirkungsgrad aller Verbrennungskraftmaschinen, haben aber gleichzeitig einen relativ hohen Ausstoß an Schadstoffen. Besonders Partikel und Stickoxide führen bei Dieselmotoren immer wieder zu Problemen. [20]

Abbildung 2.4 zeigt eine typische Zusammensetzung der Abgase eines Diesel- und eines Ottomotors ohne Katalysator. Wie zu sehen ist, betragen die Schadstoffe (CO, HC) des Dieselmotors nur ca. ein Fünftel des Ottomotors. Die Stickoxidemission ist bei beiden aber ungefähr gleich hoch. [19]



**Abbildung 2.4:** Rohemissionen (ohne Katalysator) in Volumenprozent eines (a) Ottomotors und (b) Dieselmotors [19]

Der große Unterschied zwischen Otto- und Dieselmotor bzgl. der Stickoxidemissionen zeigt sich aber erst nach der Abgasnachbehandlung. Der Betrieb von Dieselmotoren erfolgt im Sauerstoffüberschuss. Das Luftverhältnis  $\lambda$  ist im Vergleich zu jenem vom Ottomotor viel höher. Dies führt wiederum zu einer deutlich abgesenkten Abgastemperatur. Eine Reduzierung der Stickoxide kann aufgrund von  $\lambda > 1$  nicht, wie beim Ottomotor, im Katalysator (3-Wege-Katalysator) erfolgen. [7]

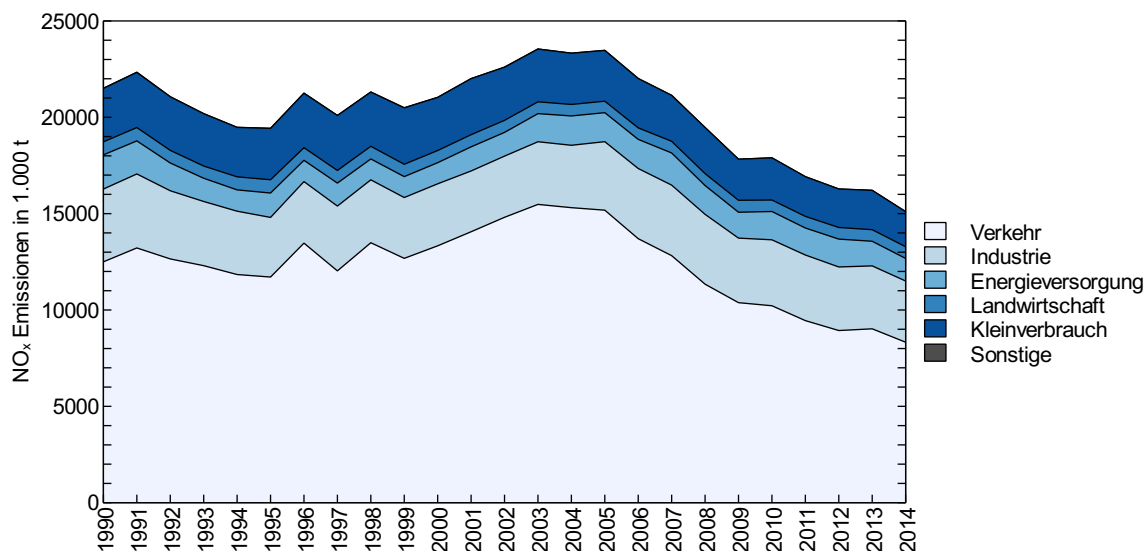
Ein weiterer Grund für die erhöhte NO<sub>2</sub>-Emission bei Dieselmotoren ist die Verwendung eines Oxidationskatalysators. Das gezielt im Oxidationskatalysator aus NO entstandene

ne  $\text{NO}_2$  dient als Oxidationsmittel bei der Verbrennung der Rußpartikel im Partikelfilter und ist somit teilweise gewünscht. [19] [63]

Mögliche Maßnahmen zur Entstickung bei Dieselmotoren werden in Kapitel 2.9 behandelt.

## 2.6 $\text{NO}_x$ -Emissionen in Österreich

Wie in Abbildung 2.5 zu sehen, sind die Hauptverursacher von Stickoxidemissionen in Österreich der Verkehr, gefolgt von Industrie, Kleinverbrauch (z.B. Feuerungen in Haushalt und Gewerbe), Energiewirtschaft und Landwirtschaft.



**Abbildung 2.5:** Verursacher von  $\text{NO}_x$  (als  $\text{NO}_2$ ) Emissionen in Österreich von 1990 - 2014 inkl. Kraftstoffexport (Daten aus [64])

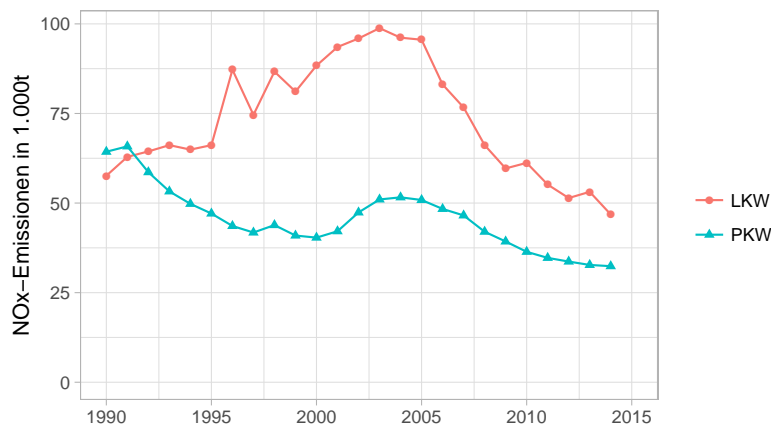
Im Folgenden wird nun näher auf die für diese Arbeit wichtigen verkehrstechnischen Aspekte eingegangen.

### Verkehr

Obwohl der Sektor Verkehr seit 1990 34% weniger Stickoxide emittiert, ist er weiterhin der Hauptemittent. Der Anteil des Verkehrs lag 2014 bei über 56% (inkl. Kraftstoffexport) [64].

In Abbildung 2.6 sind die jährlichen  $\text{NO}_x$ -Emissionen einerseits von Personenkraftwagen (PKW) und andererseits von Lastkraftwagen (LKW) und Bussen im Zeitraum von

1990 bis 2014 dargestellt. Obwohl die Fahrleistungen bei LKW (schwere und leichte Nutzfahrzeuge) in den letzten Jahren stiegen, nahmen die  $\text{NO}_x$ -Emissionen seit 2005 fast stetig ab [64]. Dies ist hauptsächlich den erhöhten Vorschriften bzgl. der Abgaswerte zuzuschreiben (siehe Kapitel 2.7.1). Besonders die Einführung der Euro IV (2005) und in weiterer Folge der Euro V (2008) Abgasnorm führten zu einer deutlichen Verringerung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Obwohl im Schwerverkehr hauptsächlich Dieselmotoren zum Einsatz kommen, konnten durch moderne Abgasnachbehandlungssysteme die Emissionen von LKW gesenkt werden.



**Abbildung 2.6:**  $\text{NO}_x$ -Emissionen von PKW und LKW (Daten aus [14])

Auch bei den PKW zeigt sich eine Verringerung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Diese ist aber hauptsächlich den verbesserten Abgasnachbehandlungssystemen bei Ottomotoren zu verdanken (3-Wege-Katalysator). Bei mit Dieselmotoren betriebenen PKW gibt es seit 1990 einen Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. In Abbildung 2.7 ist die Verteilung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Straßenverkehrs in Bezug auf die Fahrzeugkategorien dargestellt.

Dies hat einerseits mit dem starken Anstieg an Diesel-PKW (Abbildung 2.8) und andererseits mit der Problematik der Entstickung bei Dieselmotoren zu tun. Mit Einführung der Euro 6 Abgasnorm werden die Hersteller jedoch dazu gezwungen, selektive Abgasnachbehandlungssysteme auch bei Diesel-PKW einzusetzen.

## 2.7 Grenzwerte von Stickoxiden

Auch bei den gesetzlichen Grenzwerten ist zwischen Emissionen und Immissionen zu unterscheiden. Anzumerken ist, dass in Bezug auf Stickoxide die Immissionsgrenzwerte (IG-L) das schädlichere  $\text{NO}_2$  limitieren, die Emissionsgrenzwerte (EG-L, Euro-Norm) hingegen das  $\text{NO}_x$  als Summe von  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  regeln. Der Anteil des  $\text{NO}_2$  am gesamten  $\text{NO}_x$  spielt für die Emissionsgrenzwerte derzeit noch keine Rolle.

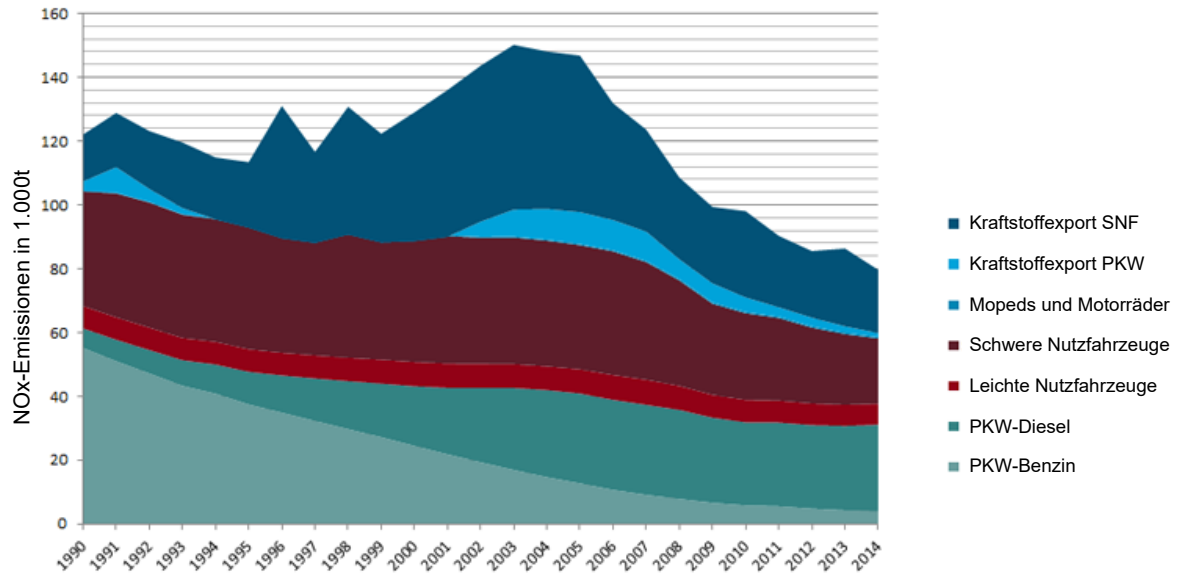


Abbildung 2.7: NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Österreich [65]

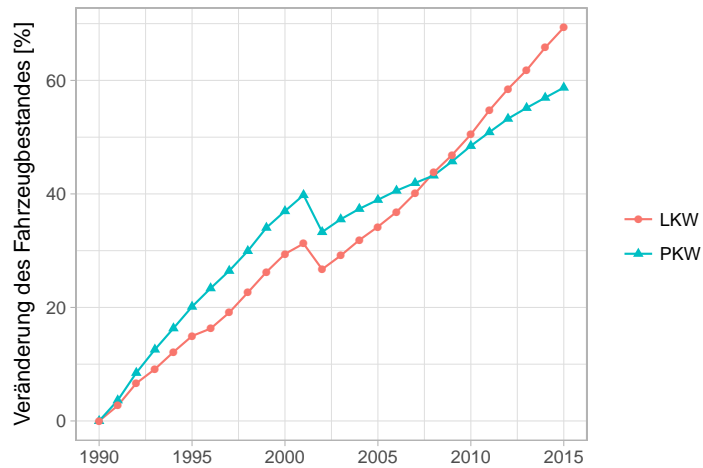
### 2.7.1 Emissionsgrenzwerte

Emissionsgrenzwerte sind grundsätzlich für jeden Emittententyp spezifisch. Gesetzliche Regelungen bestehen vor allem für die Bereiche Betriebsanlagen, Heizungsanlagen und Kraftfahrzeuge.

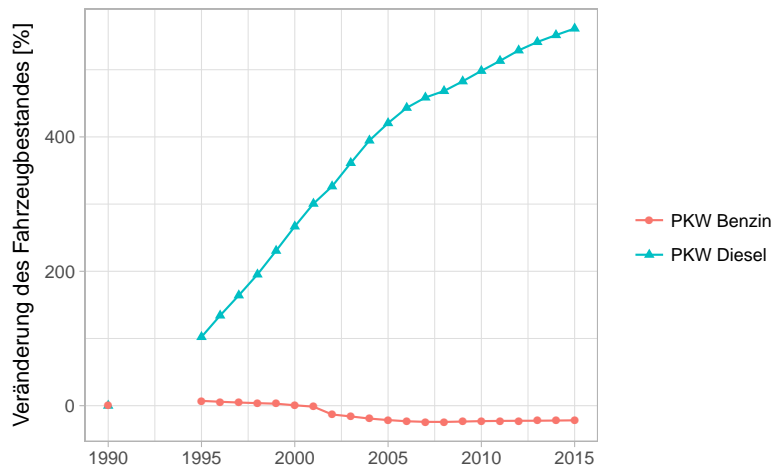
Wichtige Rechtsgrundlagen sind unter anderem:

- das Emissionshöchstmengengesetz-Luft (EG-L) (BGBl. I 34/2003)
- das Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen 2013 (EG-K 2013), BGBl. I 127/2013
- die Gewerbeordnung 1994 und die darauf basierende Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit über die Begrenzung der Emission von luftverunreinigenden Stoffen aus Anlagen zur Erzeugung von Nichteisenmetallen und Refraktärmetallen - NER-V (BGBl. II 86/2008)
- die VOC Anlagenverordnung (BGBl. II 77/2010)
- die Feuerungsanlagenverordnung (BGBl. II 312/2011)
- die Abgasnormen für Kraftfahrzeuge (Euro-Norm)

Als besonders wichtige gesetzliche Regelung in Bezug auf die gesamten Stickoxidemissionen ist die Richtlinie 2001/81/EG über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe hervorzuheben. Sie wurde im Emissionshöchstmengengesetz-Luft



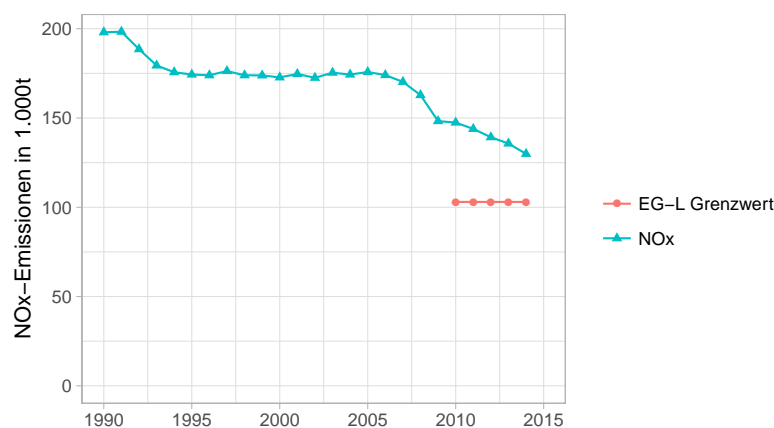
(a)



(b)

**Abbildung 2.8:** Prozentuale Änderung des Fahrzeugbestandes (bezogen auf 1990) in Österreich von 1990-2015 (Daten aus [58]) (a) PKW und LKW (b) PKW Diesel und PKW Benzin

(EG-L) (BGBl. I 34/2003) in nationales Recht umgesetzt und regelt seit dem Jahr 2010 die gesamten Emissionen von Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Ammoniak und flüchtigen organischen Verbindungen. Für  $\text{NO}_x$  gilt ein Grenzwert von 103 Kilotonnen/Jahr (ohne Kraftstoffexport) welcher jedoch bis dato noch nie eingehalten wurde (siehe Abbildung 2.9).



**Abbildung 2.9:**  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Österreich von 1990 - 2014 exkl. Kraftstoffexport (Daten [64])

Im folgenden Kapitel wird näher auf die speziellen Grenzwerte in Zusammenhang mit Kraftfahrzeugen eingegangen.

### Abgasnorm

Die europäische Richtlinie 2007/46/EG schafft einen gesetzlichen Rahmen zur Genehmigung von Kraftfahrzeugen. Grenzwerte für Emissionen von leichten PKW und LKW wurden in der Verordnung 715/2007/EG (gültig ab EURO 5) festgelegt. Weitere Vorschriften finden sich in ergänzenden Verordnungen wie z.B. 692/2008/EG in Verbindung mit 646/2016/EU, 566/2011/EU und 459/2012/EU.

Die aktuelle Norm Euro 6 trat mit 1. September 2014 für die Typengenehmigung neuer PKW und ab 1. Jänner 2015 für die Zulassung, den Verkauf und die Inbetriebsetzung von PKW in Kraft (VO 459/2012/EU). Für Fahrzeuge mit Diesel-Motoren wurde eine erhebliche Reduktion der maximalen Stickoxidemissionen umgesetzt. Die Verringerung von Euro 5 auf Euro 6 beträgt mehr als 50% und soll eine Annäherung an die Grenzwerte von Otto-Motoren mit sich bringen. In Tabelle 2.2 sind auszugsweise die Grenzwerte der  $\text{NO}_x$ -Emissionen für die Abgasklassen Euro 5 und Euro 6 angegeben.

Die Emissionsdaten von PKW werden auf einem Rollenprüfstand unter Absolvierung eines genormten Fahrzyklus (Neuer Europäischer Fahrzyklus NEFZ) ermittelt. Ab 2017



soll der NEFZ durch den realitätsnäheren WLTP (Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure) abgelöst werden. Zusätzlich werden die Emissionen mit dem RDE-Verfahren (Real Driving Emissions), welches nicht mehr im Labor sondern im Freien auf einer Straße stattfindet, erfasst. Diese Emissionen dürfen im Vergleich zu den mittels WLTP gemessenen Emissionen einen gewissen Faktor, den so genannten Konformitätsfaktor (Conformity Factor, CF), nicht übersteigen.

**Tabelle 2.2:** Grenzwerte der NO<sub>x</sub>-Emissionen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge (nach VO 692/2008/EG)

Fahrzeug- klasse	Gruppe	Bezugsmasse [kg]	NO <sub>x</sub> Euro 5 [mg/km]		NO <sub>x</sub> Euro 6 [mg/km]		Verringerung	
			Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel
M		Alle	60	180	60	80	0 %	56 %
N1	I	$RM \leq 1.305$	60	180	60	80	0 %	56 %
	II	$1.305 < RM \leq 1.760$	75	235	75	105	0 %	55 %
	III	$1.760 < RM$	82	280	82	125	0 %	55 %
N2		Alle	82	280	82	125	0 %	55 %

M: Kraftwagen zur Personenbeförderung

N1: Fahrzeuge für Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von nicht mehr als 3.500 kg

N2: Fahrzeuge für Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3.500 kg und nicht mehr als 12.000 kg

Für LKW und Busse mit einem Eigengewicht von mehr als 3,5 t, finden sich die gesetzlichen Regelungen zur Festlegung von Grenzwerten der Emissionen in der Richtlinie 1999/96/EG (gültig für Euro III, IV, V) als auch in der Verordnung 595/2009/EG in Verbindung mit der Verordnung 582/2011/EU (gültig ab EURO VI).

Bei LKW und Bussen erfolgt die Beurteilung der Emissionen nicht fahrstreckenspezifisch wie bei PKW (mg/km), sondern bezogen auf die Motorarbeit (g/kWh). (VO 582/2011/EU)

Tabelle 2.3 zeigt die unterschiedlichen Euro-Normen mit ihren Grenzwerten für Stickoxidemissionen.

Wie gezeigt, wurden die Emissionsgrenzwerte für Stickoxide in den letzten Jahren immer weiter verschärft. Trotz aller Bemühungen des Gesetzgebers konnten die Grenzwerte des EG-L nicht eingehalten werden.

Aufgrund der Manipulationsvorwürfe der US-amerikanischen Umweltbehörde (US-EPA) gegen den Volkswagen Konzern im Jahr 2015 [11], gerieten Diesel-PKW zunehmend in den Verdacht erhöhte Stickoxidemissionen aufzuweisen. Daraufhin wurden durch das deutsche Kraftfahrt-Bundesamt 56 Stickoxidmessungen an 53 Modellen von Dieselfahrzeugen durchgeführt.

Es wurden 24 Fahrzeuge der Emissionsstufe Euro 5 und 32 Fahrzeuge der Emissionsstu-

**Tabelle 2.3:** Grenzwerte der NO<sub>x</sub>-Emissionen für LKW und Busse >3,5 t (nach Verordnung 582/2011/EU und Richtlinie 1999/96/EG)

Norm	Einführung	Testzyklus	NO <sub>x</sub> [g/kWh]
Euro III	2000	ESC/ELR	5,0
Euro III	2000	ETC	5,0
Euro IV	2005	ESC/ELR	3,5
Euro IV	2005	ETC	3,5
Euro V	2008	ESC/ELR	2,0
Euro V	2008	ETC	2,0
Euro VI	2013	WHSC	0,4
Euro VI	2013	WHTC	0,46

fe Euro 6 getestet. Dabei wurden verschiedene Prüfzyklen am Rollenprüfstand sowie unter realen Bedingungen auf der Straße abgefahren. [11]

Abbildung 2.10 zeigt nun einige Ergebnisse der Fahrzeuge mit Emissionsstufe EURO 6. Gezeigt ist der zurzeit im europäischen Typengenehmigungsverfahren festgelegte NEFZ (Rollenprüfstand), eine Straßenmessung in Anlehnung an den NEFZ (NEFZ Straße) und die in Zukunft erforderliche realitätsnahen Straßenmessung nach RDE (Real-driving emissions).

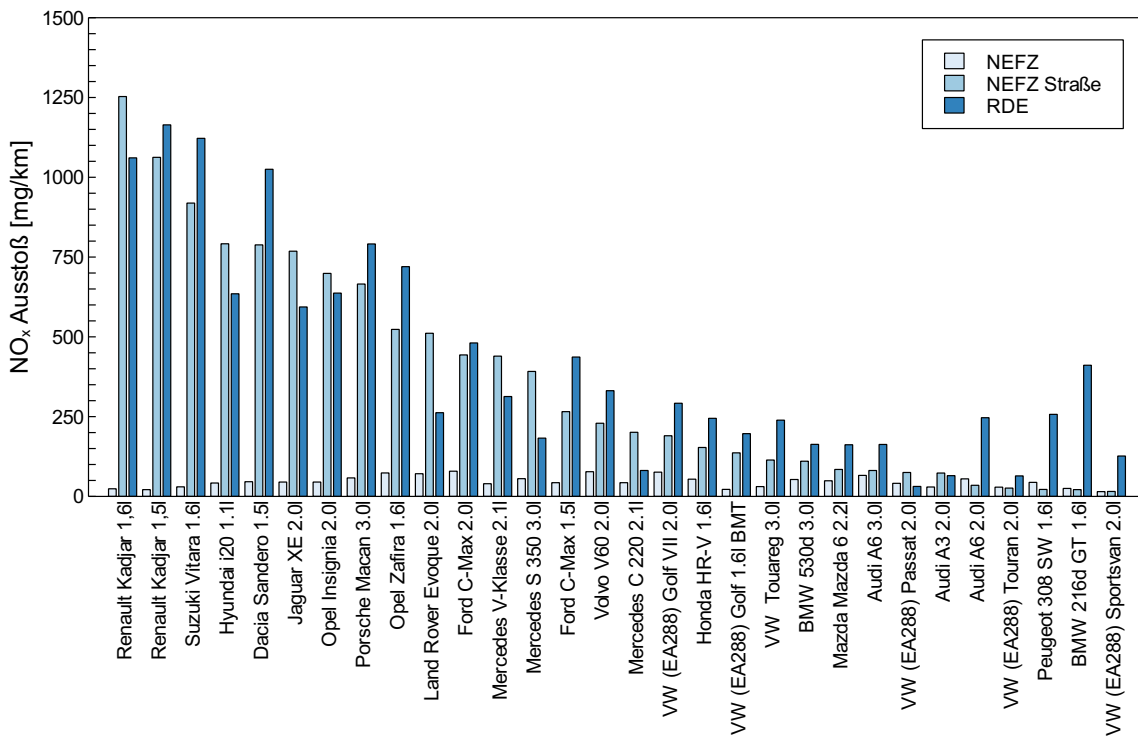
Wie zu sehen, hielten am Rollenprüfstand (NEFZ) alle Fahrzeuge den gesetzlichen EURO 6 Grenzwert von 80 mg/km ein. Bei den Straßenmessungen NEFZ Straße und RDE gab es hingegen teils massive Abweichungen. So wurden bei einzelnen Fahrzeugen eine 15-fache Überschreitung des Grenzwerts festgestellt (Renault Kadjar 1,6l). Nur drei aller getesteten Fahrzeuge (VW (EA288) Passat 2.0l, Audi A3 2.0l, VW (EA288) Touran 2.0l) konnten den vorgeschriebenen Grenzwert in allen Messungen einhalten.

Dies zeigt eindeutig, dass die gesetzlichen Regelungen für Diesel PKW in der Praxis bei weitem nicht eingehalten werden.

## 2.7.2 Immissionsgrenzwerte

Immissionsgrenzwerte sind in Österreich hauptsächlich im Immissionsschutzgesetz-Luft (BGBl. I 77/2010), dem Forstgesetz (BGBl. I 56/2016) und die darauf basierende zweite Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen (BGBl. 199/1984) sowie dem Ozongesetz (BGBl. I 34/2003) geregelt.

Auf europäischer Ebene (EU) bildet die Richtlinie 1999/30/EG die maßgebliche Rechtsgrundlage zur Festlegung der Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Den Mitgliedsstaaten steht es jedoch offen



**Abbildung 2.10:**  $\text{NO}_x$ -Ausstoß von EURO 6 Fahrzeugen unter verschiedenen Prüfzyklen (Daten aus [11])

Verschärfungen dieser Richtlinie vorzunehmen.

In Österreich wurde die Richtlinie der EU im Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) umgesetzt, welches das wichtigste Gesetz zur Erreichung der Luftqualitätsziele zum Schutz der menschlichen Gesundheit darstellt.

Eine Sonderstellung bilden die maximalen Schadstoffkonzentrationen am Arbeitsplatz. In Österreich sind diese durch die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) in der Grenzwertverordnung 2011 - GKV 2011 (BGBl. II 186/2015) geregelt. Der Grenzwert liegt in der Regel bei einem Vielfachen des IG-L Grenzwertes. Die in der Verordnung festgelegten MAK-Grenzwerte dienen dem Schutz der Gesundheit von Arbeitnehmern. Gemäß § 2 (2) GKV 2011 können aber im Einzelfall (z.B. bei Schwangerschaft), selbst bei Einhaltung der Grenzwerte, gesundheitliche Beeinträchtigungen nicht ausgeschlossen werden. Als Beurteilungszeitraum wird nach § 4 (1) GKV 2011 in der Regel von einer 40-stündigen Arbeitswoche mit einer achtstündigen Exposition ausgegangen.

In Tabelle 2.4 sind nun die Grenz- und Zielwerte der IG-L und der MAK aufgelistet. Zusätzlich wurden noch die Empfehlungen der WHO (World Health Organization) [68]

mit aufgenommen. Wie zu sehen, liegen die Grenzwerte des IG-L nahe an den Empfehlung der WHO. Die MAK-Grenzwerte hingegen unterscheiden sich um ein Vielfaches.

**Tabelle 2.4:** Immissionsgrenz- und zielwerte für NO und NO<sub>2</sub>

Schadstoff	Beurteilungszeitraum	Grenzwert [µg/m <sup>3</sup> ]	Beschreibung/Quelle
NO <sub>2</sub>	HMW	200	Immissionsgrenzwert IG-L (Anlage 1a)
NO <sub>2</sub>	JMW	30	Immissionsgrenzwert IG-L (Anlage 1a)
NO <sub>2</sub>	TMW	80	Zielwert IG-L (Anlage 5a)
NO <sub>2</sub>	KZW	12.000	Immissionsgrenzwert MAK (Anhang I GKV 2011)
NO <sub>2</sub>	TMW	6.000	Immissionsgrenzwert MAK (Anhang I GKV 2011)
NO	TMW	30.000	Immissionsgrenzwert MAK (Anhang I GKV 2011)
NO <sub>2</sub>	SMW	200	Empfehlungen der WHO [68]
NO <sub>2</sub>	JMW	40	Empfehlungen der WHO [68]

## 2.8 Auswirkungen von Stickoxiden auf die Umwelt und den Menschen

Stickstoffmonoxid kann beim Menschen in ausreichend vorhandener Konzentration zu Methämoglobinbildung (führt zu Zyanose) und durch Oxidation an der Luft zu einer Reizung der Atemwege und der Augen führen [56].

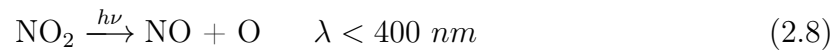
Als noch schädlicher ist jedoch Stickstoffdioxid einzustufen. NO<sub>2</sub> zählt neben bodennahem Ozon und Feinstaub zu jenen Luftschadstoffen, die einen signifikant negativen Effekt auf die menschliche Gesundheit haben [22]. Verschiedene toxikologische Untersuchungen zeigen, dass NO<sub>2</sub> ein giftiges Gas ist. Selbst kurzfristige Exposition, bei Konzentrationen von über 200 µg/m<sup>3</sup>, bringen erhebliche gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen mit sich [68]. Im Vergleich beträgt die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für NO<sub>2</sub> nur ein Fünftel des Grenzwertes von NO. In Verbindung mit Wasser reagiert NO<sub>2</sub> zu Salpetersäure, welche an Schleimhäuten zu einer starken Reizung führen kann [56]. Weiters können Infektionen wie Bronchitis und Lungenentzündungen sowie eine Verringerung der Immunabwehr auftreten [68].

## 2.8.1 Sekundäre Auswirkungen von Stickoxiden

Stickoxide können nicht nur auf direktem Wege die menschliche Gesundheit beeinträchtigen. Auch Reaktionsprodukte, die in der Atmosphäre entstehen, haben Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt.

### 2.8.1.1 Ozon

Stickoxide tragen in Verbindung mit der UV-Strahlung zur Bildung von Ozon ( $O_3$ ) bei. In einem Primärschritt wird durch Photolyse ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) aus  $NO_2$  NO und atomarer Sauerstoff (O) gebildet (Reaktion 2.8).



Im nächsten Schritt reagiert der atomare Sauerstoff schnell mit dem in der Umgebung enthaltenen Sauerstoff ( $O_2$ ) und bildet Ozon (Reaktion 2.9).



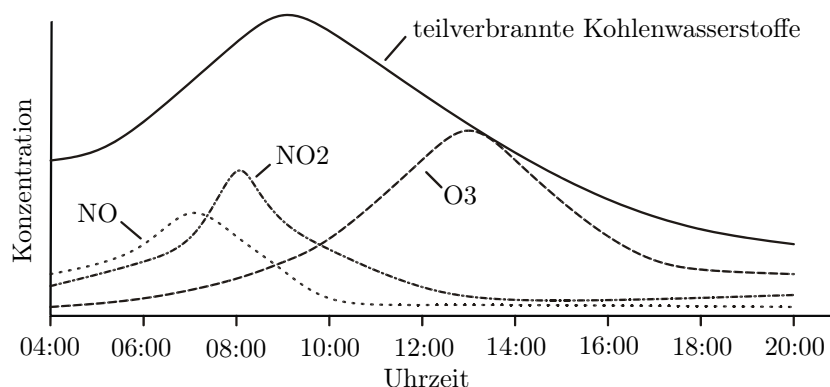
Als M wird ein drittes Teilchen bezeichnet, das zur Abführung der Reaktionsenergie benötigt wird, da ansonsten das  $O_3$  sofort wieder in  $O_2$  zerfallen würde. Nach ausreichender Verweilzeit zersetzt sich das gebildete  $O_3$  unter Bildung von  $NO_2$  und  $O_2$  wieder. Dies wird als Photochemisches Gleichgewicht bezeichnet. [9]

In Abbildung 2.11 ist ein typischer Tagesverlauf, wie er bei der Entstehung von Photo-smog auftritt, dargestellt. Das NO oxidiert bei Anwesenheit von  $O_3$  viel schneller zu  $NO_2$  (siehe Tabelle 2.5). Daraufhin wird bei Sonnenstrahlung das  $NO_2$  abgebaut und das so entstandene Sauerstoffatom bildet mit dem Luftsauerstoff das Ozon. Der Ozon-Gehalt steigt nun so lange bis der  $NO_2$ -Gehalt einen zu niedrigen Wert annimmt. Hohe Ozonwerte werden prinzipiell erzielt, wenn NO zu  $NO_2$  oxidiert ohne dabei  $O_3$  aufzubrauchen. Dies geschieht bei der Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen. [60]

**Tabelle 2.5:** Lebensdauer von NO in der Troposphäre [9]

Reaktion	Lebensdauer
$2 NO + O_2 \rightarrow 2 NO_2$	182 d
$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$	1 min

Bodennahes Ozon gilt als Leitsubstanz und wesentlicher Auslöser bei der Bildung von Photo-smog (auch als Sommersmog bezeichnet) [60] [9]. Das Ozon im Photo-smog ist



**Abbildung 2.11:** Typischer Tagesverlauf der Ozonkonzentration bei Photosmog [23]

toxisch und reizt beim Menschen die Schleimhäute von Nase, Atemwegen und Augen [2]. An zahlreichen Pflanzen kann es zu Schädigungen des Blattwerks, Wachstumsbeeinträchtigungen als auch Ertragsverlusten führen [9].

### 2.8.1.2 Saurer Regen

Neben der Bildung von Ozon tragen Stickoxide auch einen Beitrag zum »sauren Regen« bei. Stickoxide reagieren mit der Luftfeuchtigkeit zu salpetriger Säure und Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) (Reaktion 2.10) [36] [37]. Neben  $\text{SO}_2$  sind Stickoxide der zweite Hauptverursacher von »saurer Regen« [9].



Als »saurer Regen« wird jener Regen bezeichnet, dessen Wassertropfen einen pH-Wert von kleiner als 5,6 aufweisen. Dieser Niederschlag führt zu einer Übersäuerung von Boden und Gewässern, was zu Schäden an Pflanzen und Wäldern sowie zum Verschwinden von Fischen und anderen Lebewesen führen kann. Auch an Bauwerken setzt ein beschleunigter Alterungs- und Verwitterungsprozess durch den »saurer Regen« ein. [23]

### 2.8.1.3 Sekundäre Partikel

Als sekundäre Partikel werden in der Atmosphäre jene Aerosole bezeichnet, die sich aus Spurengasen wie  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  und  $\text{NH}_3$  bilden. Im Falle von Stickoxiden werden aus dem  $\text{NO}_2$  und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) Nitrate (Ammoniumnitrat  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) gebildet. Diese Salze gelten als eine der Hauptbestandteile von Feinstaub. [55]

## 2.9 Entstickungsmaßnahmen

Im Folgenden werden einige Maßnahmen zur Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Emissionen, wie sie in stationären Anlagen und in Fahrzeugen zum Einsatz kommen, beschrieben. Prinzipiell lassen sich die Maßnahmen in zwei Gruppen, die Primärmaßnahmen und die Sekundärmaßnahmen unterteilen.

### 2.9.1 Primärmaßnahmen

Primärmaßnahmen sollen während der Verbrennung eine Verhinderung oder Verminderung der  $\text{NO}_x$ -Bildung bewirken. Die Realisierung kann durch eine gestufte Verbrennung erfolgen. In der ersten Stufe herrschen brennstoffreiche Bedingungen ( $\lambda < 1$ ) vor. Dadurch wird eine minimale Bildung von  $\text{NO}_x + \text{HCN} + \text{NH}_3$  Schadstoffen erreicht. In der nächsten Stufe erfolgt nun die vollständige Verbrennung unter Sauerstoffüberschuss ( $\lambda > 1$ ). Aufgrund der intensiven Zumischung von Sekundärluft wird die Verbrennungstemperatur reduziert und die Bildung von  $\text{NO}$  unterdrückt. [66]

Eine weitere Primärmaßnahme, die vor allem bei Kolbenmaschinen zum Einsatz kommt, ist die Abgasrückführung (AGR). Dabei wird, wie der Name schon sagt, ein Teil der Verbrennungsprodukte (insbesondere  $\text{CO}_2$  und gasförmiges  $\text{H}_2\text{O}$ ) einem erneuten Verbrennungszyklus zugeführt. Durch die höhere Wärmekapazität der eingebrachten Verbrennungsprodukte sinkt die Verbrennungstemperatur. Weiters erfolgt durch die Verdünnung eine Reduzierung des Sauerstoffgehalts. Dadurch muss für die Umsetzung einer gewissen Brennstoffmenge eine größere Menge Gemisch aufgeheizt werden. Diese Effekte führen nun zu einer Verringerung der thermischen Stickoxidbildung. Anzumerken ist aber, dass es dabei bei Dieselmotoren aufgrund des reduzierten Sauerstoffgehalts zu signifikant erhöhten Partikelemissionen kommt. [19]

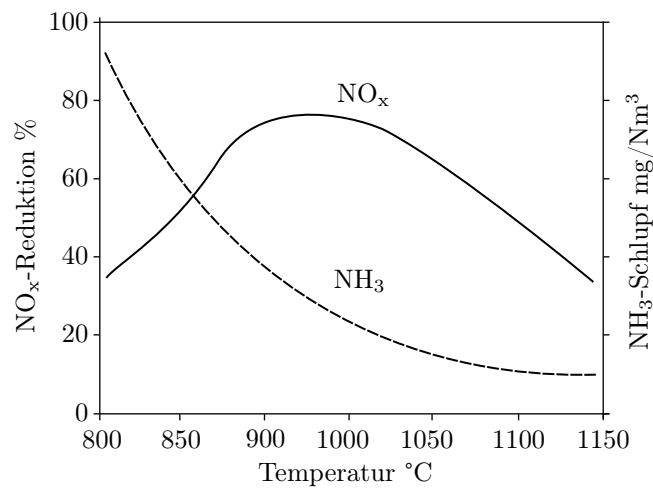
### 2.9.2 Sekundärmaßnahmen

Das Prinzip der Sekundärmaßnahmen besteht darin, das gebildete  $\text{NO}_x$  zu relativ ungefährlichen Produkten (wie z.B.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ , etc.) abzubauen. [66]

Unterschieden werden können Verfahren, die rein katalytisch arbeiten, oder mit Hilfe von eingedüsten Zusatzmitteln (z.B.  $\text{NH}_3$ ) katalytisch oder nichtkatalytisch die Stickoxide reduzieren.

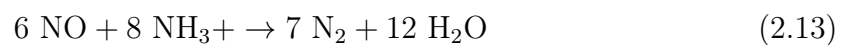
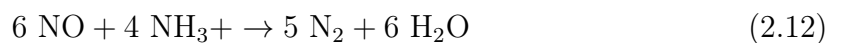
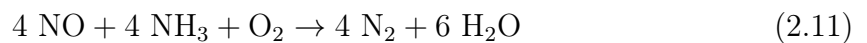
### 2.9.2.1 Selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR)

Bei der *selektiven nichtkatalytischen Reduktion* wird ein Reduktionsmittel in den Feuerraum eingedüst. Als Reduktionsmittel dienen Ammoniak (NH<sub>3</sub>) oder Harnstoff. Die Reaktionstemperatur muss in einem relativ schmalen Fenster um 1000°C liegen. Darunter kommt es aufgrund der geringen Umsätze zu einem vermehrten Verbrauch von Ammoniak (Ammoniakschlupf). Bei höheren Temperaturen wird wiederum zusätzliches NO gebildet (Abbildung 2.12). Durch die ungleichmäßige Stickoxidverteilung im Brennraum beträgt der Umsatz der Stickoxide lediglich nur ca. 70%. Somit ist auch selbst im Idealfall mit einer Emission an nicht verbrauchtem Ammoniak zu rechnen. [24]



**Abbildung 2.12:** Prinzipieller Verlauf der NO<sub>x</sub>-Abscheidung und des NH<sub>3</sub>-Schlupfs in Abhängigkeit der Temperatur (nach [1])

Die Reaktionen 2.11-2.13 zeigen die Hauptreaktionen der SNCR Entstickung [36].





### 2.9.2.2 Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Häufiger zur Anwendung gelangen jedoch katalytische Verfahren. Die Katalysatoren wirken beschleunigend auf die Reaktion, ohne dabei selbst verändert zu werden. Dadurch sind niedrigere Temperaturen (ca. 200-500°C) als bei der SCNR notwendig. Auch hier werden unter Zugabe von Ammoniak oder Harnstoff ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) die Stickoxide katalytisch zu Stickstoff und Wasser reduziert. Als Katalysatoren kommen Platten- oder Wabenkatalysatoren mit Titan-/Wolfram-/Vanadiumoxiden zum Einsatz. Der Umsatz an Stickoxiden liegt bei weit über 90% und ist somit deutlich höher als jener des SCNR Verfahrens. [24] [36]

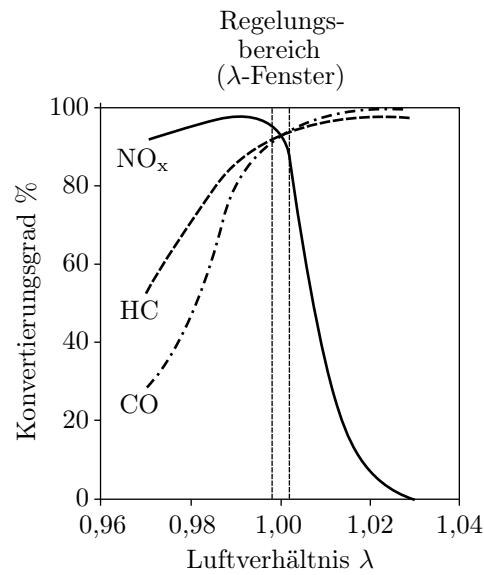
Aufgrund der hohen Toxizität des Ammoniaks wird bei dieselbetriebenen Fahrzeugen stattdessen Harnstoff eingesetzt. Die eigentliche Reaktion erfolgt aber trotzdem mit Ammoniak, da der Harnstoff unter den Reaktionsbedingungen durch Thermolyse und Hydrolyse mit Isocyanensäure (HNCO) als Zwischenprodukt in  $\text{NH}_3$  zerfällt (Reaktionen 2.14 und 2.15). [63]



Die *selektive katalytische Reduktion* gehört bei Nutzfahrzeugen zum Stand der Technik. In den letzten Jahren wurde sie durch die verschärften Abgasanforderungen (Euro VI, siehe Kapitel 2.7.1) auch vermehrt für dieselbetriebene PKW eingesetzt.

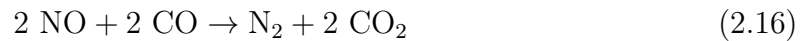
### 2.9.2.3 3-Wege-Katalysator

Der *3-Wege-Katalysator* wird seit vielen Jahren bei Fahrzeugen mit Otto-Motoren eingesetzt, wodurch eine starke Reduktion der Emissionen ermöglicht wurde. Durch die katalytische Wirkung von Edelmetallen werden simultan die Stickoxide reduziert (Reaktion 2.16) sowie Kohlenmonoxid (CO) und die Kohlenwasserstoffe (HC) oxidiert (Reaktion 2.17 und 2.18). Dadurch müssen praktisch gleichzeitig reduzierende und oxidierende Bedingung geschaffen werden. Dies wird dadurch gelöst, dass das Luftverhältnis  $\lambda$  in einen sehr engem Bereich um den Wert eins liegt (»Lambda-Fenster«). Zur Regelung des Luftverhältnisses wird eine Lambda-Sonde verwendet, die den Sauerstoffgehalt im Abgas misst und in weiterer Folge den zugemischten Kraftstoffanteil regelt. In Abbildung 2.13 ist der enge Regelungsbereich des Luftverhältnisses erkennbar. Der Konvertierungsgrad ist als Maßstab für die Wirksamkeit des Katalysators zu verstehen. Bei Abweichungen zum »Lambda-Fenster« kommt es zu erhöhten  $\text{NO}_x$ -Emissionen oder zu erhöhten HC und CO-Emissionen. [70]



**Abbildung 2.13:** Konvertierungsgrad über dem Luftverhältnis eines 3-Wege-Katalysators (nach [70])

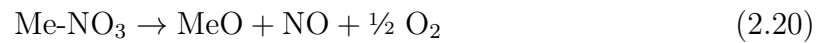
Aufgrund der Tatsache, dass Dieselmotoren mit einem erhöhten Luftverhältnis arbeiten und über das Luftgemisch geregelt werden (Qualitätsregelung), ist dieses Verfahren nur für Otto-Motoren geeignet. [36]



#### 2.9.2.4 NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator (NSC)

Eine weitere Entstickungsmaßnahme für Ottomotoren die im »mageren« Bereich ( $\lambda > 1$ ) arbeiten, und daher auch für Dieselmotoren geeignet ist, ist der *NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator*. Im normalen Fahrbetrieb (»magerer« Betrieb) wird zunächst das im Verbrennungsabgas enthaltene NO<sub>x</sub> im Speicherkatalysator eingelagert. Dabei reagiert das NO<sub>2</sub> mit den im Katalysator eingelagerten Metalloxiden (MeO) unter Bildung eines Speicher-material-Nitrats (Reaktion 2.19). Hat der NSC seine Kapazität erreicht und ist gesättigt, muss eine Regenerierung erfolgen. Dazu wird kurzzeitig ein unterstöchiometrischer

(»fetter«) Motorbetrieb gefahren. Das eingelagerte Nitrat zerfällt zu NO und MeO (Reaktion 2.20). Durch die Reduktionsmittel HC und CO, die durch die unterstöchiometrischen Bedingungen vorhanden sind, erfolgt nun eine Umwandlung des NO in N<sub>2</sub> (Reaktion 2.21). [7] [63]





# 3 Messtechnik

## 3.1 Messverfahren

In diesem Kapitel sollen einige Messprinzipien vorgestellt werden, die in erster Linie zur Messung von Stickoxiden geeignet sind. Die Verbreitetsten arbeiten nach dem Prinzip der Strahlungsabsorption (Photometrie) oder nach dem Chemilumineszenz-Verfahren. Bei geringerer Anforderung an die Genauigkeit der Messergebnisse, kommt auch die Amperometrie zum Einsatz. Tabelle 3.1 zeigt einen Auszug der wichtigsten Messverfahren.

**Tabelle 3.1:** Messverfahren zur Messung von Stickoxidkonzentrationen (angepasst nach [8])

Messverfahren		Emission	Immission	kontinuierlich	Komponenten
Strahlungsabsorption im infraroten Bereich (IR-Fotometer)	im	+	–	+	NO
Strahlungsabsorption im ultravioletten Bereich (UV-Fotometer)	im	+	+	+	NO, NO <sub>2</sub>
Strahlungsabsorption im sichtbaren Bereich	im	+	–	+	NO <sub>2</sub>
Chemilumineszenz		+	+	+	NO, NO+NO <sub>2</sub> (NO <sub>x</sub> )
Amperometrie		+	~	+	NO <sub>2</sub>

+ geeignet, – nicht geeignet, ~ bedingt geeignet

### 3.1.1 Chemilumineszenz

Das *Chemilumineszenz-Verfahren* ist nach ÖNORM EN 14211 das Standardverfahren zu Messung von NO- sowie von NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Ebenfalls gilt es nach der Messkonzeptverordnung zum IG-L als Referenzmethode zur Bestimmung von Stickoxiden. Es ist gleichermaßen für Emissions- und Immissionsmessungen geeignet.

Zur Messung wird ein Hilfsgas (Ozon) benötigt. Wie bereits in Kapitel 2.8.1.1 gesehen, reagiert NO mit O<sub>3</sub> sehr rasch zu NO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> (Reaktion 3.1). Ein konstanter Anteil

des NO (ca. 10% bei  $T=323\text{K}$ ) reagiert zu einem angeregte  $\text{NO}_2^*$ -Molekül (Reaktion 3.2). Beim Übergang des  $\text{NO}_2^*$ -Moleküls in den elektronischen Grundzustand (Reaktion 3.3) wird eine Strahlungsenergie  $h\nu$  emittiert, deren Intensität nach Lambert-Beer ein Maß für die Stoffkonzentration ist. Zusätzlich kann es dazu kommen, dass ein Teil der angeregten  $\text{NO}_2^*$ -Moleküle ihre Energie an den Stoßpartner M abgeben, und so in den Grundzustand gelangen (Reaktion 3.4). Diese strahlungslose Energieabgabe wird auch als Quenching bezeichnet und wird umso geringer, je geringer der Druck und damit die Gasdichte in der Reaktionskammer ist. Aus diesem Grund werden Chemilumineszenz-Verfahren mit einem niedrigen Absolutdruck von 20-60 mbar betrieben. [24] [8]



Das Licht der abgestrahlten Lichtenergie  $h\nu$  liegt im Wellenlängenbereich von 600 - 3200 nm, mit einem Intensitätsmaximum bei 1200 nm. Nach dem Durchgang durch einen Interferenzfilter wird die entstandene Strahlung von einem Photomultiplier in ein elektrisches Signal umgewandelt. Im Interferenzfilter werden Wellenlängen  $<600$  nm herausgefiltert. Diese entstehen im Wesentlichen aus Reaktionen von ungesättigten Kohlenwasserstoffen mit Ozon. [24] [8]

Abbildung 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Chemilumineszenz-Analysators. Die zu bestimmende Gasprobe wird mit Hilfe einer Vakuumpumpe über einen Partikelfilter angesaugt. Da in der Reaktionskammer nur ein geringer Druck erwünscht ist, wird der Großteil des zu messenden Gases über einen Bypass geführt. Nur ein kleiner Volumenstrom gelangt über eine Kapillare oder eine kritische Düse in die Reaktionskammer. Würde nur das tatsächlich in der Reaktionskammer benötigte Messgas angesaugt werden, wäre der Volumenstrom so klein, dass die Anzeigenverzögerung zu groß wäre. Das für die Reaktion benötigte Ozon wird aus der Umgebungsluft gewonnen. Die Luft wird mittels eines zweiten Teilstromes angesaugt, getrocknet und in den Ozonisator geleitet. Im Ozonisator wird durch elektrische Gasentladungen Ozon erzeugt. In der Reaktionskammer erfolgt nun die Reaktion von NO und  $\text{O}_3$ , welche vom Photomultiplier detektiert wird. [8]

Um den  $\text{NO}_2$ -Gehalt bestimmen zu können, muss vor der Chemilumineszenz-Reaktion das  $\text{NO}_2$  zu NO reduziert werden. Dies erfolgt in einem  $\text{NO}_2$ -Konverter bei ca.

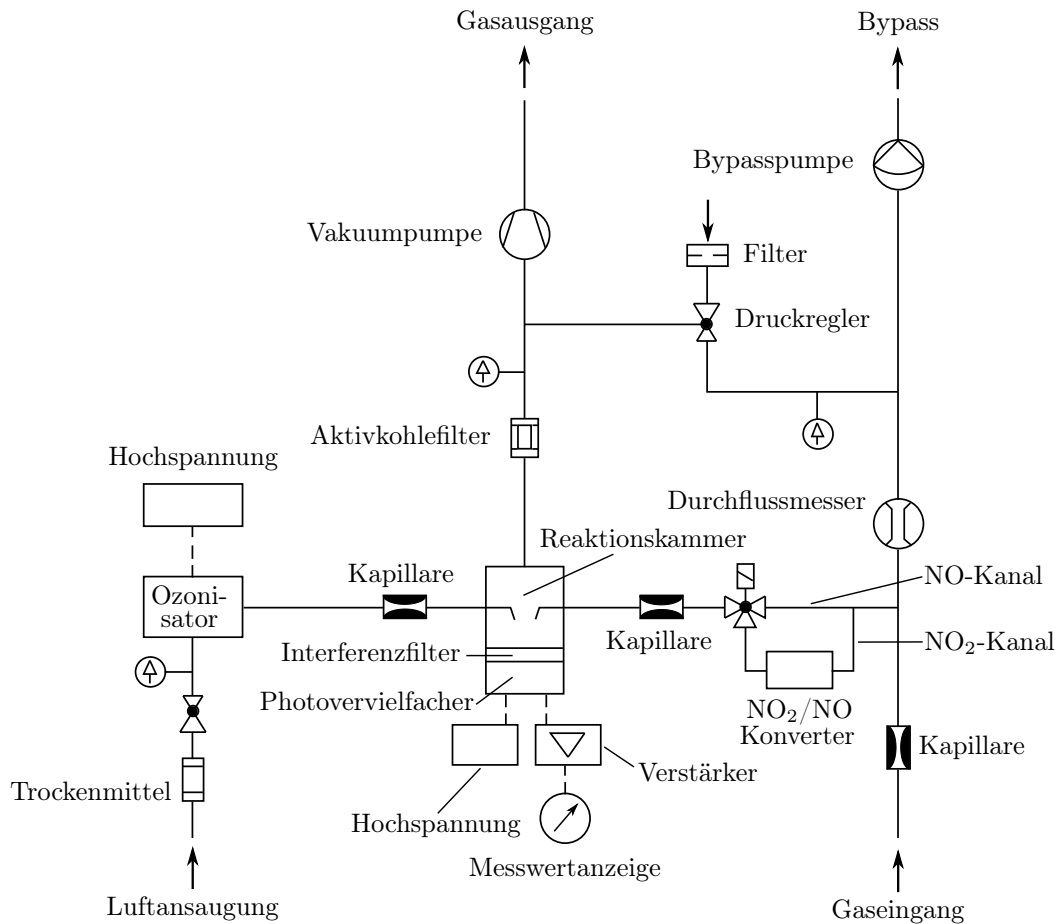


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau eines Chemilumineszenz-Messgerätes [8]

300 - 370 °C mit Molybdän als Reduktionsmittel. Nun kann über ein Magnetventil abwechselnd das Gas über den NO-Kanal (NO-Konzentration) oder den NO<sub>2</sub>-Kanal (NO+NO<sub>2</sub>-Konzentration) in die Reaktionskammer geleitet werden. Die Differenz aus den beiden Messungen ergibt den NO<sub>2</sub>-Gehalt. Alternativ werden Geräte mit 2 parallelen Reaktionskammern angeboten, die eine gleichzeitige Messung von NO und NO+NO<sub>2</sub> ermöglichen. [24]

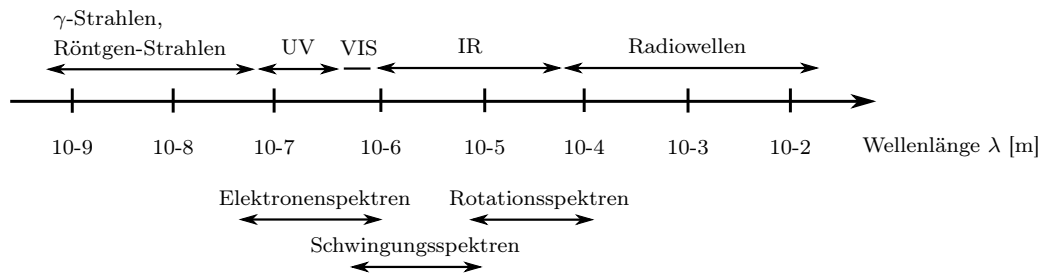
### 3.1.2 Absorptionsspektroskopie

Die *Absorptionsspektroskopie* ist ein relativ einfaches und weit verbreitetes Verfahren zur Bestimmung von gasförmigen Luftverunreinigungen. Das Prinzip beruht darauf, dass jede Substanz ein von ihrer Molekularstruktur (Verteilung der Elektronen) abhängiges und somit einzigartiges Absorptionsspektrum besitzt. [24]

Unterschieden wird bei der Absorptionsspektroskopie zwischen Absorption im infraroten (IR), im sichtbaren (visible, VIS) und im ultravioletten (UV) Bereich. Tabelle 3.2 zeigt die Wellenlängenbereiche der einzelnen Spektralbereiche, die in der Absorptionsspektroskopie zum Einsatz kommen. [8]

**Tabelle 3.2:** Wellenlängen im IR, VIS und UV-Bereich [8]

Spektralbereich	Wellenlänge [nm]
infrarote Strahlung IR	1000 - 10.000
sichtbare Strahlung VIS	400 - 800
ultraviolette Strahlung UV	ca. 200 - 400



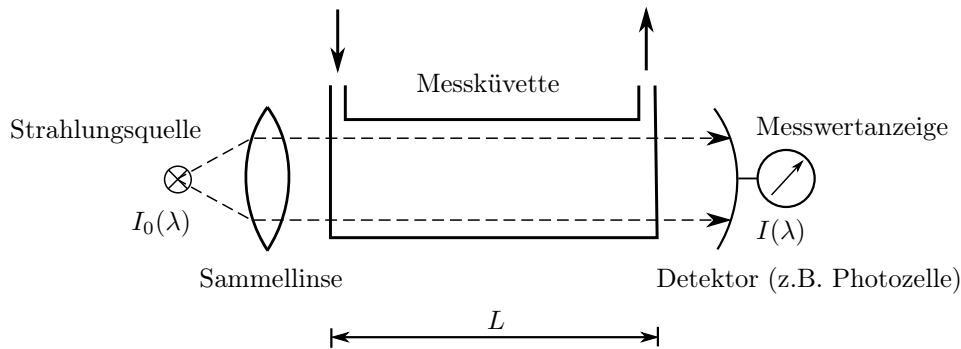
**Abbildung 3.2:** Elektromagnetisches Spektrum mit ihren Anregungsformen [49]

Messgeräte, die sich den Prinzipien der Absorptionsspektroskopie bedienen, werden oft als Photometer bezeichnet. Abbildung 3.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Photometers. Die Strahlung, die von einer Lichtquelle ausgeht, wird an einer Linse gebündelt und über den Probenraum (Küvette) auf einen Detektor (z.B. Photozelle) geleitet. Im Probenraum nehmen die Gase in bestimmten Wellenlängenbereichen (Absorptionsbanden) Energie auf. Die Anregung der Moleküle kann durch Rotation, Schwingung oder Konfiguration der Außenelektronen erfolgen (Abbildung 3.2). Der Detektor wandelt die empfangene Strahlung in ein Signal um. Bei konstanten Umgebungsbedingungen ist die Abnahme der Strahlung ein Maß für die Konzentration im Probenraum. Dieser Zusammenhang wird durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben. [8]

Wird keine Messküvette verwendet, sondern erfolgt die Messung in der freien Atmosphäre, so spricht man von einer open-path Messung. Beide Varianten haben aber gemeinsam, dass die Konzentration als gemittelte Größe über die Länge  $L$  bestimmt wird (Remote Sensing).

Das Lambert-Beer'sche Gesetz lautet: [24]





**Abbildung 3.3:** Prinzip der Absorptionsspektroskopie [36]

$$I = I_0 \cdot \exp(-\varepsilon \cdot \rho \cdot l) \quad (3.5)$$

Unter der Bedingung von konstantem Druck ( $p = \text{const.}$ ) und konstanter Temperatur

$$I = I_0 \cdot \exp(-\varepsilon \cdot k \cdot l) \quad (3.6)$$

und der Einführung der Extinktion  $E$  (oft auch als optische Dichte  $D$  benannt),

$$E = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.7)$$

erhält man eine lineare Funktion für die Konzentrationsbestimmung (Gleichung 3.8).

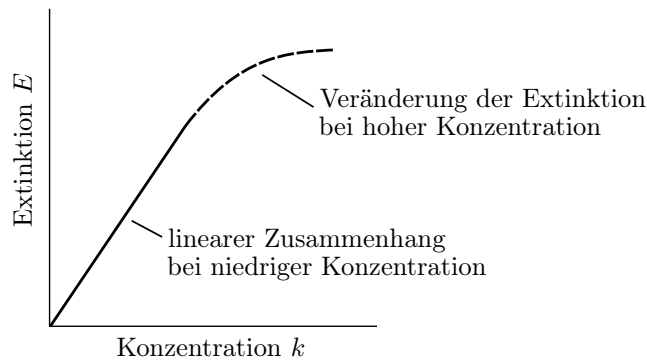
$$E = \varepsilon \cdot k \cdot l \quad (3.8)$$

Eine weitere häufig verwendete Schreibweise unter Verwendung des Absorptionsquerschnitts ist in Gleichung 3.9 dargestellt.

$$E = \sigma \cdot N \cdot l \quad (3.9)$$

- $I_0$  Intensität vor Eintritt in die Probe [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $I$  (verminderte) Intensität nach Austritt aus der Probe [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $\varepsilon_\lambda$  (molarer) Extinktionskoeffizient (stoffspezifisch) [ $1/(\text{mol cm})$ ]
- $k$  Konzentration des Messgases [ $\text{mol}/\text{l}$ ]
- $\rho$  Dichte des Gases [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $l$  Schichtdicke [ $\text{cm}$ ]
- $\sigma$  Absorptionsquerschnitt [ $\text{cm}^2$ ]
- $N$  Teilchendichte [ $1/\text{cm}^3$ ]

Das gezeigte Lambert-Beer'sche Gesetz ist aber nur für sehr verdünnte Lösungen gültig. Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen den Teilchen ist der Zusammenhang zwischen der Extinktion  $E$  und der Konzentration  $k$  bei hohen Konzentrationen nicht mehr linear (Abbildung 3.4). Bei Konzentration von  $k < 0,01$  mol/l ist dieser Effekt aber vernachlässigbar gering. [24]



**Abbildung 3.4:** Zusammenhang zwischen Extinktion  $E$  und Konzentration  $k$  [24]

Weiters ist zu berücksichtigen, dass selbst bei Abwesenheit der zu untersuchenden Messkomponente sich die austretende Intensität  $I$  von der einstrahlenden Intensität  $I_0$  unterscheidet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch das optische Fenster und das Gas im Probenraum eine Strahlungsabsorption auftritt. Berücksichtigung findet diese Blindabsorption im Allgemeinen durch einen Blindwert der Extinktion  $E_0$ , der experimentell zu bestimmen ist. [8]

Die meisten Verfahren arbeiten je nach Anforderung im IR- oder UV-Bereich. Im Gegensatz zu  $\text{NO}$  lässt sich  $\text{NO}_2$  auch im VIS-Bereich detektieren. Anzumerken ist aber, dass die Ermittlung im VIS-Bereich sehr unempfindlich und somit das Detektionslimit für viele Immissionsmessung ungeeignet ist.

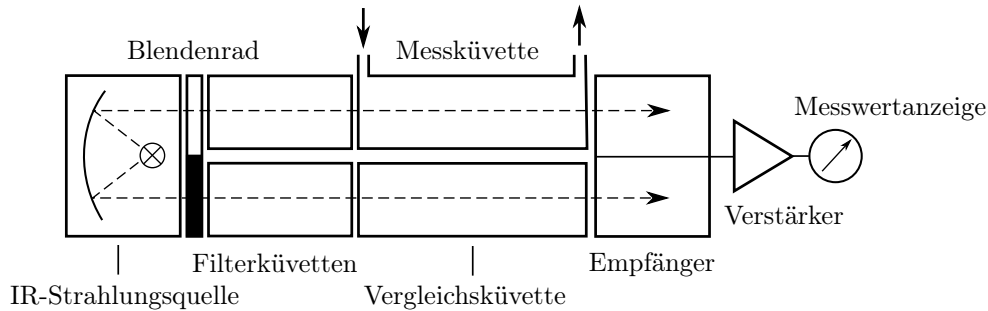
Im Folgenden sollen nun einige wichtige Verfahren der Photometrie genauer behandelt werden.

### 3.1.2.1 NDIR (Nondispersive Infrared Spectroscopy)

Die meisten IR-Photometer arbeiten nach dem nichtdispersiven Verfahren. Im Gegensatz zum dispersiven Verfahren findet keine spektrale Zerlegung der von der Strahlungsquelle ausgehenden IR-Strahlung statt, sondern es wird der komplette IR-Bereich ausgesendet. [8]

In Abbildung 3.5 ist der schematische Aufbau eines NDIR Analysators dargestellt. Ausgehend von einer Strahlungsquelle gelangt die Strahlung durch ein Blendenrad (Chop-

per) abwechselnd in eine Messküvette und eine mit Inertgas (IR-durchlässig) gefüllte Vergleichsküvette. Zur Minimierung der Einflüsse von Störgasen werden zusätzlich Filterküvetten verwendet. Nach den Küvetten ist der aus zwei Kammern bestehende Empfänger positioniert, der mit dem zu messenden Gas gefüllt ist. [8]



**Abbildung 3.5:** Schematischer Aufbau eines NDIR-Photometers [8]

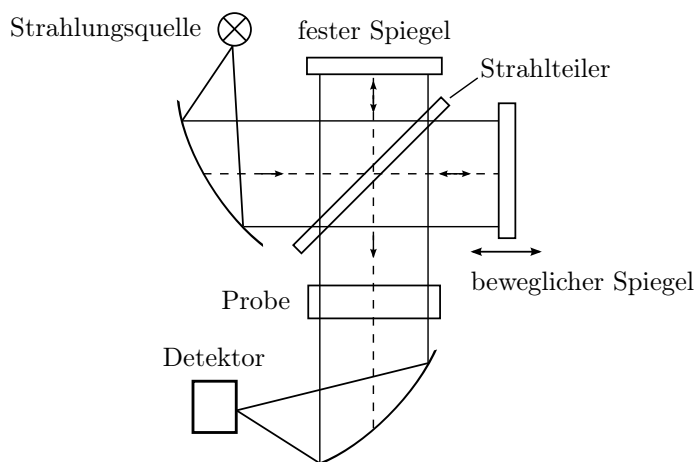
Die Strahlung trifft danach nicht auf einen Photodetektor, sondern der Messeffekt entsteht durch Erwärmung des im Empfänger befindlichen Gases durch die modulierende IR-Strahlung. Die Amplitude der Druckschwankung hängt von der Vorabsorption in der Mess- bzw. Vergleichsküvette ab. Bei Anwesenheit des gesuchten Messgases wird das Gas in der Empfängerkammer in der Messküvette weniger erwärmt als jenes hinter der Vergleichsküvette. Der Betrag der Amplitudenänderung wird in ein elektrisches Signal umgewandelt und gilt als Maß für die Konzentration des Messgases. [8]

### 3.1.2.2 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

Die *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) arbeitet wie die NDIR im infraroten Bereich. Das zu messende Gas wird mit IR-Strahlung breitbandig bestrahlt, wobei Strahlungen bei bestimmten Frequenzen absorbiert werden. Jedes Molekül besitzt, wie bereits angesprochen, durch seine einzigartige Kombination von Atomen, ein individuelles Spektrum. Die nicht absorbierte Strahlung gelangt danach in ein Interferometer. Abbildung 3.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Michelson-Interferometers. [27]

Durch den beweglichen Spiegel entstehen in Vergleich zum festen Spiegel Wegdifferenzen. Beim Zusammenführen der Strahlen vom beweglichen und festen Spiegel kommt es zu Interferenzen. Dabei ergibt sich am Detektor ein charakteristisches Bild, das als Interferogramm bezeichnet wird (Abbildung 3.7 links). [27]

Die soeben angesprochenen Interferenzen gelten für jede Wellenlänge der Strahlung. In Abbildung 3.8 wurden beispielhaft die Intensitäten von drei Cosinuswellen mit unterschiedlichen Wellenlängen überlagert. Auf der Abszisse ist die Bewegung des Spiegels



**Abbildung 3.6:** Schematischer Aufbau eines FTIR-Spektrometers mit einem Michelson-Interferometer [27]

des Michelson-Interferometers aufgetragen (Retardierung). Zu sehen ist die Verstärkung der Intensität in der Mitte sowie die Abschwächung und Auslöschung an den Rändern. Somit kann ein Interferogramm als Summe aller Cosinuswellen der Strahlung aufgefasst werden. [3]

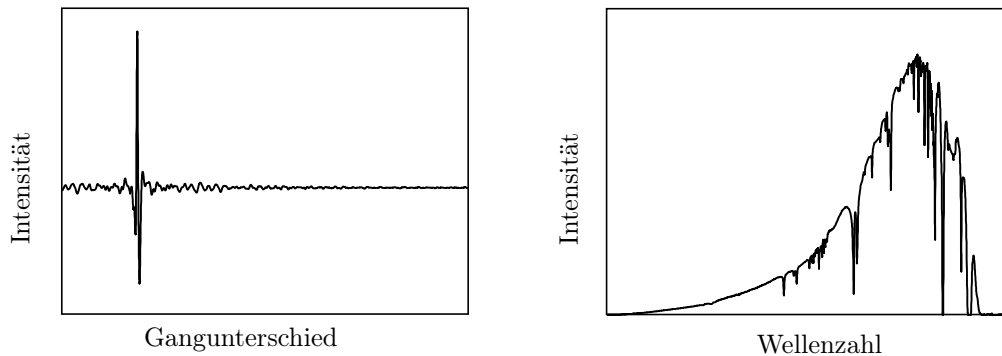
Nach Ermittlung des Interferogramms wird es durch eine Fourier-Transformation in ein (Einstrahl-) Spektrum umgewandelt (Abbildung 3.7). Zum Abschluss müssen zur Ermittlung der Extinktionsspektren noch die störenden Hintergrundspektren berücksichtigt werden. Dies erfolgt in der Regel mathematisch. Das so ermittelte Spektrum gibt nun Aufschluss über das Vorhandensein von einzelnen Spezies sowie über deren Konzentration. [27]

Es soll noch einmal angemerkt sein, dass durch den Einsatz der FTIR eine gleichzeitige Messung von verschiedenen Spurenstoffen ermöglicht wird.

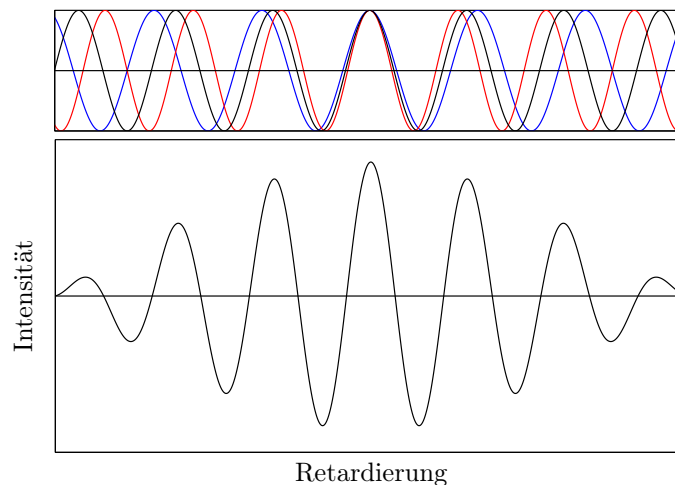
### 3.1.2.3 LIDAR (Light Detection and Ranging) und DIAL (Differential Absorption LIDAR)

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) Systeme senden kurze gebündelte Lichtpulse (gepulster Laser) aus. In der Atmosphäre wird das Licht an Molekülen und Partikeln gestreut. Durch die rückgestreute Intensität kann auf die Verteilung von streuenden und absorbierenden Stoffen geschlossen werden.

Um nun die Verteilung von Spurengasen zu ermöglichen, werden zwei (oder mehrere)



**Abbildung 3.7:** Beispielhaftes Interferogramm (links) und das mittels Fourier-Transformation berechnete Einstrahlspektrum (rechts) [73]



**Abbildung 3.8:** Prinzip der polychromatischen Interferenz am Beispiel von drei verschiedenen Wellenlängen (eigene Darstellung nach [3])

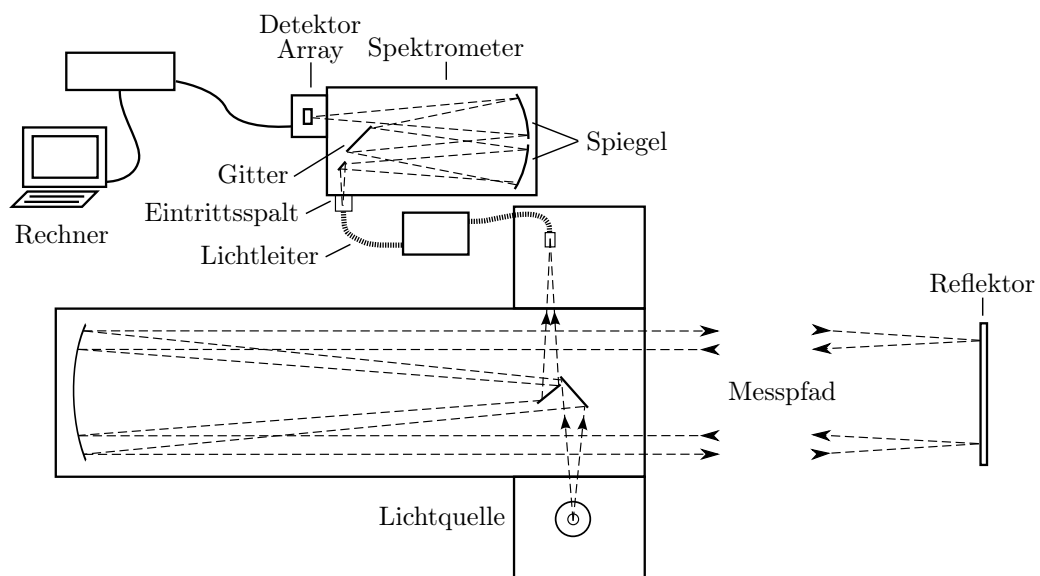
verschiedene Wellenlängen verwendet (DIAL). Eine Wellenlänge wird so gewählt, dass sie vom Spurenstoff stark absorbiert wird. Die andere soll hingegen schwach absorbiert werden. Aus dem zeitlichen Verlauf der Differenzen lässt sich auf die Konzentration entlang der Laserlinie schließen. [49] [12]

In dieser Arbeit soll nicht näher auf das LIDAR System eingegangen werden. Detailliertere Informationen finden sich unter anderem in [47] und [17].

### 3.1.2.4 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy)

Die *Differential Optical Absorption Spectroscopy* (DOAS) wurde von Platt 1979 [48] entwickelt, um Spurenstoffe in kleinen Konzentrationen innerhalb der Atmosphäre zu detektieren.

Das Grundprinzip beruht wiederum auf dem Lambert-Beer'schen Gesetz. Sichtbares Licht (VIS) und/oder UV-Strahlung werden ausgesendet, nach einer gewissen Länge empfangen und über einen Lichtleiter zum Spektrometer geleitet (Abbildung 3.9). Im Spektrometer erfolgt die spektrale Zerlegung des ankommenden Lichts in verschiedene Wellenlängenbereiche. [8]

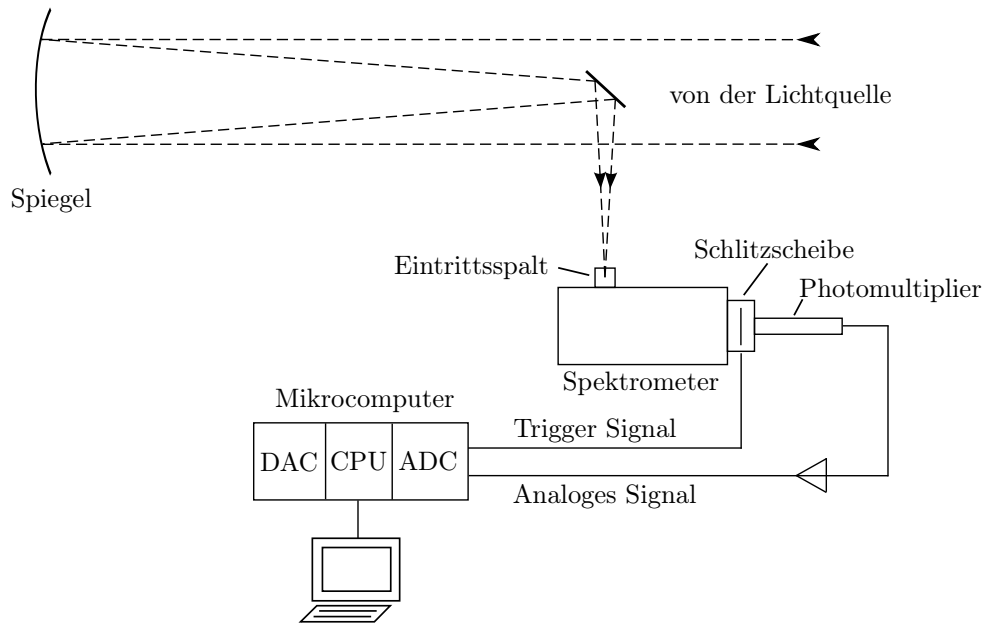


**Abbildung 3.9:** Aufbau eines aktiven DOAS-Messgeräts mit einem PDA (Standard DOAS-Messgerät in der Forschung) [49]

Ein weit verbreitetes Spektrometer ist das so genannte Czerny-Turner Spektrometer. Das Licht tritt über einen Eintrittsspalt in das Spektrometer ein. Die spektrale Zerlegung geschieht mit Hilfe eines dispersiven Elements (optisches Gitter), an dem das Licht gebeugt wird. Eine genauere Erläuterung des Prinzips sowie weitere Arten von Spektrometern sind unter anderem in [25] zu finden.

Das zerlegte Licht wird danach von einem Detektor erfasst. Hier ist zwischen 2 Prinzipien zu unterscheiden. Im so genannten OSD (Optomechanical Scanning Devices) trifft das Licht durch einen beweglichen Austrittsschlitz (z.B. eine rotierende Scheibe mit mehreren Schlitzen) auf einen Photomultiplier (Abbildung 3.10). Dadurch wird pro Schlitz nur ein Teil des Spektrums vom Photomultiplier erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Diese sequentielle Erfassung kann für einige Anwendungen von

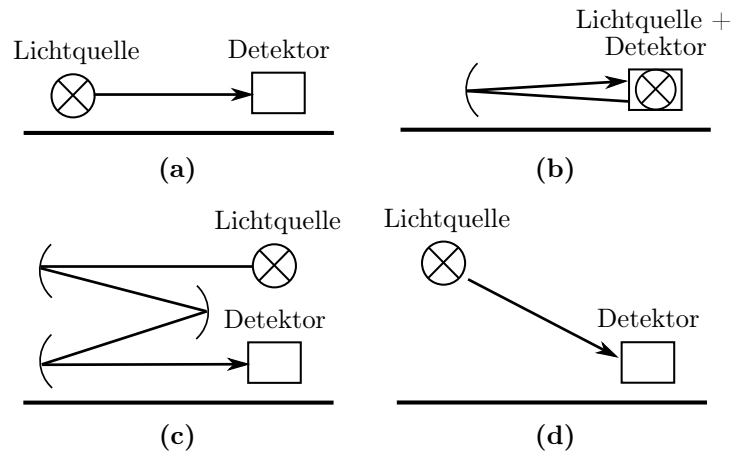
Nachteil sein. Aus diesem Grund kommen heutzutage verstärkt Detektor-Arrays zum Einsatz. Diese bestehen aus einer großen Anzahl von einzelnen Photodetektoren die eine simultane Erfassung aller Wellenlängen ermöglichen. Die gängigsten Photodetektoren sind das PDA (photo diode array), das CCD (charge coupled device) und der CMOS (complementary metal oxide semiconductor). [49]



**Abbildung 3.10:** Aufbau eines »klassischen« DOAS-Messgeräts mit einem OSD (Schlitzscheibe und Photomultiplier) [49]

Zum Abschluss erfolgt mittels eines Rechners und der geeigneten Software der Vergleich der ermittelten Spektren mit dem für jedes Molekül spezifischen Absorptionsmuster (»Fingerabdruck«), um Rückschlüsse auf dessen Vorkommen zu erhalten. [12]

DOAS Systeme lassen sich prinzipiell, wie auch beispielsweise die FTIR Systeme, in aktive und passive Systeme einteilen. Aktive Systeme benötigen eine künstliche Lichtquelle, wohingegen passive Systeme extraterrestrische Lichtquellen (Sonne, Mond) nutzen. Bei aktiven Systemen kommen oft Reflexionsspiegel zum Einsatz. Dadurch kann die Lichtquelle und der Empfänger in einem Bauteil positioniert werden und bei gleichem Abstand wird die Messlänge verdoppelt. Anzumerken ist, dass die Messlänge mindestens so lange gewählt werden muss, um eine Absorption detektieren zu können. Eine weitere weit verbreitete Variante zur Detektierung von Spurengasen in sehr kleinen Luftvolumen ist das Folded-Path DOAS. Dabei wird die Messlänge durch mehrfache Reflexion (bis zu 144mal) deutlich erhöht. Abbildung 3.11 zeigt das Prinzip einiger DOAS Systeme. [49]



**Abbildung 3.11:** (a) aktives Long-Path DOAS (LP-DOAS) (b) aktives LP-DOAS mit Reflektor (c) aktives Folded-Path DOAS (d) passives DOAS (direct Sunlight DOAS) (angepasst nach [49])

Bei Messungen in der Atmosphäre kommt es zu Streuungen an Aerosolteilchen (Mie Streuung,  $d \sim \lambda$ ) und an Luftmolekülen (Rayleigh Streuung,  $d \ll \lambda$ ). Durch diese Streuungen wird die Strahlung, wie auch bei der Absorption, geschwächt. Ohne Berücksichtigung der Streuungen würde es somit zu einer Verfälschung des Messergebnisses kommen. Obwohl die Streuung keinen Absorptionsprozess darstellt, erfolgt die Berücksichtigung der Einfachheit halber mittels Extinktionskoeffizienten.

Ein großer Unterschied der DOAS zu anderen Methoden besteht in der Auswertung der detektierten Strahlung. Der Absorptionsquerschnitt  $\sigma(\lambda, T, p)$  wird in zwei Teile, einen schmalbandigen und einen breitbandigen, aufgespalten. Der schmalbandige Anteil (oder auch differentieller Anteil)  $\sigma'(\lambda, T, p)$  ändert sich stark mit der Wellenlänge, der breitbandige Anteil  $\sigma^B(\lambda, T, p)$  hingegen nur sehr schwach. Streuprozesse wie die Mie- und Rayleighstreuung sind breitbandig und ändern sich demnach nur langsam mit der Wellenlänge. Um in der Praxis die Breitbandstruktur herauszufiltern werden Hochpassfilter eingesetzt. Eine detaillierter Beschreibung sowie die mathematischen Zusammenhänge sind unter anderem in [49] und [47] zu finden.

### 3.1.3 Elektrochemisches Verfahren (Amperometrie)

Elektrochemische Sensoren arbeiten nach dem Prinzip, dass das zu messende Gas an der Elektrode oxidiert oder reduziert wird. Dadurch entsteht eine Ladung, welche als elektrischer Strom gemessen werden kann. Der elektrische Strom gibt nun Aufschluss über die Konzentration des gemessenen Gases. [33]



Elektrochemische Sensoren sind in ihrem Aufbau sehr einfach und deshalb kostengünstig in der Anschaffung [57]. Nachteilig ist die hohe Querempfindlichkeit gegenüber Ozon. Um den Messfehler gering zu halten, sollte eine parallele Messung des Ozons erfolgen und ein Korrekturalgorithmus verwendet werden [33]. Weitere Empfindlichkeiten treten gegenüber Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf [13].

### 3.2 Messsysteme für den Einsatz von NO<sub>x</sub>-Messungen in Straßentunneln

In Tabelle 3.3 sind einige der derzeitig erhältlichen Messsysteme für die NO<sub>x</sub>-Messung in Straßentunneln aufgelistet. Wie zu sehen, kommen vorrangig Absorptionstechniken (UV, VIS und IR) zum Einsatz. Aber auch elektrochemische Verfahren gelangen aufgrund ihres einfachen Aufbaus und des damit verbundenen günstigen Preises zur Anwendung. Wie bereits angemerkt, ist die Genauigkeit solcher elektrochemischen Verfahren schlechter als beispielsweise jener der Absorptionsverfahren. Als reines Messgerät zur Grenzwertdetektierung dürfte die Genauigkeit aber ausreichend sein.

Chemilumineszenz-Verfahren kommen hingegen nicht zum Einsatz. Dies dürfte vor allem dem hohen Anschaffungspreis sowie dem hohen Wartungsaufwand geschuldet sein.

**Tabelle 3.3:** Gewerbliche Messsysteme für die NO<sub>x</sub>-Messung in Straßentunneln (Quelle: Herstellerangaben)

Hersteller	Type	messbarer Schadstoff	Messprinzip	Standard-messbereich [ppm]	Auflösung [ppm]	Nachweisgrenze [ppm]	Genauigkeit	Reaktionszeit
Tunnel Sensors	ENOX	NO <sub>2</sub>	Elektrochemisch	0-10	n/a	n/a	± 0,1 ppm	40 s (oder 20 s)
Codel	TunnelTech 205 NO <sub>2</sub> monitor	NO <sub>2</sub>	UV Absorption	0-1 (0-5)	n/a	± 0,01	± 0,04 ppm	<200 s
Codel	TunnelTech 203 CO, NO monitor	NO, CO	IR Absorption	0-30 (NO)	± 1 (NO)	n/a	± 2 ppm (NO)	2 min
Codel	TunnelTech 502 – Electrochemical NO Monitor	NO	Elektrochemisch	1-500	n/a	n/a	± 2%	n/a
Ecotech/Tunnel Sensors	NOVICOM	NO, CO, VIS	IR Absorption	0-300 (NO)	n/a	n/a	± 2 ppm (NO)	n/a
JES Elektrotechnik	t/ECS Gassensor	NO, NO <sub>2</sub> , CO	Elektrochemisch	0-20 (NO <sub>2</sub> ) 0-50 (NO)	0,1 (NO <sub>2</sub> ) 0,5 (NO)	n/a	n/a	n/a
SICK	VICOTEC321	NO, VIS	DOAS	0-20 (NO)	n/a	n/a	± 5%	5-360 s
SICK	VICOTEC322	NO <sub>2</sub> , VIS	DOAS	0-1 (NO <sub>2</sub> )	n/a	n/a	± 5%	5-360 s

### 3.3 Messabweichungen

Messabweichungen, oft auch Messfehler bezeichnet, sind der Unterschied zwischen dem erhaltenen (gemessenen) Wert  $x$  und dem wahren Wert  $x_w$ . Da der wahre Wert grundsätzlich nie festgestellt werden kann, wird vom konventionell richtigen Wert  $x_r$  gesprochen. Hinsichtlich der Art der Entstehung lassen sich die Messabweichungen wie folgt einteilen: [46]

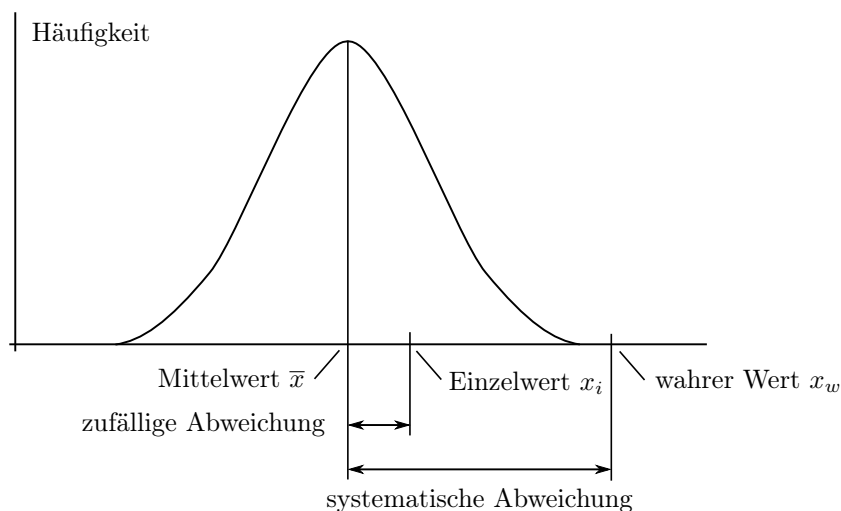
#### Systematische Abweichung

Da der Fehler bekannt ist, können sie prinzipiell kompensiert werden. Die Messabweichung weist bei gleichen Bedingungen immer denselben Wert auf.

#### Zufällige (stochastische) Abweichung

Die Ursachen für zufällige Abweichungen sind teilweise unbekannt und unterliegen dem Zufall (z.B. Störungen). Bei mehreren Messungen unter denselben Bedingungen weisen die Fehler unterschiedliche Werte auf. Aus diesem Grund sind sie nicht korrigierbar.

In Abbildung 3.12 ist der Zusammenhang zwischen systematischer und zufälliger Abweichung dargestellt.



**Abbildung 3.12:** Zusammenhang zwischen systematischer und zufälliger Abweichung [28]

Wie bereits angemerkt, lässt sich der wahre Wert niemals bestimmen. Es lässt sich nur bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Messwert in einem bestimmten Wert-

tebereich liegt. Bei ausreichenden Messungen unter gleichen Bedingungen, bildet sich eine Verteilung um den Erwartungswert  $\mu$  (Gleichung 3.10), von dem man ausgeht, dass er den konventionell richtigen Wert mit großer Wahrscheinlichkeit repräsentiert. Lässt man nun die Anzahl der Messungen gegen Unendlich gehen, entspricht der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$  (Gleichung 3.11) dem Erwartungswert. [46]

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{x_{in}}{n} \quad (3.10)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.11)$$

Um nun ein Beurteilungskriterium für eine Messreihe zu haben, wurde die empirische Standardabweichung  $s$  eingeführt (Gleichung 3.12). Sie erfasst die Differenzen zwischen den Einzelmessungen und dem arithmetischen Mittel. Bei hohen Standardabweichungen muss von einer großen Streuung ausgegangen werden. Je höher die Standardabweichung, desto schlechter bildet das arithmetische Mittel den konventionell richtigen Wert ab. Das Quadrat der Standardabweichung wird als Varianz  $s^2$  bezeichnet. [46]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.12)$$

### Messunsicherheiten nach GUM

GUM steht für »Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement« und ist ein ISO/BIPM-Leitfaden. Damit soll eine Vereinheitlichung zur Bestimmung von Messunsicherheiten geschaffen werden. Im GUM wird nicht wie bisher gezeigt auf die Messabweichungen, sondern auf die Messunsicherheiten bezogen. Die Messunsicherheit ist ein Parameter, der die Streuung der Messgröße kennzeichnet. Eine Aufteilung erfolgt nicht mehr nach systematischer und zufälliger Abweichung, sondern nach der Ermittlungsmethode der Unsicherheitskomponenten in Typ A und Typ B. Die systematische Abweichung muss bekannt sein und herausgerechnet werden. [28]

Typ A: Auswertung durch statistische Verfahren.

Typ B: Auswertung mit anderen Mitteln als statistische Verfahren.

#### Typ A:

Die Auswertung erfolgt nach den bisher beschriebenen statistischen Mitteln. Als bester Schätzwert für die Messgröße  $X$  wird der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$  herangezogen und

die Streuung wird durch die empirische Standardabweichung  $s$  abgebildet. Daraus lässt sich nun die Unsicherheit  $u(x)$  ermitteln (Gleichung 3.13).

$$u(x) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.13)$$

### Typ B:

Besonders bei komplexen Messaufgaben können sich die Einflussfaktoren (z.B. Umgebungsbedingungen) ändern. In diesem Fall muss die Unsicherheit nicht zwingend aus der mathematischen Analyse einer Messreihe erfolgen, sondern kann durch andere Informationen (z.B. Herstellerangaben über das Messgerät, beispielhafte Daten früherer Messungen etc.) ermittelt werden. [44]

Bei Umwandlung von z.B. Höchst- und Mindestwertangaben von Herstellern in eine Standardunsicherheit, kann eine Rechteckverteilung mit den Grenzen  $x_{\max}$  und  $x_{\min}$  angenommen werden. Alle Werte in diesem Intervall besitzen die gleiche Wahrscheinlichkeit. Referenzwert  $x$  und die Unsicherheit  $u(x)$  können nach Gleichung 3.14 und 3.15 berechnet werden. [28]

$$x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad (3.14)$$

$$u(x) = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\sqrt{12}} \quad (3.15)$$

Falls aber anzunehmen ist, dass Werte in der Mitte des Intervalls wahrscheinlicher auftreten als an den Rändern, dann kann eine symmetrische Dreiecksverteilung gewählt werden. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 3.16. [28]

$$u(x) = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\sqrt{24}} \quad (3.16)$$

Alternativ kann die Standardunsicherheit  $u(x)$  als erweiterte Standardunsicherheit  $U(x)$ , die zu einer höheren Sicherheit führt, angegeben werden. Die Berechnung erfolgt mittels des Erweiterungsfaktors  $k$  (Gleichung 3.17), der zumeist mit  $k = 2$  gewählt wird. Liegen hinreichende Kenntnisse über die Verteilung der Ergebnisgröße vor, so kann  $k$  zu einem bestimmten Vertrauensniveau (empfohlen 95%) festgelegt werden (Tabelle 3.4). [28]

Hier soll angemerkt sein, dass in der Schadstoffmessung prinzipiell mit einem 95% Konfidenzintervall gearbeitet wird [8]

$$U(x) = k \cdot u(x) \quad (3.17)$$

**Tabelle 3.4:** Erweiterungsfaktor  $k$  in Abhängigkeit vom Konfidenzintervall [35]

Konfidenzintervall [%]	Erweiterungsfaktor $k$
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

### Vollständiges Messergebnis

Das vollständige Messergebnis  $X$  lässt sich nun wie folgt darstellen:

$$X = M \pm u(x) \quad (3.18)$$

Die Standardunsicherheit  $u(x)$  kann auch als relative Standardunsicherheit  $u_{rel}(x)$  angegeben werden (3.19).

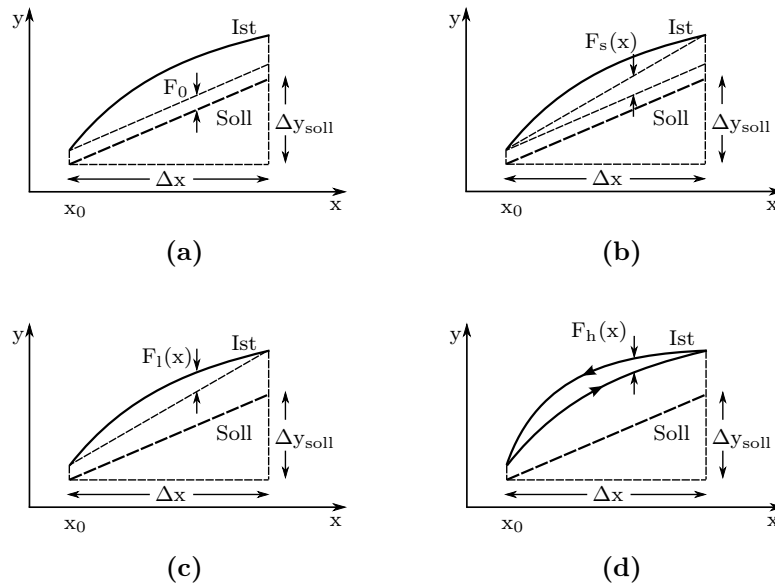
$$u_{rel}(x) = \frac{u(x)}{M} \quad (3.19)$$

$M$  beschreibt dabei das berichtigte Messergebnis und lässt sich mit der bekannten systematischen Abweichung  $\Delta x$  errechnen (Gleichung 3.20).

$$M = x - \Delta x \quad (3.20)$$

## 3.4 Kalibrierung

In Abbildung 3.13 sind die vier prinzipiellen Fehler eines Messgliedes dargestellt. Unter einem Fehler ist, wie bereits zuvor beschrieben, die Abweichung des Istwerts vom Sollwert (Nominal) zu verstehen. Natürlich können sich die einzelnen Fehler addieren oder auch (teilweise) aufheben.



**Abbildung 3.13:** Aufteilung der einzelnen Fehler (a) Nullpunktfehler (b) Steigungsfehler (c) Linearitätsfehler (d) Hysteresefehler [51]

Um nun diese Fehler möglichst klein zu halten, ist es empfehlenswert vor einer Messkampagne eine Kalibrierung durchzuführen. Dabei wird der Fehler ermittelt und in weiterer Folge korrigiert oder berücksichtigt. Häufig wird zur Ermittlung der Ausgleichsgeraden die Fixpunktmethod, wie sich auch in Abbildung 3.13 dargestellt ist, verwendet [51]. Dabei wird die Kennlinie durch den Anfangs- und den Endpunkt gelegt.

Die meisten Messgeräte bieten Unterstützung bei der Durchführung der Kalibrierung. So gehören der *zero-Test* (Nullpunktfehler) und der *span-Test* (Steigungsfehler) zum Standard. Dabei wird mit definierten Prüfgasen (Kalibriergasen) gearbeitet. Aufwändiger gestaltet sich hingegen die Detektierung der Linearitäts- und Hysteresefehler. Hier ist eine Mehrpunktkalibrierung durchzuführen.

## 3.5 Zusammenhang Volums- und Massenkonzentration

Schadstoffe werden zumeist als Volumenkonzentration (ppm, ppb, etc.) gemessen. Gesetzliche Bestimmungen und ihre Grenzwerte werden hingegen meist als Massenkonzentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\mu\text{g}/\text{km}^3$ , etc.) angegeben. Die Umrechnung zwischen Volumenkonzentration und Massenkonzentration erfolgt mit der idealen Gasgleichung:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (3.21)$$

$$R = \frac{R_m}{M} \quad (3.22)$$

Somit kann die Dichte  $\rho$  in Abhängigkeit vom Druck  $p$  und der Temperatur  $T$  aus der molaren Masse  $M$  (Kapitel 2.3) errechnet werden (Gleichung 3.23).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M \cdot p}{T \cdot R_m} \quad (3.23)$$

Nach dem IG-L sind Konzentrationswerte für gasförmige Luftschadstoffe auf 20 °C und 1.013 mbar zu beziehen. Tabelle 3.5 zeigt die Dichte für NO und NO<sub>2</sub> bei 1.013 mbar und 0 und 20 °C.

**Tabelle 3.5:** Dichte von NO und NO<sub>2</sub>

Element	M [g/mol]	$\rho$ [mbar]	t [°C]	$\rho$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
NO <sub>2</sub>	46,01	1.013	0	2,0522
			20	1,9122
NO	30,01	1.013	0	1,3386
			20	1,2472

Somit ergeben sich bei 20 °C und 1013 mbar folgende Umrechnungen:

$$\text{NO}_2 \quad 1 \text{ ppb} = 1,912 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$\text{NO} \quad 1 \text{ ppb} = 1,247 \mu\text{g}/\text{m}^3$$



# 4 Durchführung der Messungen im Plabutschtunnel

## 4.1 Methoden der Datenanalyse

In diesem Kapitel sollen einige für die Analyse der Daten wichtige Methoden und Hilfsmittel näher erläutert werden. Die Datenanalyse erfolgt mit dem Software-Paket R (<https://www.r-project.org>).

### Boxplot

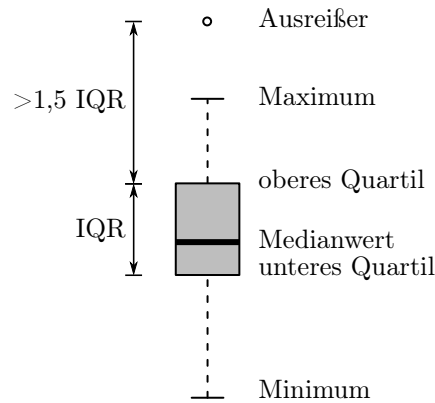
Ein Boxplot ist ein grafisches Instrument zur Beurteilung einer empirischen Verteilung. In seiner einfachsten Form besteht er aus fünf Punkten die folgende Daten beschreiben: Maximum, oberes Quartil (0,75), Medianwert, unteres Quartil (0,25) und Minimum. Innerhalb des Interquartilsabstandes IQR (interquartile range) liegen etwa 50% der Daten. Dieser Bereich wird auch Box genannt. Unter- und oberhalb der Box liegen etwa 25% der Daten. Der Medianwert liefert Informationen über die Symmetrie einer Verteilung. [43]

Die in dieser Arbeit verwendeten Boxplots werden als sogenannte *Box-Whisker-Plots* (Abbildung 4.1) ausgeführt. Der Unterschied zu herkömmlichen Boxplots besteht darin, dass die an der Box angebrachten Linien nicht immer bis zu den Extremwerten führen. Es erfolgt eine Begrenzung mit dem 1,5-fachen IQR. Beobachtungen außerhalb dieser Grenzen werden als Ausreißer gewertet. [30]

### Regressionsanalyse

Regressionsanalysen sind eine der am häufigsten verwendeten statistischen Analysemethoden. Mit dieser Analyse lassen sich Zusammenhänge zwischen einem oder mehreren Werten eines Merkmals (unabhängige Variablen) zur Erklärung eines anderen Merkmals (abhängige Variable) erklären und quantitativ beschreiben. Weiters können Schätzungen und Prognosen der Werte der abhängigen Variable erfolgen. [6], [43]

Der Zusammenhang der Merkmale wird durch eine Funktion, der sogenannten Regressionsfunktion, modelliert. Zu unterscheiden ist zwischen linearen (lineare Funktion)



**Abbildung 4.1:** Box-Whisker-Plot

und nichtlinearen (nichtlineare Funktion) Regressionsmodellen, sowie zwischen einfachen (ein erklärendes Merkmal) und multiplen Regressionsmodellen (mehrere erklärende Merkmale). Im Folgenden soll auf die lineare Regression näher eingegangen werden. [43]

Gleichung 4.1 zeigt die Darstellung der linearen Regressionsfunktion (Regressionsgerade). Die Schätzung der Regressionskoeffizienten erfolgt in den meisten Fällen durch die Methode der kleinsten Quadrate (OLS, Ordinary Least-Squares). Dabei werden die Koeffizienten der Regressionsfunktion ( $\beta_0$  und  $\beta_1$ ) so gewählt, dass die Summe der Abweichungsquadrate (Summe der Quadrate der Residuen) minimal wird. [30]

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad (4.1)$$

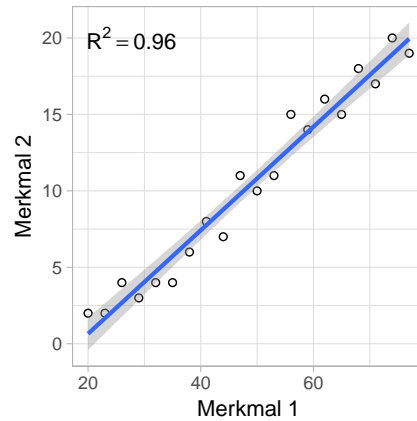
Ist die Regressionsfunktion bestimmt, kann die Anpassungsgüte an den Datensatz mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  ermittelt werden [43]. Mathematisch lässt sich das Bestimmtheitsmaß mittels des Quadrats der empirischen Kovarianz durch das Quadrat des Produkts der Standardabweichungen berechnen (Gleichung 4.2). [30]

Eine anschaulichere Form zeigt Gleichung 4.3.  $SQ$  steht für die Summe der Abweichungsquadrate. Der Index *Regression* bezieht sich dabei auf das Modell, der Index *Total* auf die Gesamtstreuung und der Index *Residual* auf den Fehler. [43]

$$R^2 = \frac{s_{xy}^2}{s_x^2 \cdot s_y^2} \quad (4.2)$$

$$R^2 = \frac{SQ_{Regression}}{SQ_{Total}} = 1 - \frac{SQ_{Residual}}{SQ_{Total}} \quad (4.3)$$

Das Bestimmtheitsmaß liegt immer zwischen Null und Eins. Für  $R^2 = 1$  gilt, dass die Regressionsfunktion perfekt ist und somit die Residuen Null sind. Im Falle von  $R^2 = 0$  liefert das Regressionsmodell hingegen keinen Erklärungsbeitrag. [43]



**Abbildung 4.2:** Lineares Regressionsmodell mit dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Abbildung 4.2 zeigt eine Darstellung des in dieser Arbeit verwendeten linearen Regressionsmodells. Die blaue Linie stellt die Regressionsfunktion und die hellblaue Schraffur das zugehörige 95% Konfidenzintervall dar.

Wie bereits beschrieben, kommt bei mehreren erklärenden Merkmalen die multiple lineare Regression zum Einsatz. Im Gegensatz zur einfachen linearen Regression gelangt anstatt der Regressionsgeraden eine Regressionsebene zur Anwendung. Gleichung 4.4 zeigt die mathematische Darstellung der Ausgleichsebenen.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 \quad (4.4)$$

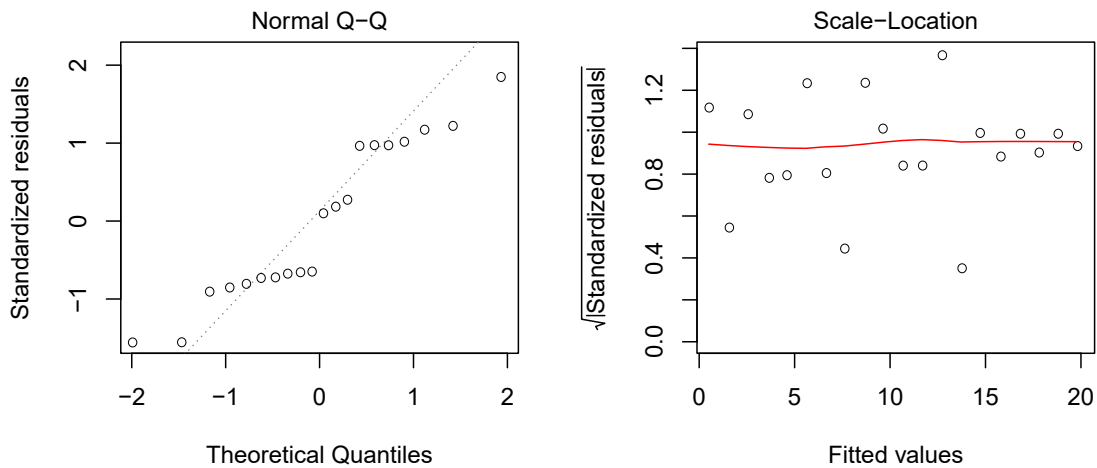
Um Modelle mit einer unterschiedlichen Anzahl von Merkmalen vergleichen zu können, wird bei der multiplen linearen Regression das sogenannte adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R_a^2$  verwendet. Im Gegensatz zum herkömmlichen Bestimmtheitsmaß, wird dieses um eine Korrekturgröße verringert. Dies ist notwendig, da das herkömmliche Bestimmtheitsmaß mit der Anzahl der Variablen steigt, auch wenn diese keine Verbesserung des Modells mit sich bringen. [6]

Gleichung 4.5 zeigt die mathematische Definition des adjustierten Bestimmtheitsmaßes, wobei  $n$  die Anzahl der Beobachtungswerte und  $p$  die Zahl der Regressoren darstellt.

$$R_a^2 = 1 - \frac{n-1}{n-(p+1)} \cdot (1 - R^2) \quad (4.5)$$

Das Bestimmtheitsmaß alleine liefert aber keine Aussage über die statistische Signifikanz. Die statistische Überprüfung wird mittels des Signifikanztests, der den  $P$ -Wert mit dem Signifikanzniveau  $\alpha$  vergleicht, durchgeführt. Das Signifikanzniveau wird in dieser Arbeit mit  $\alpha = 5\%$  gewählt. Somit gilt für  $P > 0,05$ , dass die Variable keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Zielgröße hat.

Die lineare Regression setzt einige Annahmen voraus. Vor allem sollen die Varianz  $s^2$  konstant (Homoskedastizität) und die Residuen normalverteilt sein. Um diese Modellvoraussetzung zu testen, werden in dieser Arbeit zwei grafische Prüfungen, die in Abbildung 4.3 exemplarisch dargestellt sind, durchgeführt.



**Abbildung 4.3:** Tests der Modellvoraussetzungen des linearen Modells - links: Normal Q-Q Plot, rechts: Scale-Location Plot

**Normal Q-Q (Quantil-Quantil) Plot** Die Quantile der standardisierten Residuen werden den theoretisch normalverteilten Quantilen gegenübergestellt. Liegen die Punkte entlang der Geraden, kann von einer Normalverteilung der Residuen ausgegangen werden.

**Scale-Location Plot** Dieser Plot zeigt, ob die Quadratwurzel der Residuen über den Bereich der Schätzwerte konstant bleibt. Liegt eine konstante Verteilung vor, ist diese durch eine horizontale Linie gekennzeichnet, was einer konstanten Varianz (Homoskedastizität) entspricht.

An dieser Stelle soll angemerkt sein, dass in dieser Arbeit für jede lineare Regression die Modellvoraussetzungen geprüft und, falls nicht explizit erwähnt, auch für positiv

befunden wurden. Aus Platzgründen wird in weiterer Folge auf eine Darstellung der einzelnen Plots verzichtet.

### Bland-Altman Plot

Eine gute Analysemethode, um zwei Messverfahren miteinander zu vergleichen, ist der so genannte *Bland-Altman Plot*. In Abbildung 4.4 ist ein solcher dargestellt. Dabei werden auf der Abszisse der Mittelwert und auf der Ordinate die Abweichung (Differenz) der beiden Messungen A und B aufgetragen. Die mittlere strichlierte horizontale Linie stellt den Mittelwert der Differenzen dar. Die obere und die untere Linie definieren die Grenzwerte der Übereinstimmung, die als 1,96-fache Standardabweichung ( $1,96 \cdot s$ ) berechnet werden. Hier soll nochmals angemerkt sein, dass sich demnach 95% der Werte innerhalb dieser Grenzwerte befinden. [30]

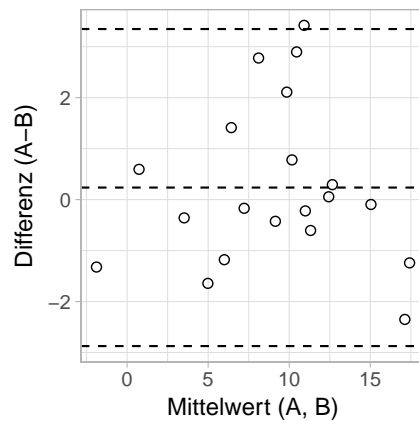
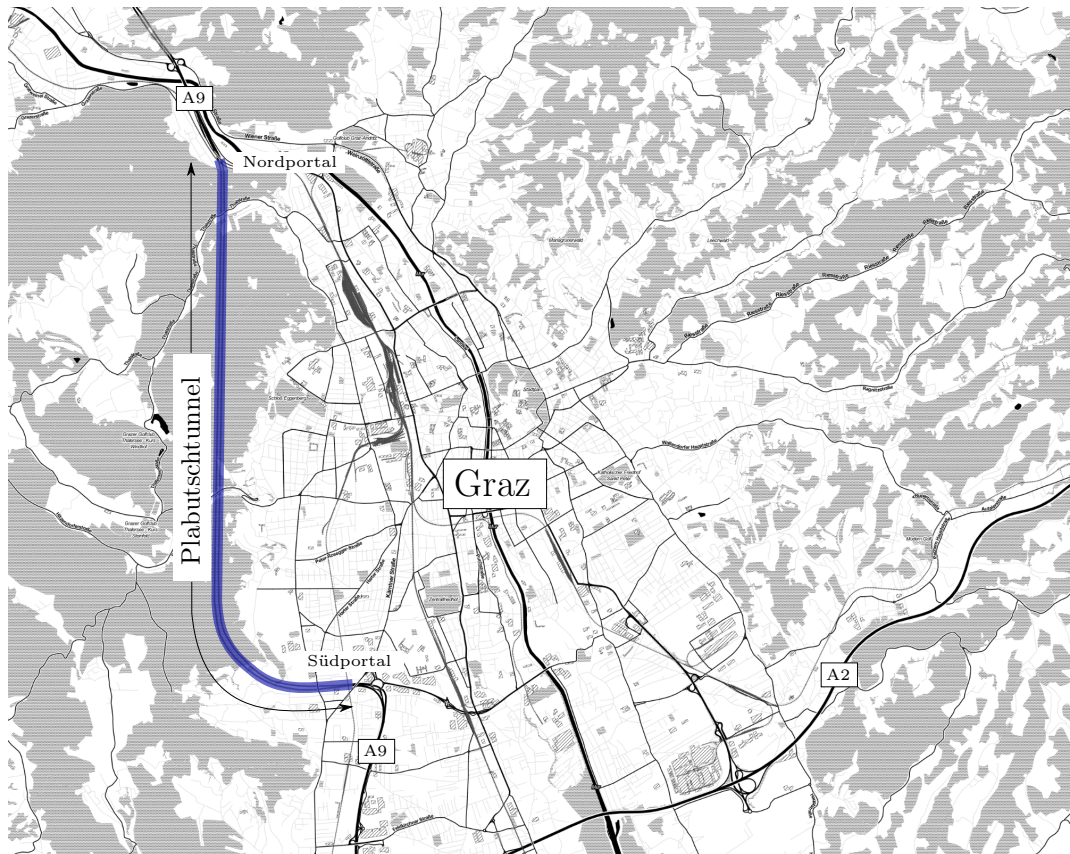


Abbildung 4.4: Bland-Altman Plot

## 4.2 Allgemeines zum Plabutschtunnel

Der Plabutschtunnel ist ein Straßentunnel der Autobahn A9. Er wurde als zweiröhriger Tunnel mit jeweils zwei Fahrspuren im Richtungsverkehr ausgeführt. Mit seiner Länge von ca. zehn Kilometern gilt er als längster zweiröhriger Autobahntunnel Österreichs (Tabelle 4.1).

Durch die Lage im Westen von Graz, stellt er eine wichtige Umfahrungsmöglichkeit der Stadt dar (Abbildung 4.5). Das Verkehrsaufkommen betrug im Jahr 2015 durchschnittlich 18.400 Fahrzeuge pro Tag und Fahrtrichtung [4], wobei der Anteil der schweren Nutzfahrzeug (SNF > 3,5 t) bei über 12% lag.



**Abbildung 4.5:** Kartenausschnitt mit eingezeichneter Lage des Plabutschunnels (Karte von <http://maps.stamen.com> mit Daten von <https://www.openstreetmap.org/>)

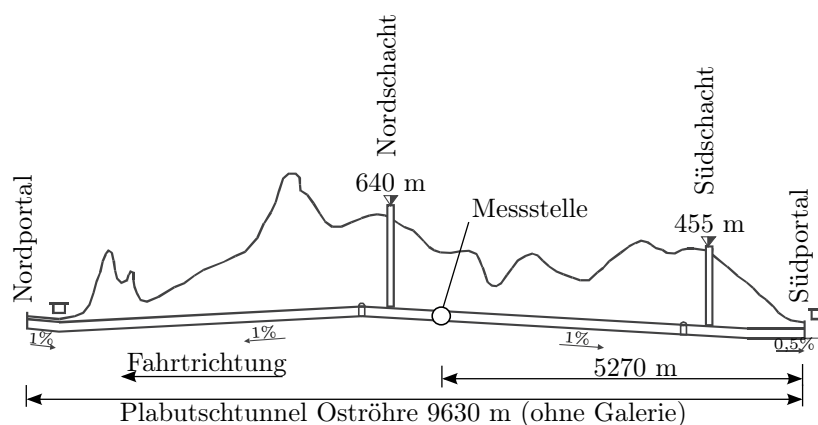
**Tabelle 4.1:** Aufstellung der zehn längsten Straßentunnel in Österreich inkl. der Verweildauer bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 bzw. 80 km/h. Bei zwei Röhren wurde die Längere aufgenommen. Länge der Röhren ohne Galerie. (Daten aus [10])

Name	Art	Röhren	Länge [m]	Verweildauer [min]	
				80 km/h	60 km/h
Arlberg-Straßentunnel	S	1	13.874	10,4	13,9
Plabutschtunnel	A	2	10.086	7,6	10,1
Gleinalmtunnel	A	1 (2)*	8.321	6,2	8,3
Karawankentunnel	A	1	7.864	5,9	7,9
Landecker Tunnel	A	1	6.955	5,2	7,0
Tauerntunnel	A	2	6.801	5,1	6,8
Pfändertunnel	A	2	6.744	5,1	6,7
Strenger Tunnel	S	2	5.740	4,3	5,7
Bosrucktunnel	A	2	5.509	4,1	5,5
Katschbergtunnel	A	2	5.500	4,1	5,5

A: Autobahn, S: Schnellstraße

\* zweite Röhre in Bau

Die Belüftung des Plabutschtunnels erfolgt im Normalfall mittels natürlicher Selbstbelüftung durch den Kolbeneffekt der Fahrzeuge. Die Oströhre besitzt zwei Entlüftungsschächte die eine Querlüftung zwar ermöglichen (siehe Abbildung 4.6), diese aber derzeit kaum mehr zum Einsatz kommen [50]. Sie dienten der Entlüftung des Tunnels vor dem Vollausbau im Jahre 2004, als der Betrieb noch einröhrig mit Gegenverkehr stattfand. Weiters sind sie für eine gezielte Rauchgasabsaugung im Brandfall notwendig.



**Abbildung 4.6:** Längsschnitt der Oströhre des Plabutschtunnels (angepasst nach [29])

### 4.3 Messaufbau

Im ersten Teil der Datenanalyse erfolgt die Messung der NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen mittels eines Chemilumineszenz-Analysators (CLD) des Fabrikats API Modell 200A, welcher in einem Messcontainer situiert ist. Das Prinzip der Chemilumineszenz wurde bereits in Kapitel 3.1.1 vorgestellt.

Im zweiten Teil sollen Stickoxidkonzentrationen, die mittels zweier Kompaktmessgeräte der Fa. SICK AG gemessen wurden, analysiert werden. Bei diesen Kompaktmessgeräten handelt es sich um Messgeräte, die speziell für den Einsatz in Tunneln konzipiert wurden. Neben der Messung von Stickoxiden, ist auch eine Ermittlung der Lufttemperatur und der Trübe möglich.

Das Messprinzip beruht auf der Methode der aktiven Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) mit einem Reflektor, welches in Kapitel 3.1.2.4 besprochen wurde. Wie in Tabelle 4.2 gezeigt, unterscheiden sich beide Messgeräte durch ihre Lichtquelle.

**Tabelle 4.2:** Aufstellung der verwendeten DOAS-Messgeräte (Quelle: Herstellerangaben Fa. SICK AG)

Bezeichnung	Schadstoff	Messbereich	Messfehler	Lichtquelle	Messdistanz
VICOTEC 321	NO <sub>2</sub>	0 ppm-1 ppm	± 0,05 ppm	Halogenstrahler	10 m
VICOTEC 322	NO	0 ppm-20 ppm	± 1 ppm	UV-Deuteriumstrahler	10 m

Der NO-Detektor (VICOTEC 322) verwendet einen Deuteriumstrahler, welcher Licht im UV-Bereich aussendet. Im Vergleich zu NO kann NO<sub>2</sub> auch im sichtbaren Bereich (VIS) detektiert werden (siehe Kapitel 3.1.2). Der NO<sub>2</sub>-Detektor (VICOTEC 321) arbeitet im sichtbaren Bereich (VIS) mit einem Halogenstrahler als Lichtquelle.

Zur Messung wurden die Messgeräte in der Pannenbucht AN9 in der Oströhre des Plabutschtunnels platziert. Die Messstelle befindet sich in ca. 5.270 m Entfernung zum Einfahrtsportal (Südportal), im Bereich einer längeren Steigung von ca. 1% (siehe Abbildung 4.6). Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Abbildung 4.7 dargestellt.



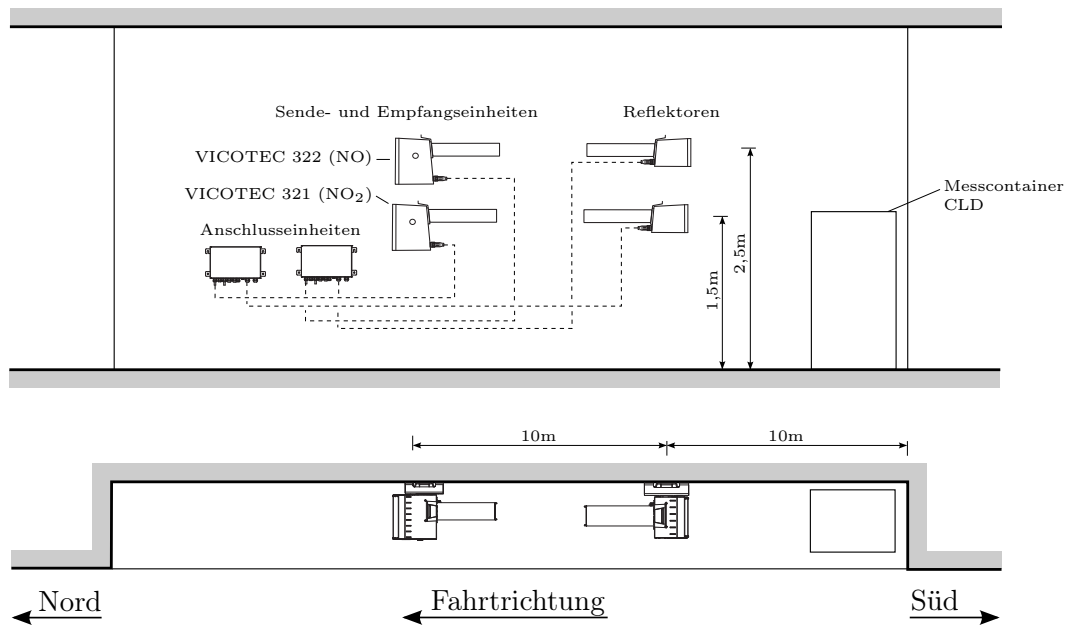


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Messaufbaus

## 4.4 Verkehrsaufkommen und Längsströmung

Zur Ermittlung des Verkehrsaufkommens im Tunnel wurden die Daten aus der Verkehrsmessstelle der ASFINAG verwendet. Dadurch ist eine Aufteilung des Verkehrs in leichten (PKW) und schweren Verkehr (LKW) möglich. Die Verkehrszahlen stehen als 6-Minuten Summenwerte zur Verfügung.

Als Verkehrsmessstelle wurde die Zählschleife A121 ausgewählt. Da sich diese Zählschleife in unmittelbarer Nähe der Pannenbucht AN9 befindet, muss ein relevanter zeitlicher Versatz zwischen Verkehrsmessung und Schadstoffmessung nicht berücksichtigt werden.

Des Weiteren wurden Längsströmungsgeschwindigkeiten aus drei verschiedenen Messpunkten (A109, A131 und A139) herangezogen und daraus 1-Minuten Mittelwerte gebildet. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da es immer wieder zu Ausfällen der Längsströmungsmessung kommt und durch die Berücksichtigung von drei Messgeräten eine erhebliche Verbesserung der Datenverfügbarkeit erreicht wurde.

Tabelle 4.3 zeigt eine Aufstellung der in dieser Arbeit verwendeten Messstellen mit ihrer jeweiligen Entfernung zum Tunneleingang.

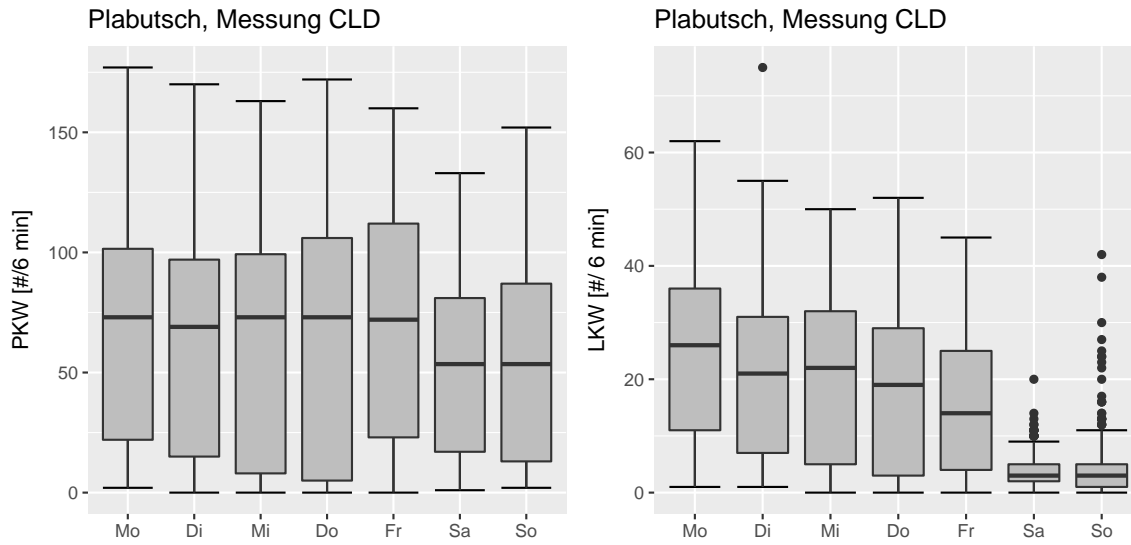
**Tabelle 4.3:** Lage der Messstellen im Plabutschtunnel (Quelle: Ausschreibungsplan Baulos Plabutschtunnel, Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2001)

Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Entfernung vom Südportal (ohne Galerie)
Längsströmungsmessung	A109 (LG112)	7.788 m
Längsströmungsmessung	A131 (LG141)	3.124 m
Längsströmungsmessung	A139 (LG151)	1.428 m
Verkehrszählschleife	A121	5.244 m
Pannenbucht (Messstelle)	AN9	5.270 m

### 4.5 Analyse der Stickoxidkonzentrationen und des Verkehrs

In diesem Kapitel sollen nun die gemessenen Daten aus dem Plabutschtunnel näher betrachtet und analysiert werden. Sämtliche hier betrachteten Daten stammen aus einer Messperiode vom 29.3.2017, 06:00 Uhr bis 12.4.2017, 15:54 Uhr. Die Stickoxidkonzentrationen wurden mit dem zuvor kurz beschriebenen CLD-Analysator API 200A gemessen. Die Aufzeichnung der Daten erfolgen als gemittelte 1-Minuten Werte, welche in einem weiteren Schritt zu 6-Minuten Mittelwerten (arithmetische Mittel) zusammengefasst werden. Dadurch können kurzzeitige Ausreißer abgeschwächt und eine Konsistenz mit den Verkehrsdaten hergestellt werden.

Abbildung 4.8 zeigt nun das Verkehrsaufkommen, aufgeteilt in PKW und LKW, während der Messperiode für die einzelnen Wochentage. Zu sehen ist, dass der PKW-Verkehr recht konstant verläuft, der LKW-Verkehr hingegen am Wochenende sehr stark zurückgeht. Dies hat natürlich mit dem in Österreich herrschenden LKW-Wochenendfahrverbot (§42 StVO 1960) zu tun. [52]



**Abbildung 4.8:** Verkehrsaufkommen (PKW und LKW) pro Wochentag während der Messperiode

In Abbildung 4.9 sind die gemessenen  $\text{NO}_x$ -,  $\text{NO}$ - und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen für den jeweiligen Wochentag dargestellt. Es lässt sich bereits hier erkennen, dass die  $\text{NO}$ -Konzentration vom Verlauf her dem LKW-Verkehr ähnelt. Die  $\text{NO}_2$ -Konzentration bleibt hingegen, wie auch das PKW-Verkehrsaufkommen, relativ konstant. Dieser Zusammenhang soll später noch weiter beleuchtet werden.

Durch den Einbruch der  $\text{NO}$ -Konzentration am Wochenende und der relativ gleichbleibenden  $\text{NO}_2$ -Konzentration, kommt es zu einem stark unterschiedlichen  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis (Abbildung 4.10).

## 4 Durchführung der Messungen im Plabutschtunnel

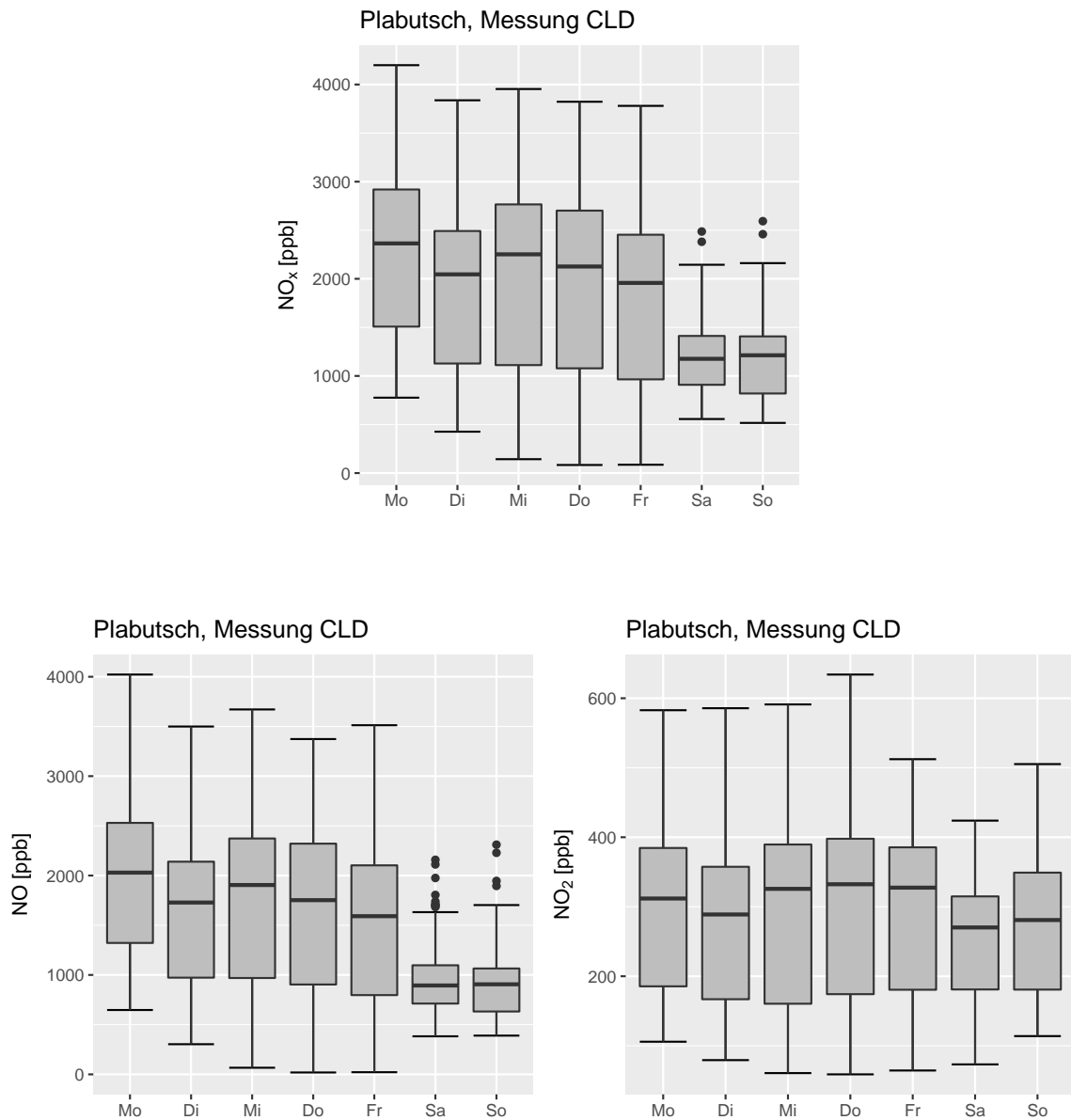
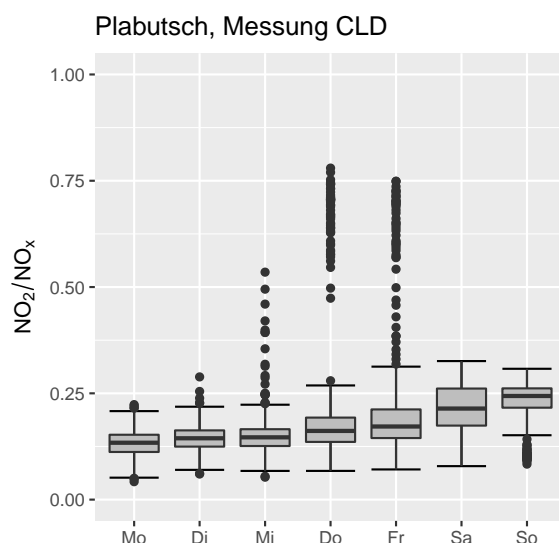


Abbildung 4.9: NO<sub>x</sub>-, NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentration pro Wochentag während der Messperiode



**Abbildung 4.10:** NO<sub>2</sub> zu NO<sub>x</sub>-Verhältnis pro Wochentag während der Messperiode

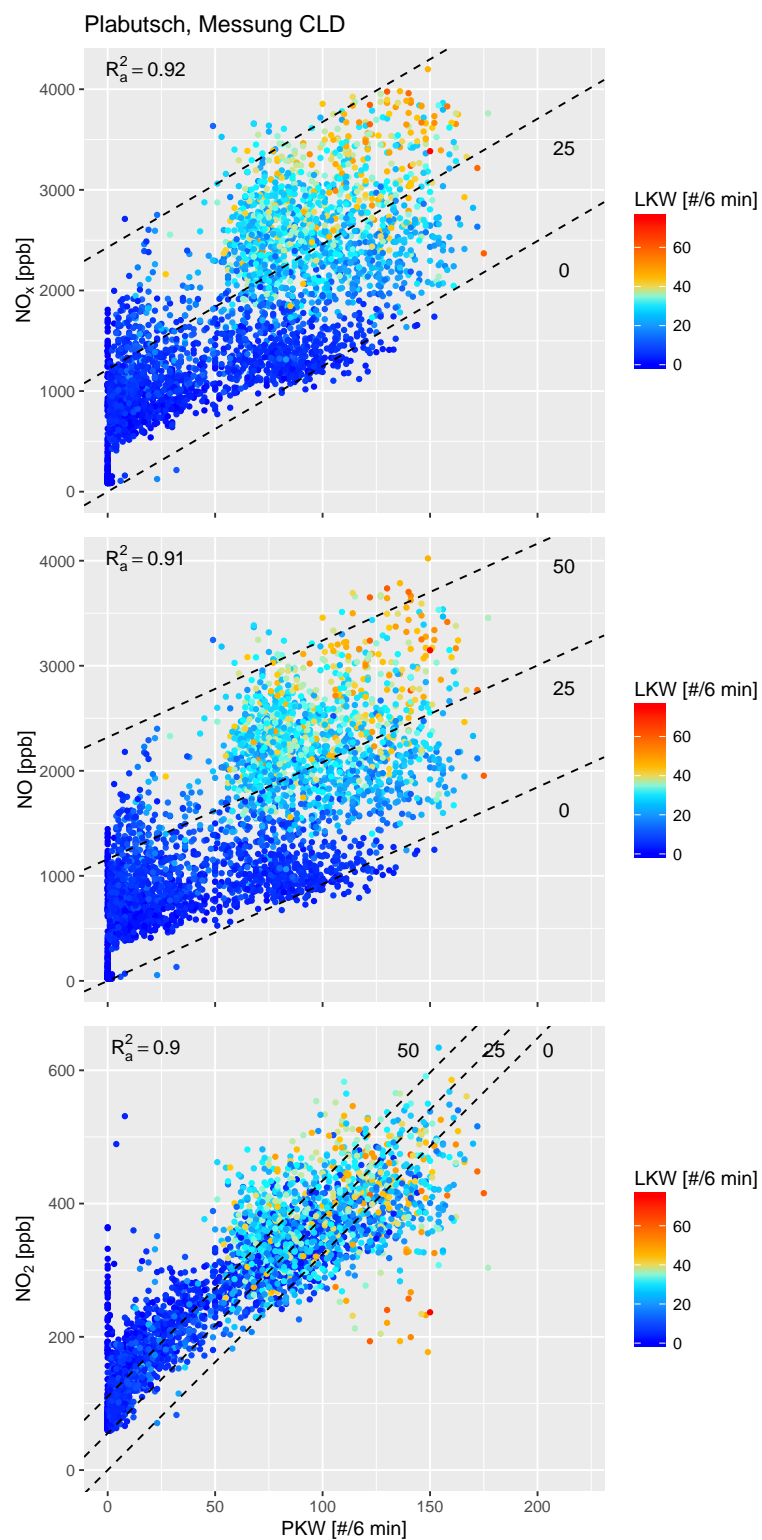
Im Folgenden soll nun der Zusammenhang der NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit dem Verkehrsaufkommen näher betrachtet werden. Dazu wird für jeden Schadstoff eine multiple lineare Regression (durch den Nullpunkt) durchgeführt, welche in Abbildung 4.11 grafisch dargestellt sind. Die drei strichlierten Linien entsprechen der Ausgleichsebene bei einem LKW-Verkehr von 0, 25 und 50 #/6 min.

Die multiple lineare Regressionsanalyse lässt auf einen statistischen Zusammenhang zwischen der Konzentration im Tunnel und dem Verkehrsaufkommen schließen ( $P \ll 0,05$ ). Auch das adjustierte Bestimmtheitsmaß weist mit  $R_a^2=0,92$  bei NO<sub>x</sub>,  $R_a^2=0,91$  bei NO und  $R_a^2=0,9$  bei NO<sub>2</sub> einen hohen Wert auf. Es kann also gesagt werden, dass die Stickoxidkonzentrationen in Straßentunneln sehr gut mit dem Verkehrsaufkommen korrelieren.

**Tabelle 4.4:** Aufstellung der Regressionskoeffizienten der multiplen linearen Regression in der Form  $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2$ . Verkehr in [# /6 min] und Konzentration in [ppb].

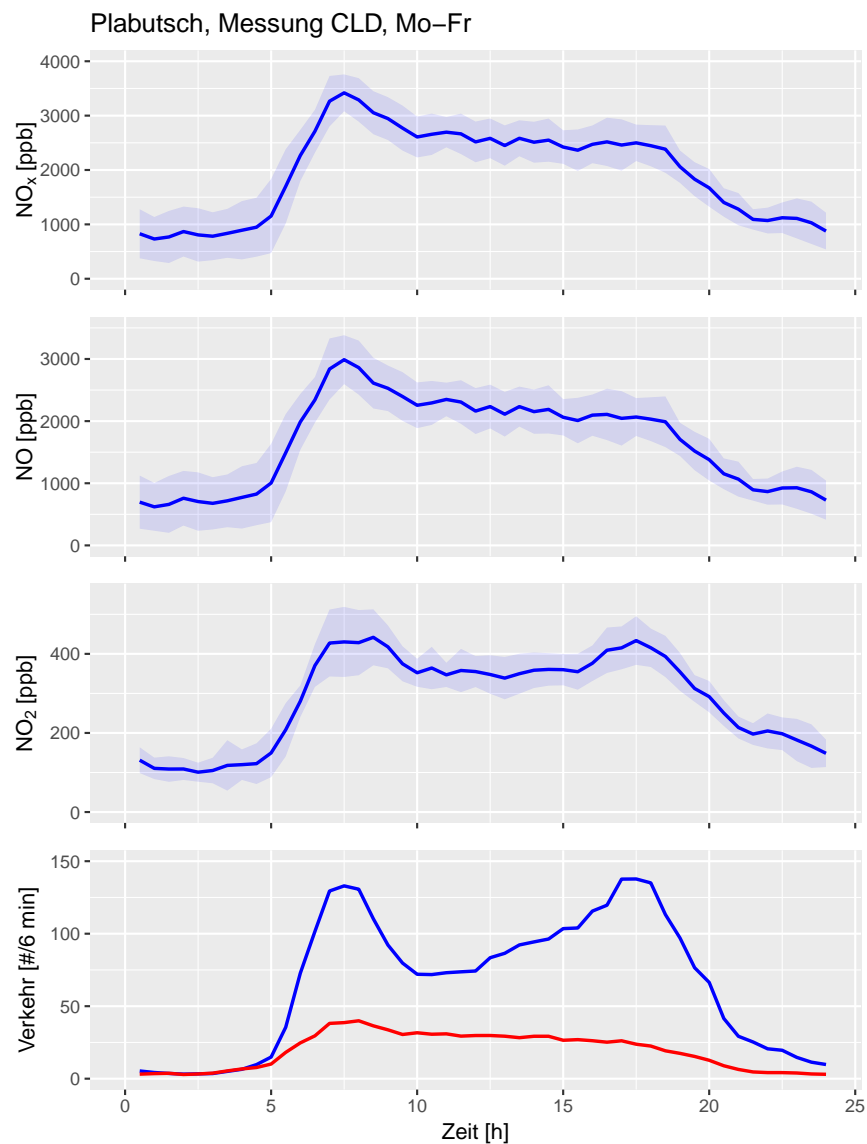
$y$	$\beta_0$	$\beta_1$	$x_1$	$\beta_2$	$x_2$
NO <sub>x</sub>	0	12,46	ANZ <sub>PKW</sub>	48,58	ANZ <sub>LKW</sub>
NO	0	9,22	ANZ <sub>PKW</sub>	46,37	ANZ <sub>LKW</sub>
NO <sub>2</sub>	0	3,24	ANZ <sub>PKW</sub>	2,21	ANZ <sub>LKW</sub>

Die Abbildungen 4.12 und 4.13 zeigen die gemittelten Werte (arithmetisches Mittel) der gesamten Messperiode. Die NO<sub>x</sub>-, NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind mit ihrer Stan-



**Abbildung 4.11:** Zusammenhang zwischen NO<sub>x</sub>-, NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und dem Verkehrsaufkommen (Aufteilung in PKW und LKW). Die strichlierten Linien entsprechen der Ausgleichsebenen bei einem LKW-Aufkommen von 0, 25 und 50 #/6 min.

Standardabweichung (blaue Schraffur) dargestellt. Das Verkehrsaufkommen ist aufgeteilt in PKW (blaue Linie) und LKW (rote Linie). Unter der Woche sind beim PKW-Verkehrsaufkommen die Stoßzeiten am Morgen und am Abend gut zu erkennen (Abbildung 4.12). Der LKW-Verkehr bleibt nach kurzzeitig erhöhtem Aufkommen am Morgen recht konstant. Bemerkenswert ist, dass die  $\text{NO}_2$ -Konzentration einen ähnlichen Verlauf wie der PKW-Verkehr aufweist, die  $\text{NO}$ -Konzentration hingegen eher dem Verlauf des LKW-Verkehrs ähnelt. Auch weist die  $\text{NO}$ -Konzentration nicht den zweiten Peak um ca. 17:30 Uhr auf.



**Abbildung 4.12:** Verlauf der gemittelten NO<sub>x</sub>-, NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen über den Tag (Mo-Fr). Die blaue Schraffur entspricht der Standardabweichung. Darunter der Verlauf des gemittelten Verkehrsaufkommens, aufgeteilt in PKW (blau) und LKW (rot) (wochentags).



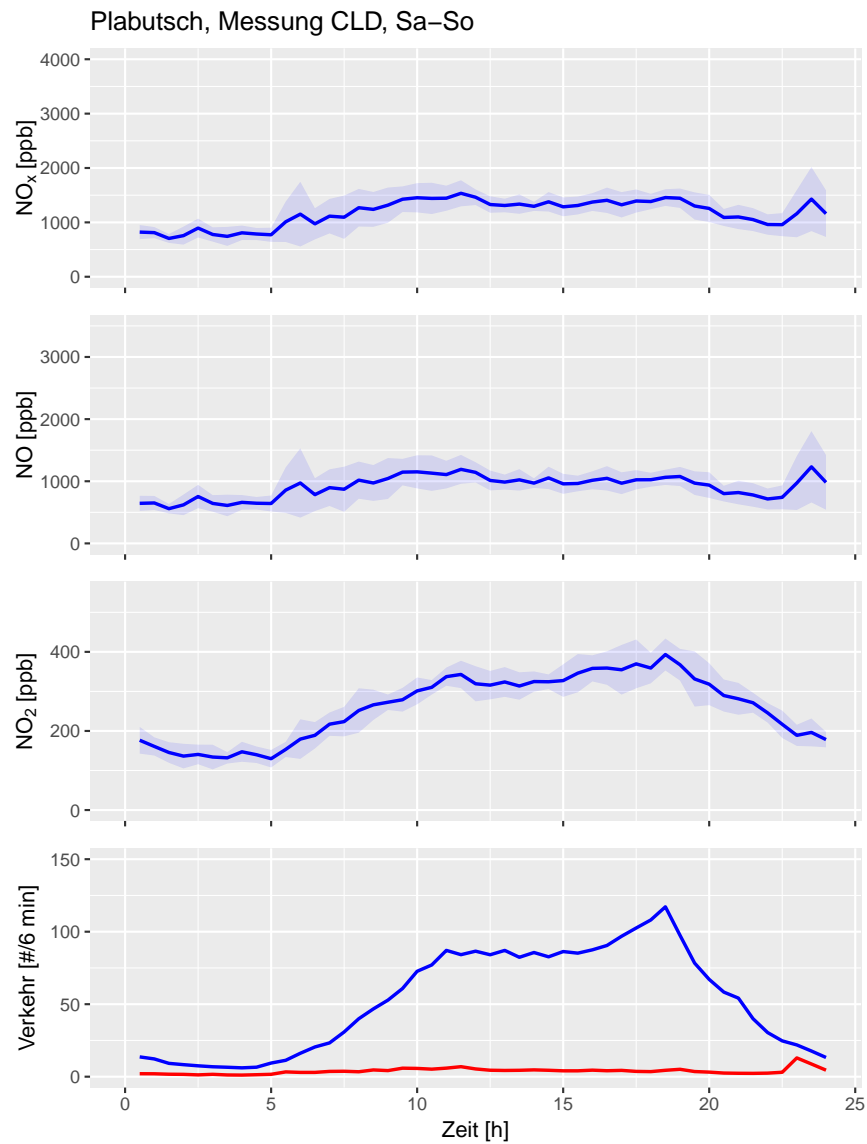
Das Verkehrsaufkommen am Wochenende (Abbildung 4.13) unterscheidet sich naturgemäß stark von jenem unter der Woche. So steigt der PKW-Verkehr erst langsam an und bleibt danach über einige Stunden recht konstant, ehe er am Abend, nach kurzem Anstieg, wieder abfällt. Der LKW-Verkehr ist natürlich aufgrund des Wochenend-Fahrverbotes sehr niedrig. Auch hier zeigt sich wieder deutlich der Zusammenhang zwischen der  $\text{NO}_2$ -Konzentration mit dem PKW-Verkehr und der  $\text{NO}$ -Konzentration mit dem LKW-Verkehr. Selbst der kurze Peak beim LKW-Verkehr nach Beendigung des Wochenendfahrverbotes am Sonntag um 22:00 Uhr, hat Einfluss auf die  $\text{NO}$ -Konzentration.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass PKW im Vergleich zu LKW einen, auf den gesamten  $\text{NO}_x$ -Ausstoß gesehenen, höheren prozentualen Ausstoß an  $\text{NO}_2$ -Emissionen aufweisen. Dies ist auch in Abbildung 4.11 unten gut zu erkennen. Hier weisen die Datenpunkte der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen, bezogen auf den Parameter PKW-Verkehr, eine erheblich geringere Streuung auf, als jene der  $\text{NO}$ -Konzentrationen.

Die ist vor allem von Bedeutung, da in Straßentunneln das  $\text{NO}_2$  hauptsächlich durch die Primäremissionen der Fahrzeuge entsteht. Durch die Abwesenheit der Sonnenstrahlung in Tunneln wird kein  $\text{O}_3$  gebildet. Eine Oxidation aus  $\text{NO}$  kann, wie später in Kapitel 5.1 gezeigt, weitestgehend vernachlässigt werden.

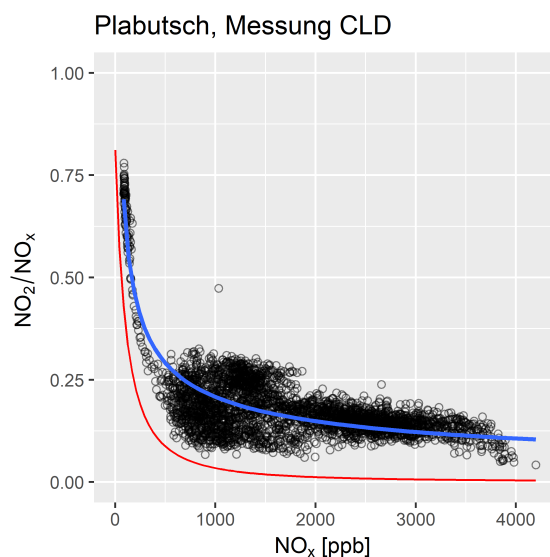
Der hohe Anteil von  $\text{NO}_2$  an den gesamten  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei PKW hat, wie auch in Kapitel 2.5 erläutert, mit den Abgasnachbehandlungssystemen zu tun. Besonders Diesel-PKW mit Partikelfiltern und Oxidationskatalysatoren emittieren einen hohen Anteil der  $\text{NO}_x$ -Emissionen als  $\text{NO}_2$ . [39]

Wie bereits in Kapitel 2.7 besprochen, beziehen sich die gesetzlichen Regelungen zu den Immissionen auf das  $\text{NO}_2$ , wohingegen sich jene der Emissionen auf das  $\text{NO}_x$  beziehen. Aufgrund der höheren Gesundheitsgefährdung für den Menschen (siehe Kapitel 2.8) ist die  $\text{NO}_2$ -Konzentration in Tunneln von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund soll nun detaillierter auf die  $\text{NO}_2$ -Konzentration und den Anteil von  $\text{NO}_2$  am gesamten  $\text{NO}_x$  eingegangen werden.



**Abbildung 4.13:** Verlauf der gemittelten NO<sub>x</sub>-, NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen über den Tag (Sa-So). Die blaue Schraffur entspricht der Standardabweichung. Darunter der Verlauf des gemittelten Verkehrsaufkommens, aufgeteilt in PKW (blau) und LKW (rot).

Abbildung 4.14 zeigt das Verhältnis von  $\text{NO}_2$  zu  $\text{NO}_x$  über das gesamte  $\text{NO}_x$ . Wie zu erwarten, sinkt das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis mit zunehmenden  $\text{NO}_x$ -Gehalt zuerst deutlich ab, ehe es sich einpendelt und relativ konstant bleibt (ebenfalls zu sehen in [72], [16], [54]).



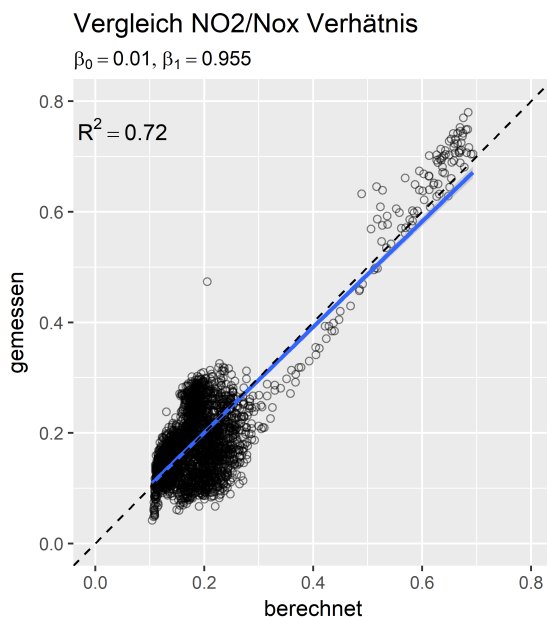
**Abbildung 4.14:**  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis in Abhängigkeit von der  $\text{NO}_x$ -Konzentration. Die rote Linie entspricht der Berechnung nach *CLEM7* [16] und die blaue Linie entspricht der mittels OLS ermittelten Ausgleichsfunktion.

Die rote Linie in der Abbildung entspricht dem Verlauf der analytischen Berechnung, die aus Messungen im *CLEM7* Tunnel in Brisbane (Australien) entwickelt wurde [16]. Wie zu sehen, liefert diese Berechnung zu geringe Werte für das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis und kann vor allem für höhere  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen als ungeeignet angesehen werden. Mögliche Gründe hierfür sind, dass in Australien der Anteil von Diesel-Fahrzeugen an den gesamten PKW nur etwa 11% beträgt [5]. In Österreich hingegen, gibt es mit 57% einen viel höheren Anteil von Diesel Fahrzeugen [58]. Dies führt, wie bereits besprochen, in Österreich zu einem erhöhten Ausstoß an  $\text{NO}_2$ -Emissionen. Ein weiterer Grund für die Unterschätzung des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses dürfte darin liegen, dass bei der Ermittlung im *CLEM7* Tunnel nur Werte von Stickoxidkonzentrationen bis ca. 300 ppb für die Berechnung herangezogen wurden.

Aus diesem Grund, wurde mit den gemessenen Daten aus dem Plabutschtunnel, eine Ausgleichsfunktion mittels OLS bestimmt. Mit diesem gefundenen Polynom (Gleichung 4.6) lässt sich nun eine Berechnung des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses, bei einer bekannten  $\text{NO}_x$ -Konzentration, durchführen.

$$[\text{NO}_2/\text{NO}_x] = 5,873 \cdot [\text{NO}_x]^{-0,483} \quad (4.6)$$

In Abbildung 4.15 ist ein Vergleich der gemessenen und der berechneten  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisse dargestellt. Obwohl es bei kleinen  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnissen zu Streuungen der Werte kommt, bildet die Berechnung die gemessenen Werte recht gut ab. Bei höheren Verhältnissen ( $>0,6$ ) liefert die Berechnung jedoch zunehmend zu geringe Werte. Als Abhilfe könnte eine zweite Gleichung, die diesen Bereich abdeckt, dienen. Darauf wird jedoch in dieser Arbeit verzichtet.



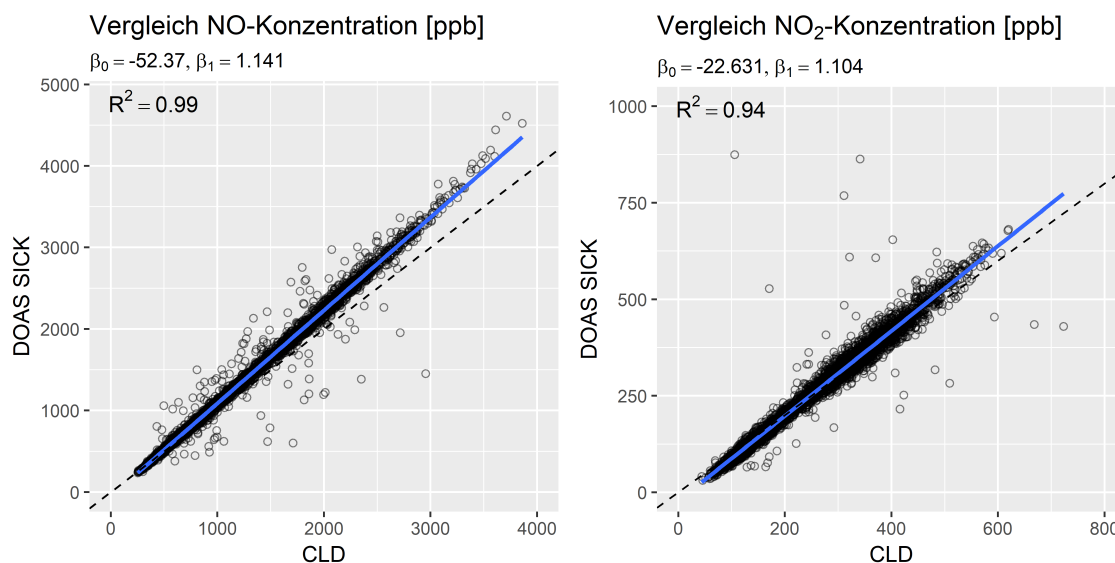
**Abbildung 4.15:** Vergleich des gemessenen und des berechneten  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses. Die strichlierte Linie zeigt die 1. Mediane ( $45^\circ$ ).

### 4.6 Vergleich der Messwerte aus der CLD- und der DOAS-Messung

Wie bereits kurz angesprochen, sollen in diesem Kapitel die Messwerte, welche mittels der DOAS-Kompaktmessgeräte der Fa. SICK AG ermittelt wurden, analysiert werden. Dazu werden diese Messwerte mit den Werten der CLD-Messung verglichen. Der Messzeitraum startete am 30.5.2017, 00:00 Uhr und endete am 19.6.2017, 23:54 Uhr. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, werden die Messwerte als 1-Minuten-Mittelwerte aufgezeichnet und in weiterer Folge zu 6-Minuten-Mittelwerten zusammengefasst. Da die erste Durchsicht der Daten einige Ausreißer erkennen lies, die nur auf eine Fehlfunktion der Messung zurückzuführen sein können, wurden diese Werte entfernt. Es handelt sich um Werte der DOAS-Messung, welche einen Wert größer als

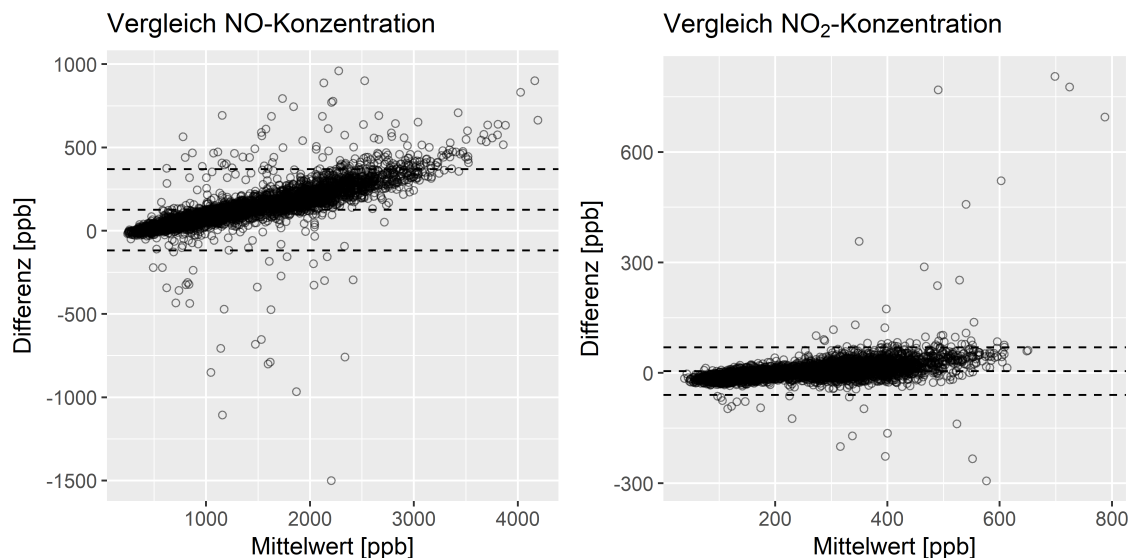
10.000 ppb beim NO bzw. 2.000 ppb beim NO<sub>2</sub> aufweisen. So wurden 32 (von über 5.000) Messreihen nicht berücksichtigt.

In Abbildung 4.16 sind die Messwerte der beiden Messungen (CLD und DOAS) dargestellt. Die Analyse mittels linearer Regression ergibt ein Bestimmtheitsmaß bei der NO-Messung von  $R^2=0,99$  und bei der NO<sub>2</sub>-Messung von  $R^2=0,94$ . In beiden Fällen zeigt die Ausgleichsgerade eine leichte Lage- und eine Verhältnis-Abweichung. Das DOAS-Messgerät der Fa. SICK AG zeigt durchschnittlich etwas höhere Werte an.



**Abbildung 4.16:** Vergleich der Messwerte (NO und NO<sub>2</sub>) aus den CLD- und DOAS-Messung mittels linearer Regression. Die strichlierte Linie zeigt die 1. Mediane (45°).

Für eine genauere Betrachtung der beiden Messverfahren soll nun eine Analyse nach *Bland Altman* durchgeführt werden. Abbildung 4.17 zeigt die grafische Darstellung dieser Analyse. Die aufgetragenen Differenzen auf der Ordinate entsprechen den Werten der DOAS-Messung minus der CLD-Messung. Wie auch bereits die lineare Regression gezeigt hat, liefert das DOAS-Gerät im Durchschnitt etwas höhere Werte. Der Mittelwert der Differenz beträgt bei der NO-Messung 125,5 ppb und bei der NO<sub>2</sub>-Messung 4,7 ppb. Die 1,96-fache Standardabweichung ( $1,96 \cdot s$ ) weist mit 244,2 ppb für NO bzw. 64,9 ppb für NO<sub>2</sub> etwas hohe Werte auf.

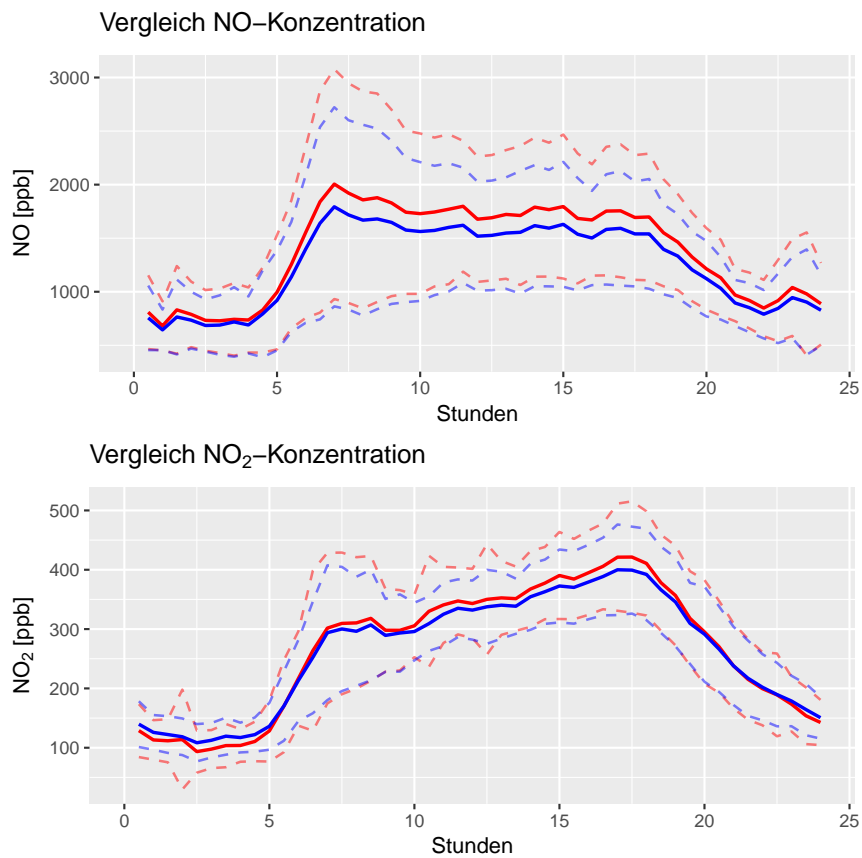


**Abbildung 4.17:** Vergleich der Messwerte (NO und NO<sub>2</sub>) aus den CLD- und DOAS-Messung mittels eines Bland Altman Plots. Die mittlere Differenz beträgt 125,5 ppb (NO) bzw. 4,7 ppb (NO<sub>2</sub>) und die 1,96-fache Standardabweichung 244,2 ppb (NO) bzw. 64,9 ppb (NO<sub>2</sub>).

Ebenfalls gut zu erkennen ist ein systematischer Unterschied bei der NO- und bei der NO<sub>2</sub>-Messung. Die Differenz steigt in beiden Fällen mit dem Mittelwert an. Unterschiede gibt es bei den Ausreißerpunkten. So zeigt die NO-Messung bis zu den mittleren Konzentrationen einige Ausreißer mit negativen Differenzen. Dies bedeutet, dass in diesen Fällen die Messung mittels CLD die höheren Werte lieferte. Die NO<sub>2</sub>-Messung hingegen zeigt bei höheren Konzentrationen teils sehr große Ausreißer mit positiven Differenzen, die auf zu hohe Werte durch die DOAS-Messung schließen lassen.

In Abbildung 4.18 ist der Verlauf der Messwerte als Halbstundenmittelwert über einen Tag aufgetragen. Besonders die NO-Messung zeigt bei höheren Konzentrationen (von etwa 06:00 bis 19:00 Uhr) die größten Differenzen zwischen den beiden Messungen. In den Abendstunden, wenn die Konzentration sinkt, verringert sich auch die Differenz.

Dass die Messungen mittels CLD die niedrigeren Werte im Vergleich zur DOAS-Messung liefert ist durchaus überraschend. So wurden von *Dunlea et al.* [18] Messungen von NO<sub>2</sub>-Konzentrationen mittels Chemilumineszenz (mit Molybdänoxid-Wandlern) und verschiedenen spektroskopischen Messverfahren durchgeführt. Besonders an stark befahrenen Straßen zeigte sich eine Überschätzung der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die durch CLD-Messung ermittelt wurden, von bis zu 22%. Diese positiven Interferenzen dürften hauptsächlich in Verbindung mit reaktiven Stickstoffverbindungen (NO<sub>y</sub>) wie z.B. Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) und *alkyl* und *multifunctional alkyl nitrates* entstehen. Weiters wird auch eine Querempfindlichkeit gegenüber hohen Peroxyacetylnitrat (PAN) Konzentra-



**Abbildung 4.18:** Verlauf der Halbstundenmittelwerte (NO oben und NO<sub>2</sub> unten) aus den CLD- (blaue Linie) und DOAS- (rote Linie) Messungen über den Tag. Die strichlierten Linien stellen die jeweilige Standardabweichung dar.

tionen vermutet. [18]

Alles in allem kann aber gesagt werden, dass sich die DOAS-Kompaktmessgeräte zur Messung von Stickoxidkonzentrationen in Straßentunneln eignen. Im Vergleich zur CLD-Messung konnte nur eine minimale Nullpunktabweichung (Offset) festgestellt werden. Auch die Abweichungen im Verhältnis können im Rahmen der Toleranzen angesehen werden.

Im Vergleich zu einer CLD-Messung, hat die Messung mittels der DOAS-Kompaktmessgeräte einen geringeren Wartungsbedarf, was natürlich zu einer Verringerung der Betriebskosten führt. Auch konnte im Laufe der Messungen keine Verschlechterung der Messergebnisse festgestellt werden. Lediglich die Ausrichtung des Lichtpfades muss sehr sorgfältig erfolgen, da ansonsten keine sichere Messung gewährleistet werden kann.

### 4.7 Messung der Ruß-Konzentrationen (Black Carbon)

Zusätzlich zu den Stickoxiden wurden Konzentrationen an Black Carbon (BC) gemessen. Black Carbon, im deutschen als Ruß bezeichnet, tritt hauptsächlich bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen auf. Besonders Dieselmotoren, aber auch direkteinspritzende Ottomotoren, gelten als die Hauptemittenten im Straßenverkehr. [20]

Da Rußpartikel als eine der Hauptbestandteile der Partikelemissionen des Verkehrs gelten, stellen sie ein Risiko für die menschliche Gesundheit dar.  $PM_{2,5}$ -Partikel können aufgrund ihrer kleinen Größe über die Atemwege bis in die Lungenbläschen vordringen. [23]

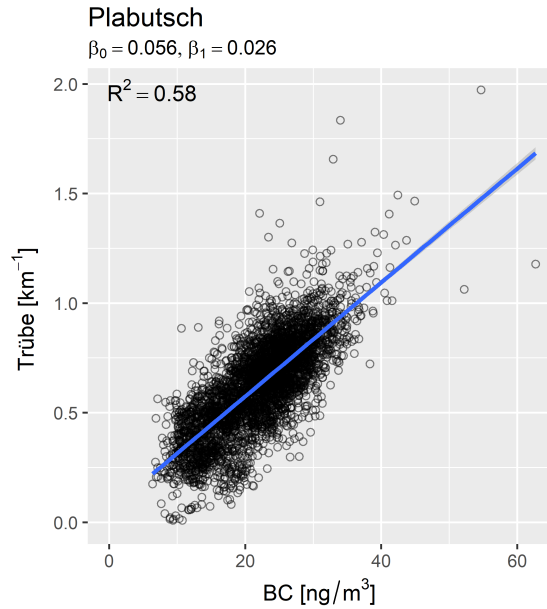
In Tunneln kommt eine weitere Eigenschaft der Partikel zum Tragen. Aufgrund der lichtbrechenden Eigenschaften kommt es zu Beeinträchtigungen der Sichtweite. Da dies sicherheitsrelevante Auswirkungen hat, wird die sogenannte Sichttrübung in Straßentunneln reglementiert (siehe auch Kapitel 7.2).

Die Messung der BC-Konzentration wurde mittels eines Rußmonitors (Thermo Fisher MAAAP 5012) durchgeführt. Das Prinzip der Messung beruht auf der Änderung der Lichtabsorption aufgrund der zunehmenden Abscheidung von Rußpartikeln auf einem Filter. Der Messzeitraum war vom 4.5.2017, 12:00 Uhr bis 21.5.2017, 16:54 Uhr mit einer zeitlichen Auflösung von sechs Minuten.

In Abbildung 4.19 ist nun der Vergleich zwischen der gemessenen BC-Konzentration und der Extinktion (Trübe) dargestellt. Die Werte der Trübe stammen von dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Kompaktmessgerät der Fa. SICK AG. Die lineare Regression



ergibt mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,58$  nur eine begrenzte Aussagekraft.



**Abbildung 4.19:** Vergleich des Black Carbon (BC) mit der Extinktion (Trübe)

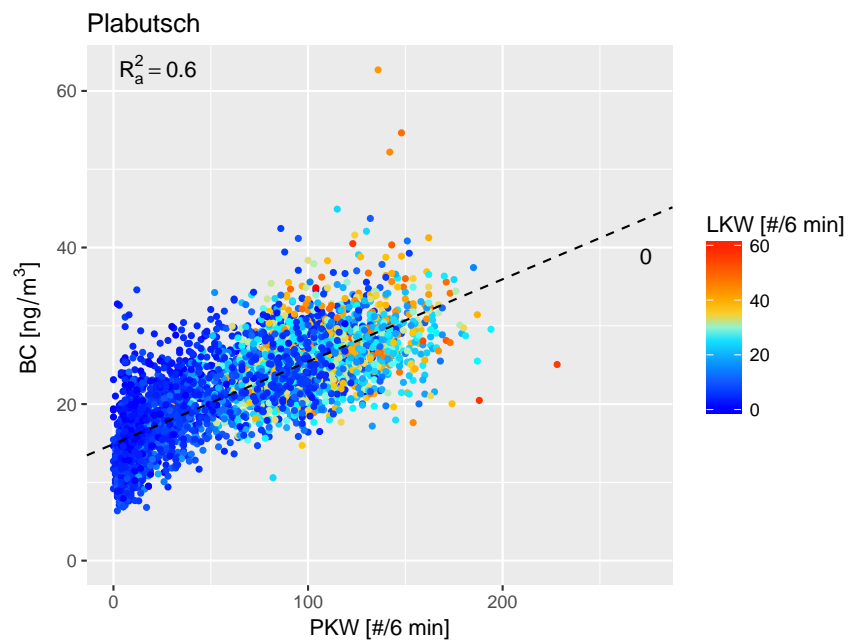
Der Planungsgrenzwert für die Trübe in Straßentunneln wird gemäß RVS 09.02.32 (Juni 2010) mit  $k_{zul}=0,007 \text{ m}^{-1}=7 \text{ km}^{-1}$  festgelegt. Wie zu sehen wird dieser Grenzwert während der gesamten Messperiode nicht erreicht.

Abbildung 4.20 zeigt eine multiple lineare Regression des Black Carbon mit dem gesamten Verkehrsaufkommen (PKW und LKW). Es lässt sich ein funktioneller Zusammenhang zwischen dem Black Carbon und dem Verkehrsaufkommen ableiten. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß weist einen Wert von  $R_a^2=0,6$  auf. Die Regressionskoeffizienten der Ausgleichsebenen sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

**Tabelle 4.5:** Aufstellung der Regressionskoeffizienten der multiplen linearen Regression in der Form  $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2$ . Verkehr in [# / 6 min] und BC-Konzentration in [ng/m³].

$y$	$\beta_0$	$\beta_1$	$x_1$	$\beta_2$	$x_2$
BC	14,89	0,1053	ANZ <sub>PKW</sub>	0,0022	ANZ <sub>LKW</sub>

Der Zusammenhang zwischen dem Black Carbon und dem  $\text{NO}_x$  ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,38$  lässt auf einen Zusammenhang zwischen dem Black Carbon und dem  $\text{NO}_x$  schließen. Die weitere Untersuchung ergab ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,33$  für  $\text{NO}$  und  $R^2=0,56$  für  $\text{NO}_2$ . Die im Vergleich zum



**Abbildung 4.20:** Vergleich des Black Carbon (BC) mit dem Verkehrsaufkommen. Die strichlierte Linie entspricht der Ausgleichsebene bei einem LKW-Aufkommen von 0 #/6 min.

NO höhere Übereinstimmung zwischen Black Carbon und  $\text{NO}_x$  bzw.  $\text{NO}_2$  weist darauf hin, dass dieselbetriebene Fahrzeuge die Hauptverursacher von Black Carbon sind.

## 4.7 Messung der Ruß-Konzentrationen (Black Carbon)

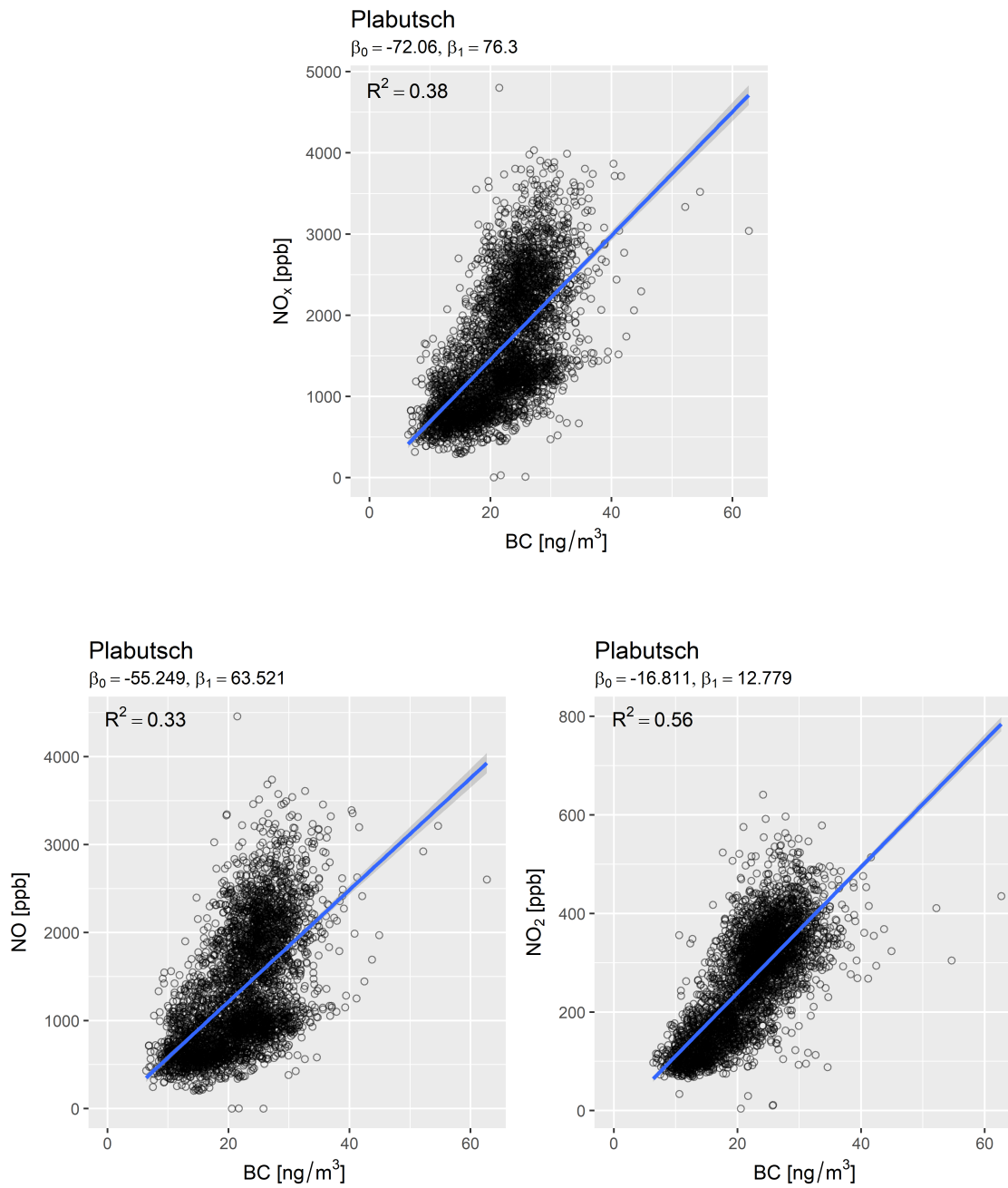


Abbildung 4.21: Vergleich des Black Carbon (BC) mit NO<sub>x</sub>, NO und NO<sub>2</sub>

## 4.8 Konzentrationen im Fahrzeuginnenraum

Die bisherigen Messungen haben gezeigt, dass in Straßentunneln sehr hohe Konzentrationen an NO und NO<sub>2</sub> auftreten. Um nun die Belastung auf den Menschen beurteilen zu können, muss die Schadstoffkonzentration im Innenraum der Fahrzeuge ermittelt werden. Da wie bereits in Kapitel 2.8 erläutert, NO<sub>2</sub> als der schädlichere Schadstoff anzusehen ist, wird im Folgenden besonderes Augenmerk auf die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen gelegt.

Bei Lüftungsanlagen für Kraftfahrzeuge ist prinzipiell zwischen Umluftbetrieb (UML) und Außenluftbetrieb (AUL) zu unterscheiden. Im Außenluftbetrieb (oft auch als Frischluftbetrieb bezeichnet) wird die gesamte benötigte Luftmenge aus der Umgebung angesaugt und in den Fahrgastraum transportiert. Danach strömt die Luft über Abluftöffnungen wieder ins Freie.

Beim Umluftbetrieb wird die Luft aus dem Fahrgastraum angesaugt und nach der erforderlichen Konditionierung diesem wieder zugeführt. Durch die Umströmung des Fahrzeugs kommt es zu einem Unterdruck im Fahrzeuginnenraum, sodass trotzdem ein Teil der Umgebungsluft über die Karosserie ins Fahrzeug gelangen kann. [26]

*Yamada et al.* (Japan) [72] und *Martin et al.* (Australien) [42] untersuchten NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Fahrgastraum von PKW beim Durchfahren von Straßentunneln. Zeitgleich wurden auch die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Tunnel selbst erfasst. Dadurch konnten die Verhältnisse der Konzentration zwischen PKW-Innenraum und Tunnel (I/O Verhältnis) berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 dargestellt.

**Tabelle 4.6:** Verhältnisse der NO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen PKW-Innenraum und Tunnel (I/O Verhältnis) im Außenluft- (AUL) bzw. Umluftbetrieb (UML)

I/O Verhältnis		Quelle
AUL	UML	
0,63	0,14	<i>Yamada et al.</i> [72]
0,33-0,80	0,08-0,36	<i>Martin et al.</i> alle PKW (BJ. 2004-2014) [42]
0,33-0,55	0,08-0,24	<i>Martin et al.</i> , neue PKW (BJ. 2011-2014) [42]
0,58	0,20	<i>Martin et al.</i> , Mittelwert aller PKW (außer V2*) [42]

\* Fahrzeug V2 hatte beschädigte Türdichtungen

Wie zu erwarten, ergeben die I/O Verhältnisse im AUL-Betrieb viel höhere Werte als im UML-Betrieb. Ebenfalls zu erkennen ist, dass neue wie auch hochpreisige PKW ein besseres (niedrigeres) die I/O Verhältnisse aufweisen. Dies hat nach *Martin et al.* wohl vor allem mit der Ausführungsqualität der Fahrzeuge zu tun.

*Yamada et al.* zeigt weiters, dass trotz Einsatz des UML-Betriebs, die NO<sub>2</sub>-Konzentrat-

ion im Fahrzeug entlang des Tunnels leicht steigt. Dies hat wie bereits angesprochen mit den Undichtheiten der Karosserie und den damit verbundenen Lufteintritten zu tun.

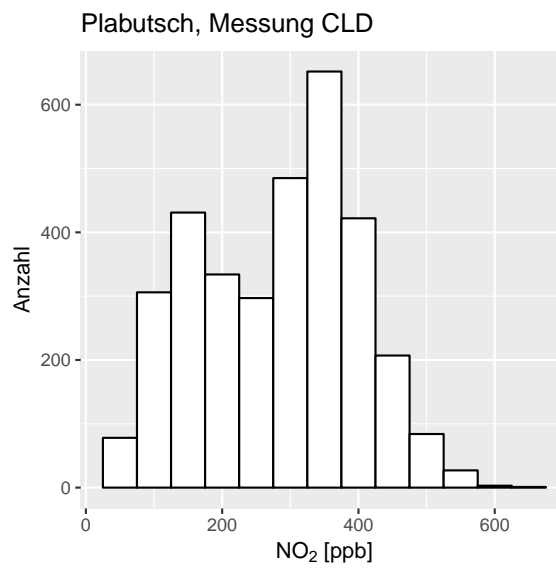
Bei den Messungen, die im Laufe dieser Arbeit im Plabutschtunnel durchgeführt wurden, konnten  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen von bis zu 634 ppb gemessen werden. Beim ungünstigsten I/O Verhältnis von 0,8 (Tabelle 4.6) ergibt dies eine  $\text{NO}_2$ -Konzentration im Fahrzeuginnenen von über 500 ppb. Aber auch im Umluftbetrieb mit einem I/O Verhältnis von 0,36 ergibt sich noch eine Innenraumkonzentration von 228 ppb.

Diese Werte zeigen, dass es vor allem beim Außenluftbetrieb zu einer signifikanten Konzentration von  $\text{NO}_2$  im Fahrzeug kommen kann. Wie in Kapitel 2.7.2 gezeigt, liegt die Empfehlung von Seiten der WHO für die maximale  $\text{NO}_2$ -Konzentration bei 105 ppb ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Anzumerken ist, dass dieser Grenzwert für einen Beurteilungszeitraum von einer Stunde gilt. In der Regel ist die Aufenthaltsdauer in einem Straßentunnel natürlich erheblich kürzer (siehe auch Tabelle 4.1). Als problematisch sind jedoch lange Stadttunnel, die pro Tag öfters durchfahren werden müssen (Pendlerverkehr), anzusehen. Auch Berufskraftfahrer, die während ihrer Fahrt mehrere Tunnel passieren müssen, sind demnach zu hohen Stickoxidkonzentrationen ausgesetzt.

In Bezug auf Arbeitnehmer, sei nochmals auf die Immissionsgrenzwerte der MAK verwiesen (Tabelle 2.4). Im Vergleich zu den Empfehlungen der WHO, liegen diese um ein vielfaches höher.

Zum Abschluss soll noch untersucht werden, wie oft es zu kritischen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Tunnel kommt. Dazu wird unter Annahme eines durchschnittlichen I/O Verhältnisses von 0,2 (UML) und einer maximal empfohlenen Innenraumkonzentration von 105 ppb eine kritische  $\text{NO}_2$ -Konzentration im Tunnel von 525 ppb festgelegt. Bei den Messungen im Plabutschtunnel wurden ca. 3.300 6-Minuten-Mittelwerte gemessen. Von diesen 3.300  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen lagen nur 31 über 525 ppb. Dies ergibt einen prozentualen Anteil von weniger als 1%. In Abbildung 4.22 ist die Verteilung der im Plabutschtunnel gemessenen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen dargestellt.

Dies zeigt, dass selbst die strengen Empfehlungen der WHO bezüglich  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen in 99% der Fälle eingehalten werden, sofern die Lüftungsanlage der Fahrzeuge im UML-Betrieb arbeitet. Außerdem wurden die verwendeten Konzentrationen, wie zuvor erwähnt, bei einer Tunnellänge von 5.720 m gemessen. Bei Tunnel mit Richtungsverkehr ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Konzentrationen an  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  mit steigender Tunnellänge ebenfalls erhöhen.



**Abbildung 4.22:** Verteilung der NO<sub>2</sub>-Konzentration im Plabutschtunnel

# 5 Berechnung von Stickoxidkonzentrationen in Straßentunneln

## 5.1 Grundlagen zur Berechnung

In diesem Kapitel wird mittels eines mathematischen Modells versucht, Stickoxidkonzentrationen in Straßentunneln zu berechnen. Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung und der Massenbilanz kann, unter Annahme konstanter Dichte ( $Ma \ll 1$ ) und optimaler Durchmischung, die einfache Gleichung 5.1 aufgestellt werden (siehe auch Abbildung 5.1).

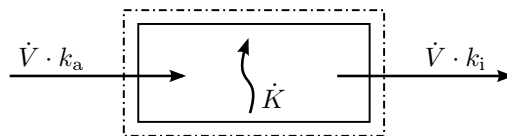
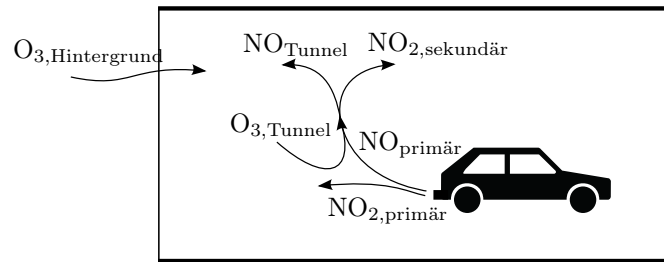


Abbildung 5.1: Bilanz des Schadstofftransportes und der Entstehung

$$\dot{V} \cdot k_a + \dot{K} = \dot{V} \cdot k_i \quad (5.1)$$

$k_a$  und  $k_i$  sind die Schadstoffkonzentrationen außerhalb bzw. innerhalb des Systems.  $\dot{V}$  ist der Volumenstrom über die Systemgrenzen und  $\dot{K}$  beschreibt die Menge des gebildeten Schadstoffs im System. Im Fall von Straßentunneln erfolgt die Bildung der Schadstoffe durch die Kraftfahrzeuge, die sich im Tunnel befinden. Wie in Kapitel 2.4 gezeigt, stoßen Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmotoren NO sowie NO<sub>2</sub> aus. Dieser primäre Ausstoß (NO<sub>primär</sub> und NO<sub>2,primär</sub>) ist in Datenbanken in Form von Emissionsfaktoren *Efa* gelistet. Emissionsfaktoren sind flottenspezifisch und werden laufend angepasst. Ihre Angabe erfolgt streckenbezogen.

Neben den primären Emissionen kommt es infolge von chemischen Reaktionen zu sekundären Emissionen. Dabei wird das primäre NO zu NO<sub>2</sub> oxidiert (Abbildung 5.2).

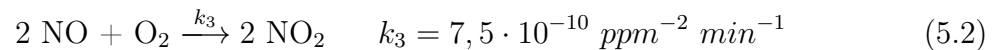


**Abbildung 5.2:** Umwandlung von Stickoxiden im Tunnel

Aufgrund der Abwesenheit von Sonnenlicht im Tunnel, kann eine Reduktion von  $\text{NO}_2$  (Reaktion 2.8) vernachlässigt werden.

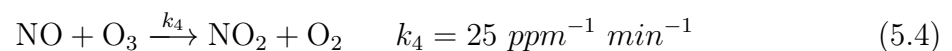
Wie bereits in den vorherigen Kapiteln gezeigt, kann eine Oxidation von  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  mit  $\text{O}_2$  oder  $\text{O}_3$  erfolgen. Im Folgenden soll nun mit Hilfe der Reaktionsrate die Geschwindigkeit dieser beiden Reaktionen verglichen werden.

Die Reaktion 5.2 zeigt nochmals die Oxidation mit Luftsauerstoff und der dazugehörigen Geschwindigkeitskonstante  $k_3$ . Hierbei handelt es sich um eine Reaktion dritter Ordnung (bezüglich  $\text{NO}$  zweiter Ordnung, bezüglich  $\text{O}_2$  erster Ordnung). Die Reaktionsrate lässt sich wie in Gleichung 5.3 gezeigt ermitteln. [8]



$$\frac{d[\text{NO}]}{d\tau} = -2 \cdot k_3 \cdot [\text{NO}]^2 \cdot [\text{O}_2] \quad (5.3)$$

Die Oxidation mit Ozon ist mit ihrer zugehörigen Geschwindigkeitskonstante  $k_4$  in Reaktion 5.4 beschrieben. Da es sich um eine Reaktion zweiter Ordnung (bimolekular) handelt, ergibt sich die Reaktionsrate nach Gleichung 5.5. [8]



$$\frac{d[\text{NO}]}{d\tau} = -k_4 \cdot [\text{NO}] \cdot [\text{O}_3] \quad (5.5)$$

Wird beispielhaft eine konstante  $\text{NO}$ -Konzentration von  $[\text{NO}] = 100 \text{ ppb}$  und eine gleichbleibende Konzentration von  $[\text{O}_2] = 0,21 \cdot 10^6 \text{ ppm}$  bzw.  $[\text{O}_3] = 0,03 \text{ ppm}$  angenommen, ergibt sich bei einer Oxidation mit Sauerstoff eine Reaktionsrate von  $-3,15 \cdot 10^{-6} \text{ ppm/min}$



und  $-75$  ppb/min bei einer Oxidation mit Ozon. Somit läuft die NO-Oxidation mit Ozon  $2,4 \cdot 10^4$  mal rascher ab als jene mit Sauerstoff. [8]

Folglich ergibt sich bei der Oxidation mit Ozon bei konstanten Ausgangskonzentrationen eine Oxidationsrate von 75% pro Minute. Das vorhandene  $O_3$  wird sehr rasch mit NO zu  $NO_2$  umgewandelt. Es ist anzunehmen, dass es zu einer vollständigen Umwandlung des  $O_3$  vor allem am Tunneleingang kommt. Wie gezeigt, kommt es aufgrund fehlender photochemischer Prozesse zu keiner erneuten Bildung von  $O_3$  im Tunnel. Aus diesen Gründen ( $O_2$  oxidiert langsam,  $O_3$  fehlt) wird für die Berechnung angenommen, dass es zu keiner Oxidation des NO im Tunnel kommt (Gleichung 5.6 und 5.7).

$$[NO_{2,Tunnel}] = [NO_{2,primär}] \quad (5.6)$$

$$[NO_{Tunnel}] = [NO_{primär}] \quad (5.7)$$

## 5.2 Berechnung der Stickoxidkonzentrationen im Plabutschtunnel

Die Berechnung der Stickoxidkonzentration soll nun durch ein stationäres, eindimensionales Rechenmodell erfolgen. Abbildung 5.3 zeigt die dazugehörige Diskretisierung des Berechnungsgebiets. Dazu wird der Tunnel auf seiner Länge  $L$  in  $N$  endliche Abschnitte aufgeteilt. Die Schrittweite  $\Delta x = l_n$  wird konstant mit 10 m festgelegt. Der Querschnitt des Tunnels  $A$  wird über den gesamten Tunnel als konstant angenommen.

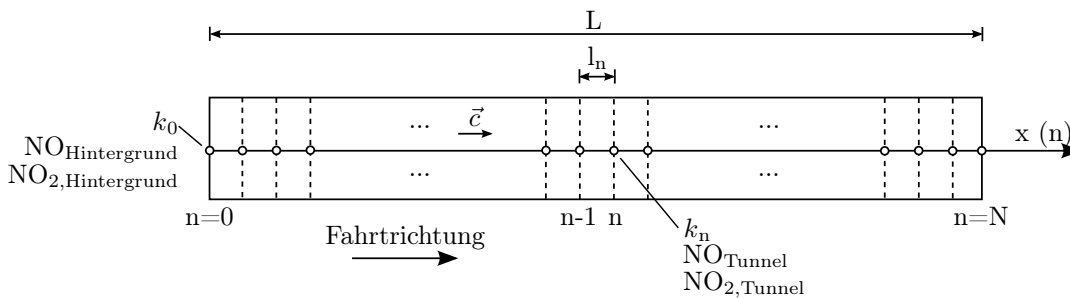


Abbildung 5.3: Eindimensionales Rechenmodell

Die einzelnen Stickoxidkonzentrationen  $k$  werden nun am jeweiligen Knotenpunkt berechnet. Durch Umformung der Gleichung 5.1 ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$k_n = k_{n-1} + \frac{l_n \cdot [(E F a_n \cdot AN Z_n)_{PKW} + (E F a_n \cdot AN Z_n)_{LKW}]}{\dot{V}} \quad (5.8)$$

$ANZ$  entspricht dabei der Anzahl von Fahrzeugen, welche sich im betrachteten Abschnitt, mit ihren zugehörigen Emissionsfaktor  $Efa$ , aufgeteilt in PKW und LKW, befinden. Der Volumenstrom  $\dot{V}$  ergibt sich aus dem Querschnitt  $A$  multipliziert mit der gemessenen und über den Querschnitt gemittelten Längsgeschwindigkeit der Luft  $\bar{c}$  (Gleichung 5.9). Da es sich beim Plabutschtunnel um einen Tunnel mit Richtungsverkehr handelt (siehe Kapitel 4.2), kann eine Umkehr der Strömungsgeschwindigkeit größtenteils ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wird auf eine vektorielle Schreibweise verzichtet.

$$\dot{V} = A \cdot \bar{c} \quad (5.9)$$

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit  $\bar{c}$  werden die im Plabutschtunnel fix installierte Längsströmungsmessgeräte benutzt. Da es immer wieder zu Ausfällen der einzelnen Längsströmungsmessgeräte kommen kann, wurden Daten von drei verschiedenen Messgeräten (A109, A131 und A139) herangezogen und daraus der Mittelwert gebildet (siehe auch Kapitel 4.4).

Alternativ kann die Längsgeschwindigkeit auch unter Berücksichtigung des Kolbeneffekts der Fahrzeuge berechnet werden. Eine solche Berechnung ist unter anderem in [34] beschrieben. Im Falle einer Zwangsbelüftung mittels Ventilatoren, muss diese noch gesondert berücksichtigt werden.

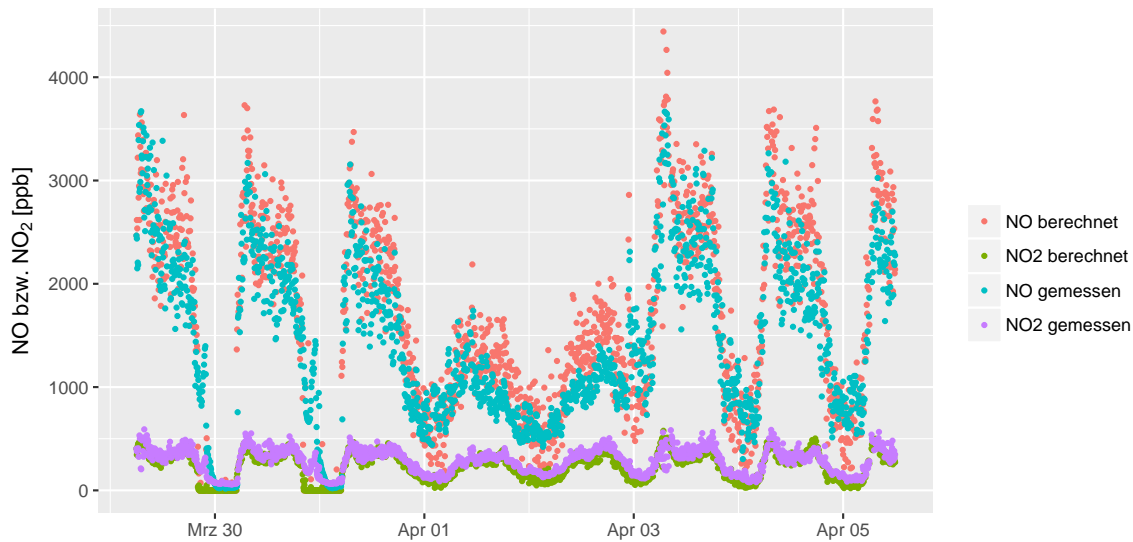
Die soeben vorgestellte Berechnung ermöglicht eine Ermittlung der Konzentration über die Tunnellänge, setzt aber eine hohe zeitliche Auflösung der Verkehrszählung (maximal einige Sekunden) voraus. Da die Verkehrsdaten für den Plabutschtunnel nur als 6-Minuten Summenwerte (siehe Kapitel 4.4) zu Verfügung stehen, wird eine alternative Berechnung durchgeführt. Diese Berechnung soll einen zeitlichen Verlauf der Konzentration an einem bestimmten Punkt im Tunnel ermöglichen.

Dazu wird über den Zeitschritt von sechs Minuten der Verkehr sowie der Luftvolumenstrom als konstant angenommen. Weiters wird für eine einfachere Berechnung die Konzentration außerhalb des Tunnels vernachlässigt sowie angenommen, dass (wie zuvor beschrieben) keine Umwandlungsprozesse stattfinden. Unter Berücksichtigung der angesprochenen Vereinfachungen kann die Gleichung 5.8 nun für die Konzentration  $k$  an der Stelle  $n = x$  zum Zeitpunkt  $t$  umgeformt werden (Gleichung 5.10).

$$k_{n=x,t} = \frac{[(Efa_t \cdot ANZ_t)_{\text{PKW}} + (Efa_t \cdot ANZ_t)_{\text{LKW}}]}{\dot{V}_t} \cdot \sum_{n=0}^x l_n \quad (5.10)$$

Die Berechnung wurde für die Pannenbucht AN 9 der Oströhre ( $x=5.270$  m) durchgeführt. Als Emissionsfaktoren wurden die Daten aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren HBEFA 3.3 mit den Fahrmustern 80 km/h bzw. 100 km/h herangezogen (Tabelle

5.1). Die Verkehrszahlen wurden aus der Verkehrszählschleife A121 im Plabutschtunnel entnommen (siehe auch Kapitel 4.4). Abbildung 5.4 zeigt nun beispielsweise die berechneten NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen für den Zeitraum vom 29.3.2017 bis 5.4.2017 mit dem Fahrmuster 80 km/h. Zusätzlich wurden die mittels CLD gemessenen Konzentrationen mit angegeben.



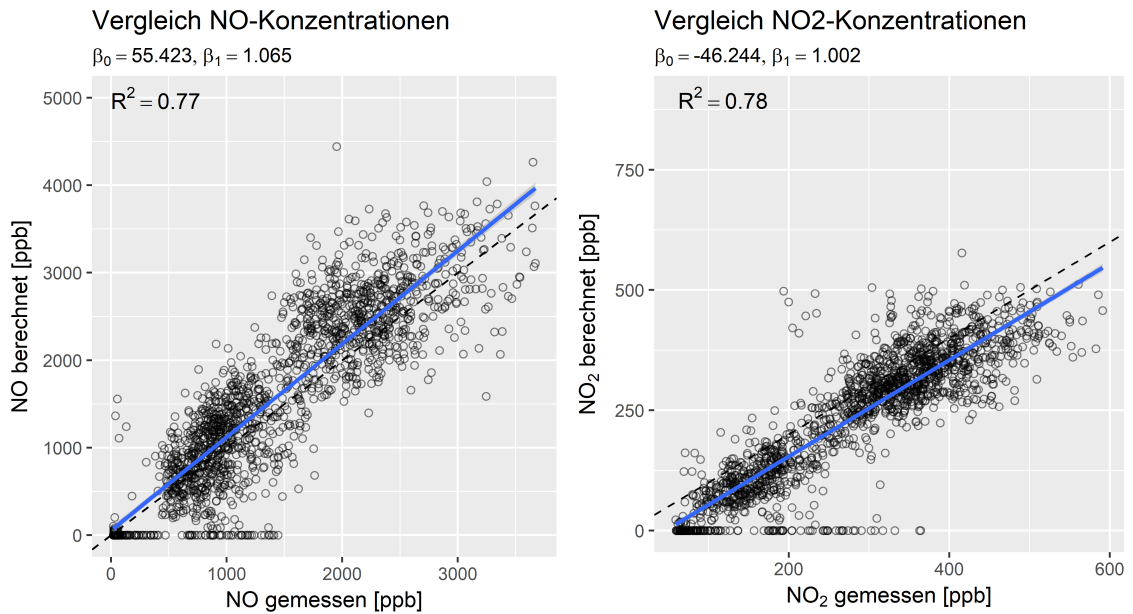
**Abbildung 5.4:** Verlauf der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß HBEFA 3.3 80 km/h.

**Tabelle 5.1:** Aufstellung der für die Berechnung verwendeten Emissionsfaktoren (EFa) in [g/km]

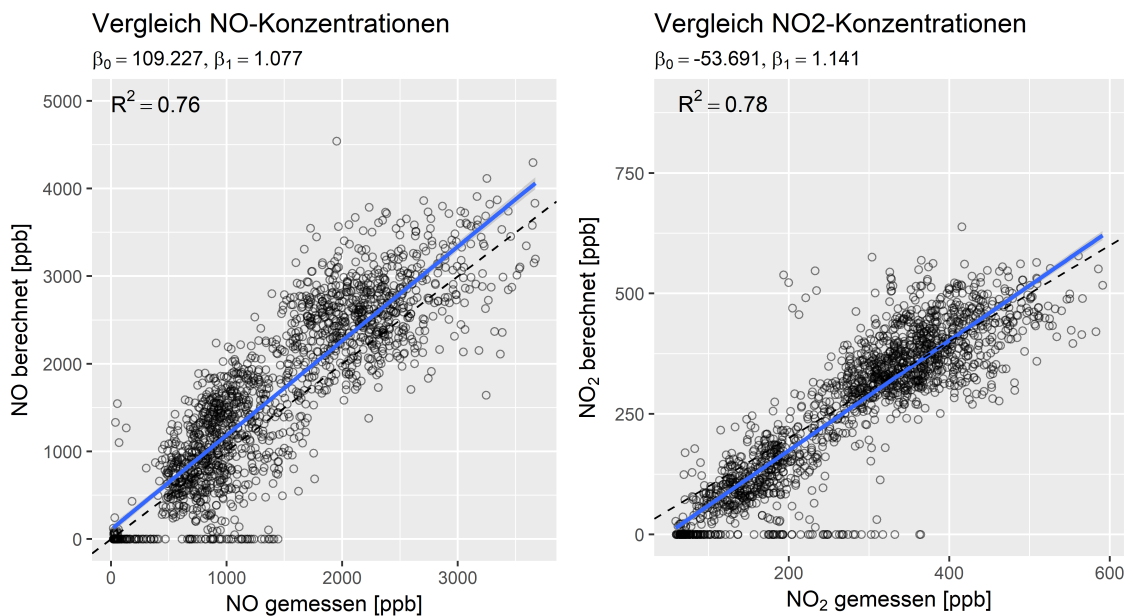
	HBEFA 3.3 80 km/h*	HBEFA 3.3 100 km/h*	Messung 2013
PKW NO	0,213	0,257	0,20
PKW NO <sub>2</sub>	0,095	0,117	0,08
LKW NO	1,888	1,816	3,03
LKW NO <sub>2</sub>	0,221	0,212	0,28

\* A, flüssig, Steigung 0%, Bezugsjahr 2015

Wie zu sehen, stimmen die Verläufe der berechneten und der gemessenen Konzentrationen größtenteils überein. Die lineare Regressionsanalyse ergibt ein Bestimmtheitsmaß beim NO von  $R^2=0,77$  und beim NO<sub>2</sub> von  $R^2=0,78$  für den Fahrmuster 80 km/h (Abbildung 5.5) bzw.  $R^2=0,76$  für NO und  $R^2=0,78$  für NO<sub>2</sub> für den Fahrmuster 100 km/h (Abbildung 5.6).

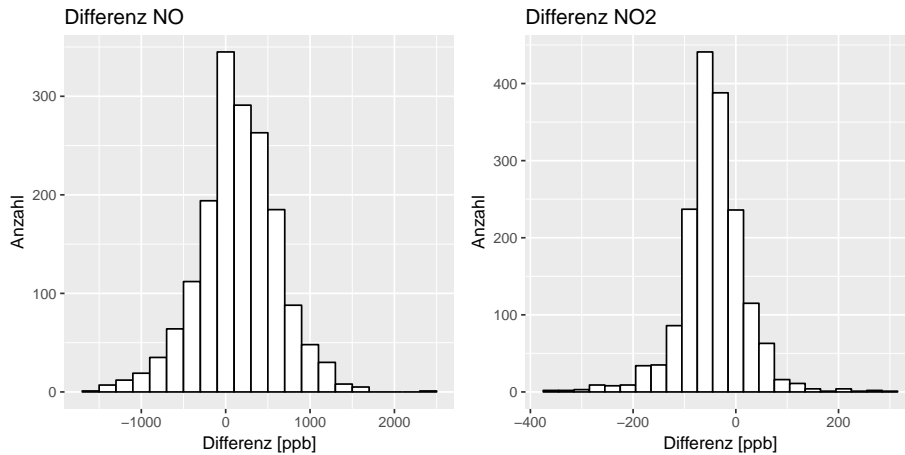


**Abbildung 5.5:** Vergleich der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß HBEFA 3.3 80 km/h. Die strichlierte Linie zeigt die 1. Mediane (45°).

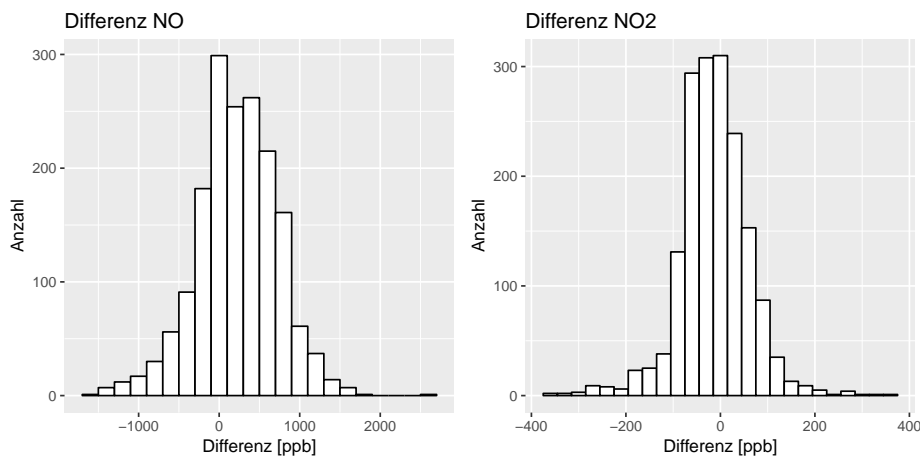


**Abbildung 5.6:** Vergleich der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß HBEFA 3.3 100 km/h. Die strichlierte Linie zeigt die 1. Mediane (45°).

Im Falle der NO-Berechnungen kommt es jeweils zu einer leichten Verhältnis-Abweichung. Bei der NO<sub>2</sub>-Berechnung mit dem Fahrmuster 80 km/h tritt ein recht konstanter Offset auf. Dies dürfte auf nicht passende Emissionsfaktoren zurückzuführen sein. Im Fahrmuster 100 km/h ist dieser Offset nicht mehr zu erkennen. Die Verteilungen der Fehler (Differenzen) können in allen Fällen als nahezu normalverteilt angesehen werden (Abbildung 5.7 und 5.8), was auf eine gute Modellqualität schließen lässt.



**Abbildung 5.7:** Differenzen der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß HBEFA 3.3 80 km/h.



**Abbildung 5.8:** Differenzen der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß HBEFA 3.3 100 km/h.

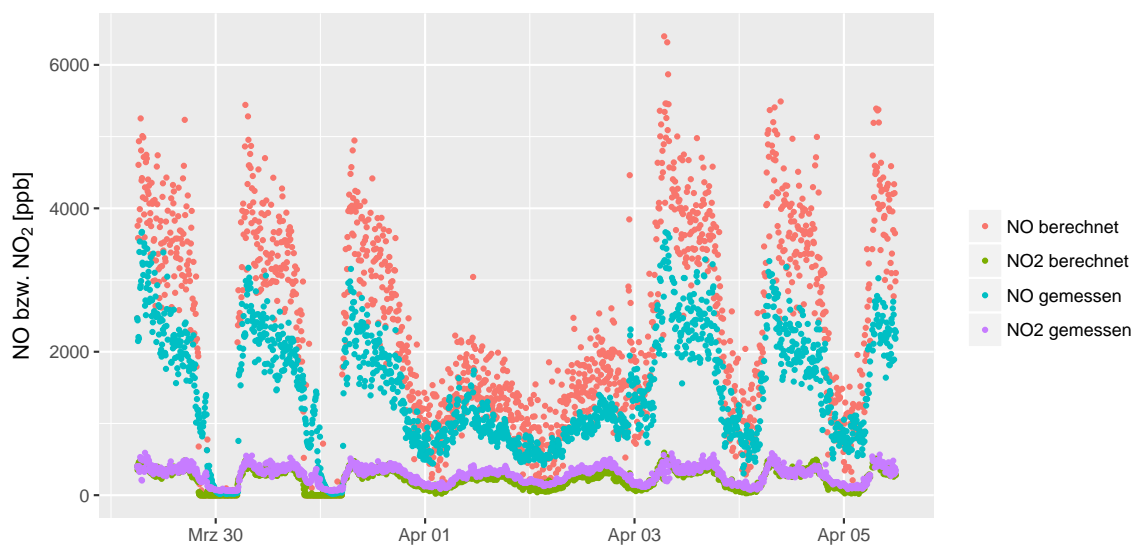
Es kann gesagt werden, dass die Berechnung mit den Emissionsfaktoren aus den beiden Fahrmustern (80 und 100 km/h) recht ähnliche Ergebnisse liefern. Eine geringfügig bessere Ergebnis konnte mit dem Fahrmuster 100 km/h erzielt werden.

Diese Analyse zeigt, dass bereits dieses einfache Berechnungsmodell brauchbare Werte für eine Abschätzung der Stickoxidkonzentrationen in einem Straßentunnel liefert. Es sei nochmals angemerkt, dass für die Berechnung lediglich das Verkehrsaufkommen und die Strömungsgeschwindigkeit (bzw. der Luftvolumenstrom) benötigt wird.

Eine weitere Berechnung wurde durch Variation der Emissionsfaktoren durchgeführt. Dabei wurden Emissionsfaktoren verwendet, die im Rahmen von Messung im Plabutschunnel im Jahr 2013 ermittelt wurden (Tabelle 5.1) [61].

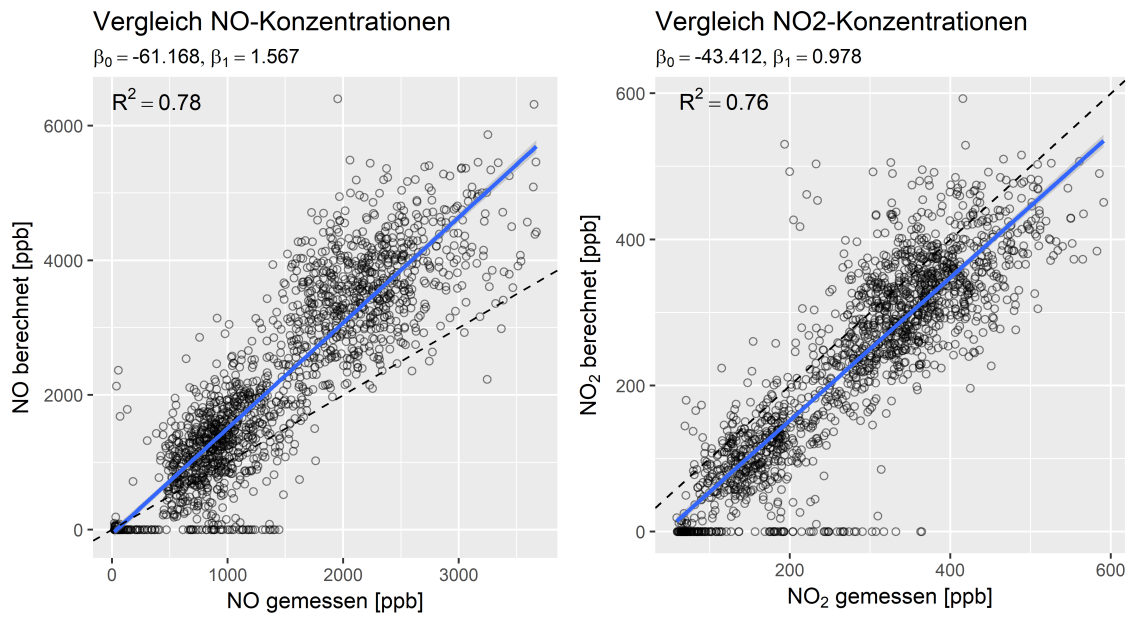
In Abbildung 5.9 sind nun die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Wie zu sehen, ist der Verlauf zwar ähnlich dem der gemessenen Werte, jedoch kommt es zu einer Überschätzung der berechneten NO-Konzentrationen. Dies ist noch deutlicher in Abbildung 5.10 zu erkennen. Wie bei den Berechnungen mit den Emissionsfaktoren gemäß HBEFA kommt es zu einer Abweichung im Verhältnis (NO) und in der Lage (NO<sub>2</sub>), die hier jedoch stärker ausgeprägt sind. Auch das Histogramm der Differenzen (Abbildung 5.11) zeigt diese Abweichungen. Zusätzlich muss der Verlauf der NO-Differenzen als nicht mehr normal verteilt angesehen werden.

Demzufolge kann gesagt werden, dass die Berechnungen mittels Emissionsfaktoren gemäß HBEFA eine bessere Übereinstimmung liefern, als jene Berechnung mit den Emissionsfaktoren aus der Messung im Jahr 2013.

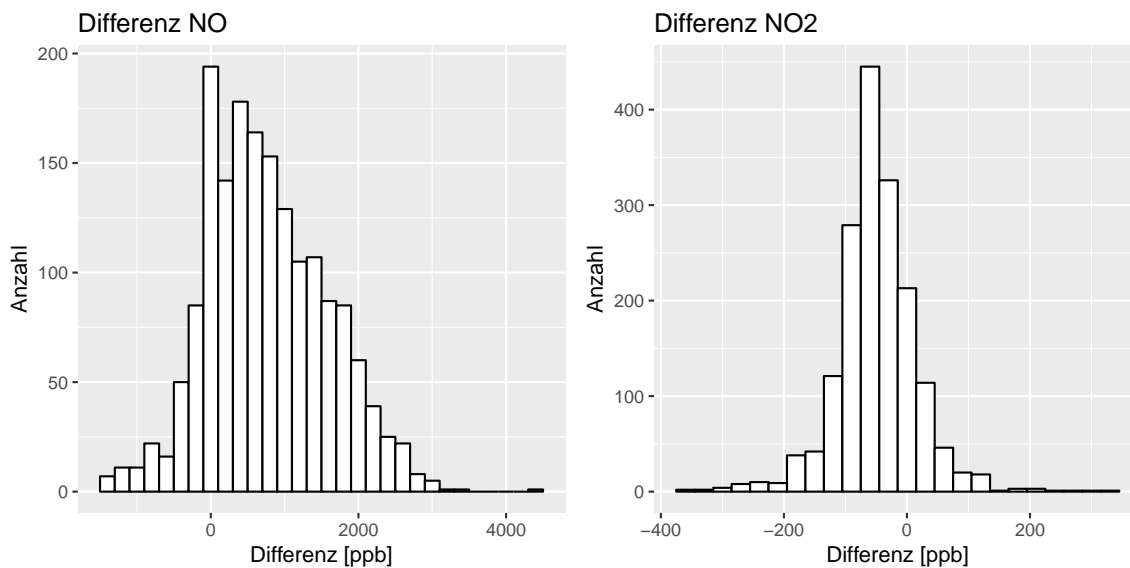


**Abbildung 5.9:** Verlauf der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß Messung 2013 [61].

## 5.2 Berechnung der Stickoxidkonzentrationen im Plabutschtunnel



**Abbildung 5.10:** Vergleich der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß Messung 2013 [61]. Die strichlierte Linie zeigt die 1. Mediane (45°).



**Abbildung 5.11:** Differenzen der berechneten bzw. gemessenen NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Emissionsfaktoren gemäß Messung 2013 [61].

### 5.3 Berechnung von Emissionsfaktoren

Wie in Kapitel 4.5 zu sehen, weisen die NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen einen starken Zusammenhang mit dem Verkehrsaufkommen auf. Dieser Umstand soll im Folgenden genutzt werden, um die so genannten Emissionsfaktoren *EFa* zu ermitteln. Die Vorgehensweise zur Berechnung der Emissionsfaktoren wurde der Dissertation von *Hinterhofer* [31] entnommen. Die Berechnung der Immissionskonzentrationen  $k_i$  erfolgte aus den Differenzen zwei räumlich getrennten Messstellen, um so in weiterer Folge die Emissionsmengen zu ermitteln.

In dieser Arbeit wurde nun versucht, dieses Verfahren mit Konzentrationen aus nur einer Messstelle anzuwenden. Dazu wurde für die Ermittlung der Emissionsmengen  $EM$  [g/km] die Hintergrundkonzentration an NO bzw. an NO<sub>2</sub> vernachlässigt. Als Immissionskonzentrationen  $k_i$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] konnten somit die gemessenen Konzentrationen genutzt werden. Die Messstrecke  $l$  [m] entspricht der Entfernung zum Tunneleingang, also 5.270 m. Der Volumenstrom  $\dot{V}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] wird mittels des bekannten Tunnelquerschnitts ( $A=46,7 \text{ m}^2$ ) und der Längsgeschwindigkeit  $c$  im Tunnel, welche von der Tunnelleittechnik stammt, errechnet. Gleichung 5.11 zeigt den mathematischen Zusammenhang zu Berechnung der Emissionsmengen.

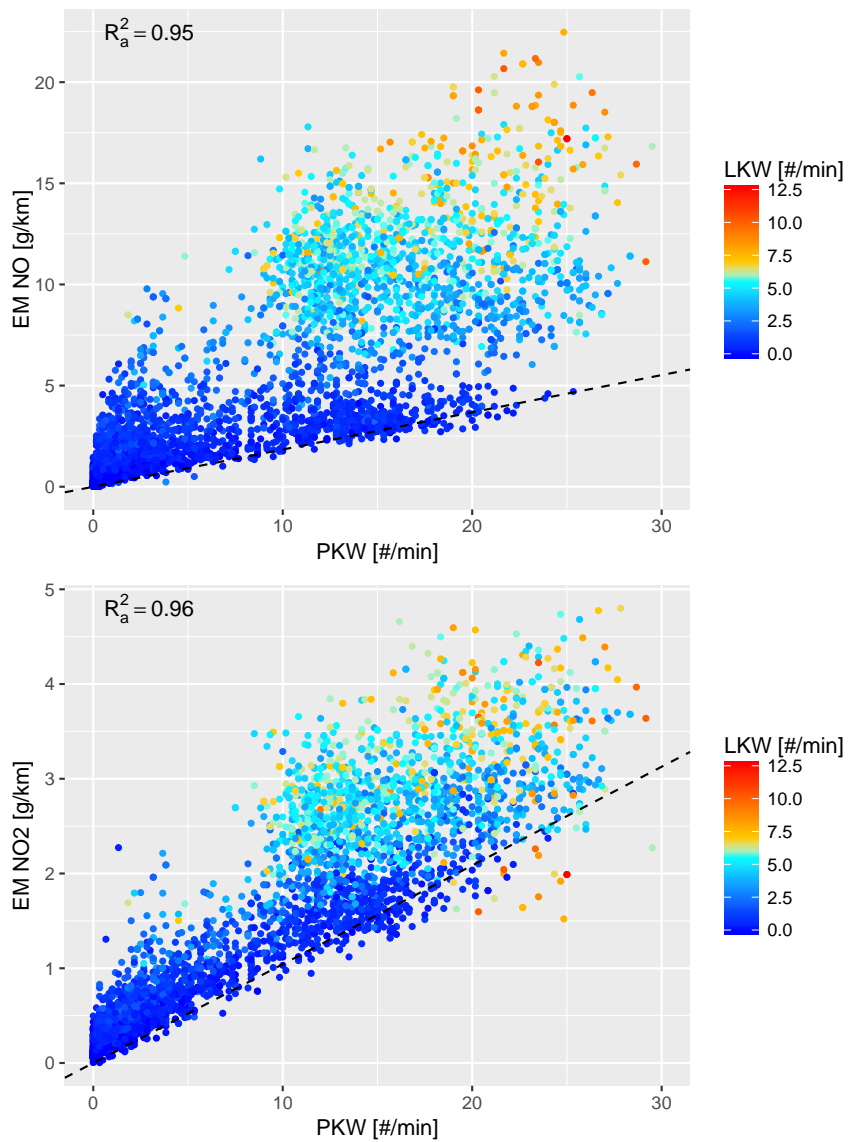
$$EM = \frac{k_i \cdot \dot{V} \cdot 60s}{10^6 \cdot l} \quad (5.11)$$

Um nun auf die Emissionsfaktoren zu gelangen, wurden die Emissionsmengen  $EM$  mit dem Verkehrsaufkommen verglichen. Dies erfolgte mittels einer multiplen linearen Regression durch den Nullpunkt. Die Regressionskoeffizienten der Ausgleichsebene  $\beta_1$  und  $\beta_2$  entsprechen nun den Emissionsfaktoren (Gleichung 5.12).

$$EM = \beta_1 \cdot ANZ_{PKW} + \beta_2 \cdot ANZ_{LKW} \quad (5.12)$$

Die Berechnung der *EFa* wurde mit den Stickoxidkonzentrationen, die im Zeitraum vom 29.3.2017 bis 12.4.2017 im Plabutschunnel gemessen wurden, durchgeführt. Die multiple lineare Regression ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Wie zu sehen, kann von einer guten Übereinstimmung zwischen Emissionsmengen und Verkehrsaufkommen ausgegangen werden.





**Abbildung 5.12:** Berechnung der Emissionsfaktoren mittels multipler linearer Regression aus den Emissionsmengen

In Tabelle 5.2 sind die berechnete Emissionsfaktoren mit ihrem zugehörigen 95%-Konfidenzintervall angeführt. Als Vergleichsmöglichkeit wurden die Emissionsfaktoren aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA 3.3) mit angegeben.

**Tabelle 5.2:** Emissionsfaktoren für NO und NO<sub>2</sub> in [g/km]. Berechnete Werte mit ihrem 95% Konfidenzintervall.

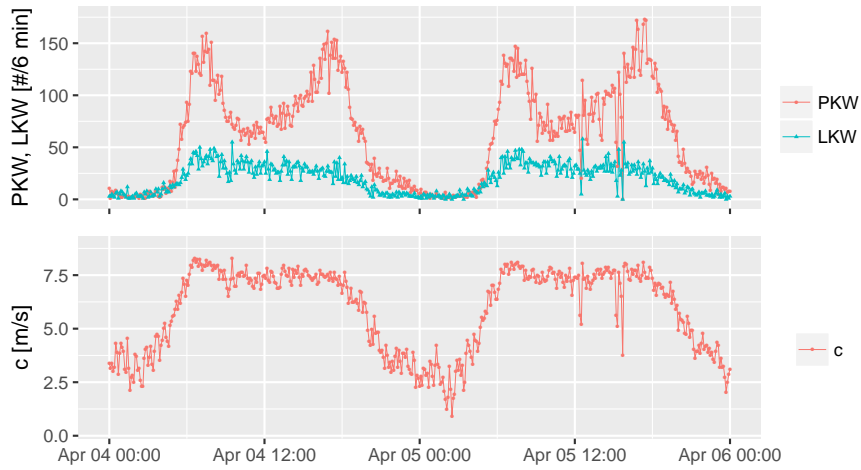
	Schadstoff	Berechnung	HBEFA 3.3 80 km/h	HBEFA 3.3 100 km/h
PKW	NO	0,184 ± 0,008	0,213	0,257
	NO <sub>2</sub>	0,104 ± 0,002	0,095	0,117
LKW	NO	1,623 ± 0,031	1,888	1,816
	NO <sub>2</sub>	0,221 ± 0,008	0,221	0,212

Wie zu sehen, gibt es vor allem bei den Emissionsfaktoren für NO<sub>2</sub> eine gute Übereinstimmung mit den Werten gemäß HBEFA 3.3 (Fahrmodus 80 und 100 km/h). Lediglich bei den Emissionsfaktor für NO kommt es anscheinend zu einem etwas zu geringen Wert.

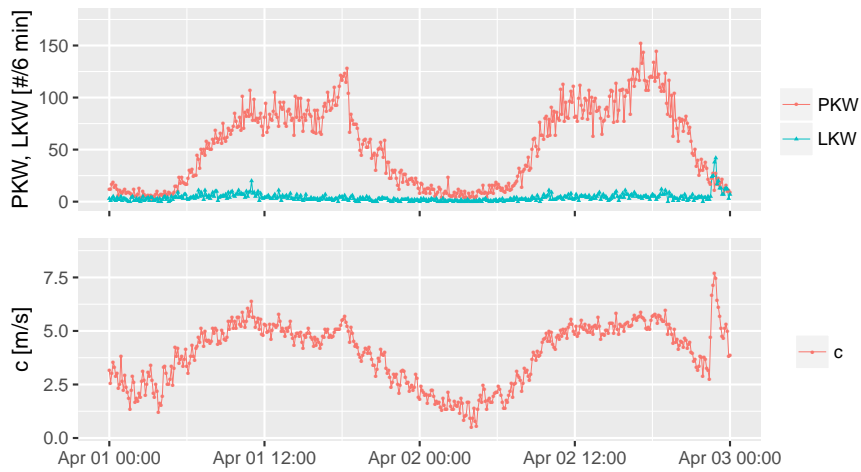
Da der Volumenstrom, und somit die Luftgeschwindigkeit im Tunnel, einen großen Einfluss auf die Emissionsfaktoren ausüben, sollen diese im Folgenden noch näher beleuchtet werden. Bei hohem Verkehrsaufkommen bleibt die Luftgeschwindigkeit, auch bei schwankendem Verkehr, relativ konstant. Die Luftsäule im Tunnel ist also zu träge und kann dem Verkehrsaufkommen nicht mehr folgen. [31]

Abbildung 5.13 zeigt einen Ausschnitt des Verlaufs des Verkehrsaufkommens (PKW und LKW) und der Luftgeschwindigkeit im Tunnel an zwei Tagen unter der Woche. Wie zu sehen, nimmt der PKW-Verkehr zur Mittagszeit hin ab. Die Luftgeschwindigkeit folgt jedoch nicht dem PKW-Verkehr und bleibt relativ konstant. Somit wird die Luftgeschwindigkeit hauptsächlich durch den LKW-Verkehr beeinflusst.

In Abbildung 5.14 ist der Verlauf am Wochenende (Sa und So) dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass der LKW-Verkehr einen kleineren Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit ausübt, und diese dem PKW-Verkehr besser folgt.



**Abbildung 5.13:** Beispielhafter Verlauf des Verkehrsaufkommens (oben) und der Luftgeschwindigkeit (unten) unter der Woche



**Abbildung 5.14:** Beispielhafter Verlauf des Verkehrsaufkommens (oben) und der Luftgeschwindigkeit (unten) am Wochenende

Aus diesem Grund werden für eine erneute Ermittlung der *EFa* für PKW nur Tage am Wochenende herangezogen. An diesen Tagen kommt es zu einem deutlich geringeren Verkehrsaufkommen an LKW und die Luftgeschwindigkeit weist ein dynamischeres Verhalten auf. Weiters werden nur Daten für die Berechnung verwendet, die ein PKW-Aufkommen von mindestens 20 Fahrzeugen pro Minute aufweisen. Dies soll ebenfalls zu einer Verbesserung der Auswertung führen.

Für die *EFa* der LKW werden Daten aus Wochentagen (Mo-Fr) verwendet. Um den Einfluss der PKW gering zu halten, werden nur Daten ausgewertet, die ein maximales PKW-Aufkommen von zehn Fahrzeugen pro Minute besitzen. Als untere Grenze für das LKW-Aufkommen wurden drei Fahrzeuge pro Minute festgelegt.

Die Ergebnisse dieser angepassten Auswertung sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Wie zu sehen kommt es nur zu leichten Änderungen der *EFa* für PKW (NO und NO<sub>2</sub>) und LKW NO<sub>2</sub>. Der Emissionsfaktor für LKW NO verringert sich hingegen erheblich.

**Tabelle 5.3:** Emissionsfaktoren für NO und NO<sub>2</sub> in [g/km]. Berechnete Werte mit ihrem 95% Konfidenzintervall. Berechnung der *EFa* für PKW: Daten Sa-So, >20 LKW/min. Berechnung der *EFa* für LKW: Daten Mo-Fr, >3 LKW/min, <10 PKW/min

	Schadstoff	Berechnung
PKW	NO	0,179 ± 0,020
	NO <sub>2</sub>	0,098 ± 0,012
LKW	NO	1,097 ± 0,397
	NO <sub>2</sub>	0,247 ± 0,092

Die angepasste Auswertung stellt jedoch keine Verbesserung bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren dar. Durch die Vorgabe des maximalen bzw. des minimalen Verkehrsaufkommens kommt es durch die relativ kleine Anzahl an Beobachtungswerten zu großen Unsicherheiten. Dies ist vor allem am LKW-*EFa* für NO gut zu erkennen. Hier könnte eine Erhöhung der Messwerte Abhilfe schaffen. Bei den PKW-*EFa* sollten aber prinzipiell immer die gesamten Daten ausgewertet werden, da davon auszugehen ist, dass am Wochenende eine etwas andere Flottenzusammensetzung als unter der Woche herrscht. Somit könnte dies einer Verfälschung der Emissionsfaktoren führen.

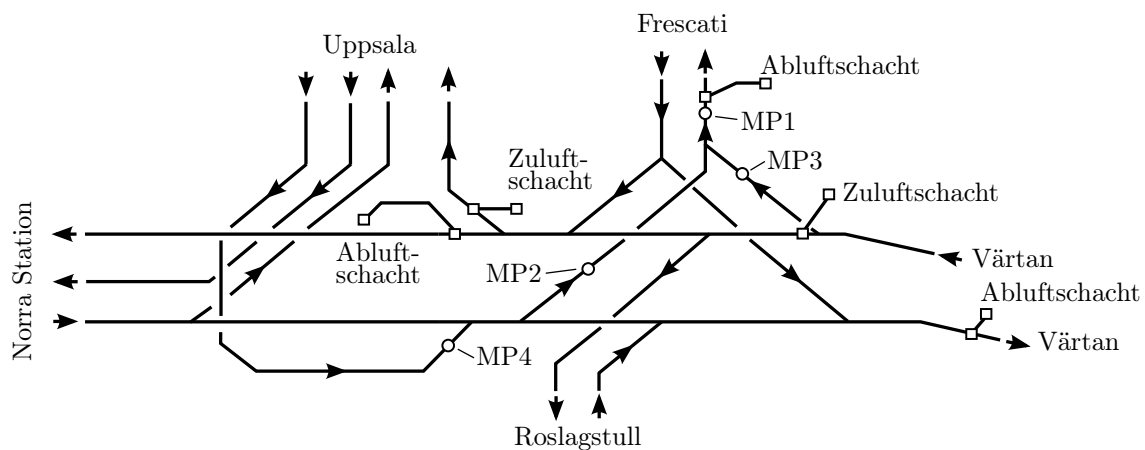
# 6 Stickoxidkonzentrationen im Norra Länken Tunnel

## 6.1 Allgemeines zum Tunnel

Der Norra Länken Tunnel (nördliches Verbindungsglied) ist ein Straßentunnel in Schweden und ein Teil des geplanten Autobahnringes um Stockholm. In Summe verlaufen derzeit ca. 13 km des Autobahnringes in Tunneln. [62]

Ausgeführt ist der Norra Länken Tunnel als zweiröhriger Tunnel mit Richtungsverkehr. Jede Fahrtrichtung besitzt zwei bis drei Fahrspuren. Es handelt sich um ein komplexes Tunnelsystem mit mehreren Ein- und Ausfahrtsrampen. Die Länge des Haupttunnels beträgt ca. 4.500 m. Neben den ca. 150 Jet-Fans sind für die Be- und Entlüftung des Tunnels zwei Zuluft- und drei Abluftstationen vorhanden. [21]

In Abbildung 6.1 ist das Tunnelsystem schematisch dargestellt. Ebenfalls sind die vier fix installierten Messpunkte (MP1 bis MP4), von welchen die verwendeten Daten im folgenden Kapitel stammen, eingetragen.



**Abbildung 6.1:** Schematische Darstellung des Norra Länken Tunnel (eigene Darstellung nach [21])

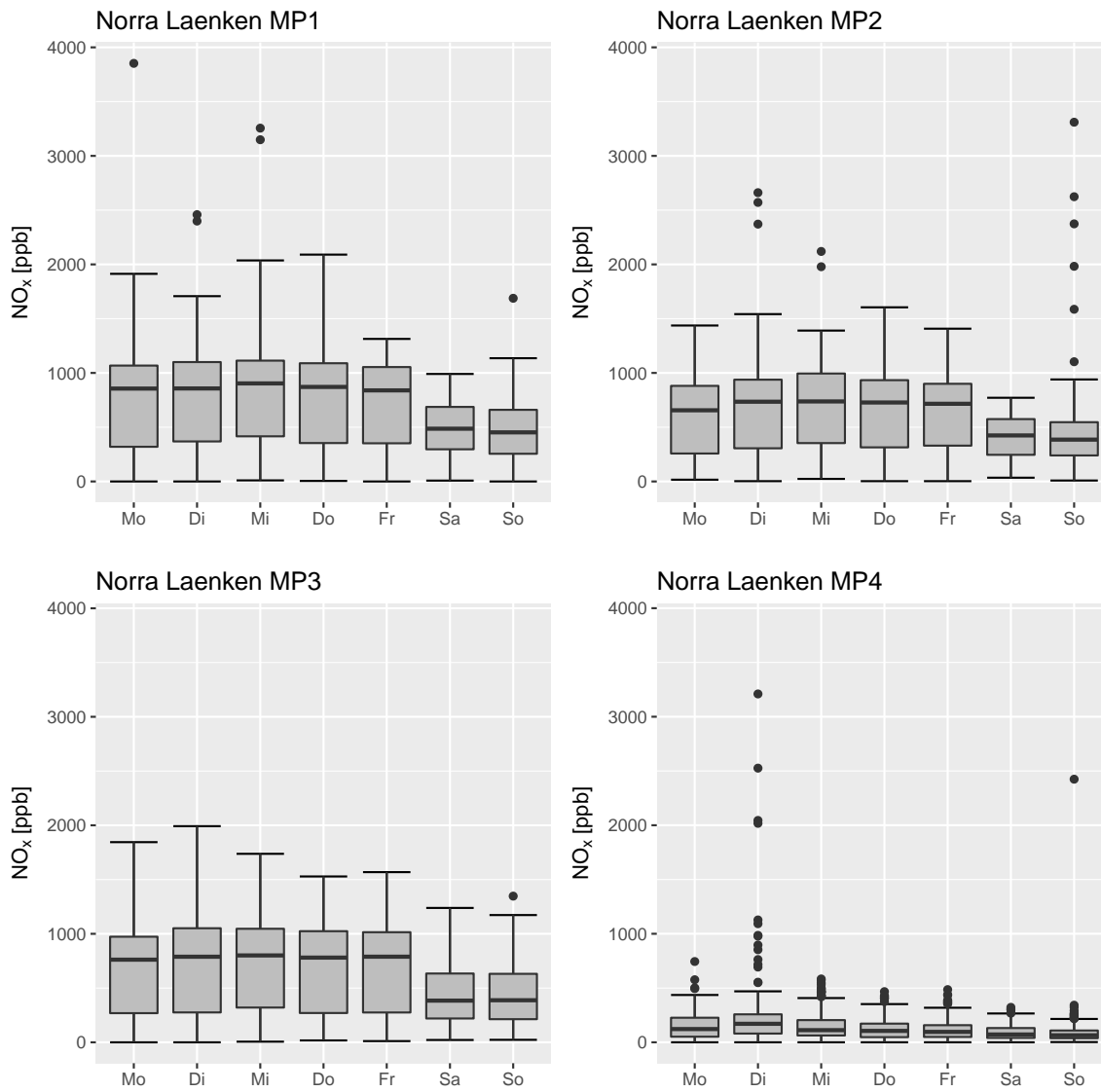
## 6.2 Analyse der Daten

In diesem Kapitel sollen Daten über Stickoxidkonzentrationen, sowie Verkehrsaufkommen und deren Zusammenhang analysiert werden. Die Daten stammen aus vier fix installierten Messpunkten im Tunnel (Abbildung 6.1) und wurden freundlicherweise durch die schwedische Transportverwaltung (Trafikverket) zur Verfügung gestellt.

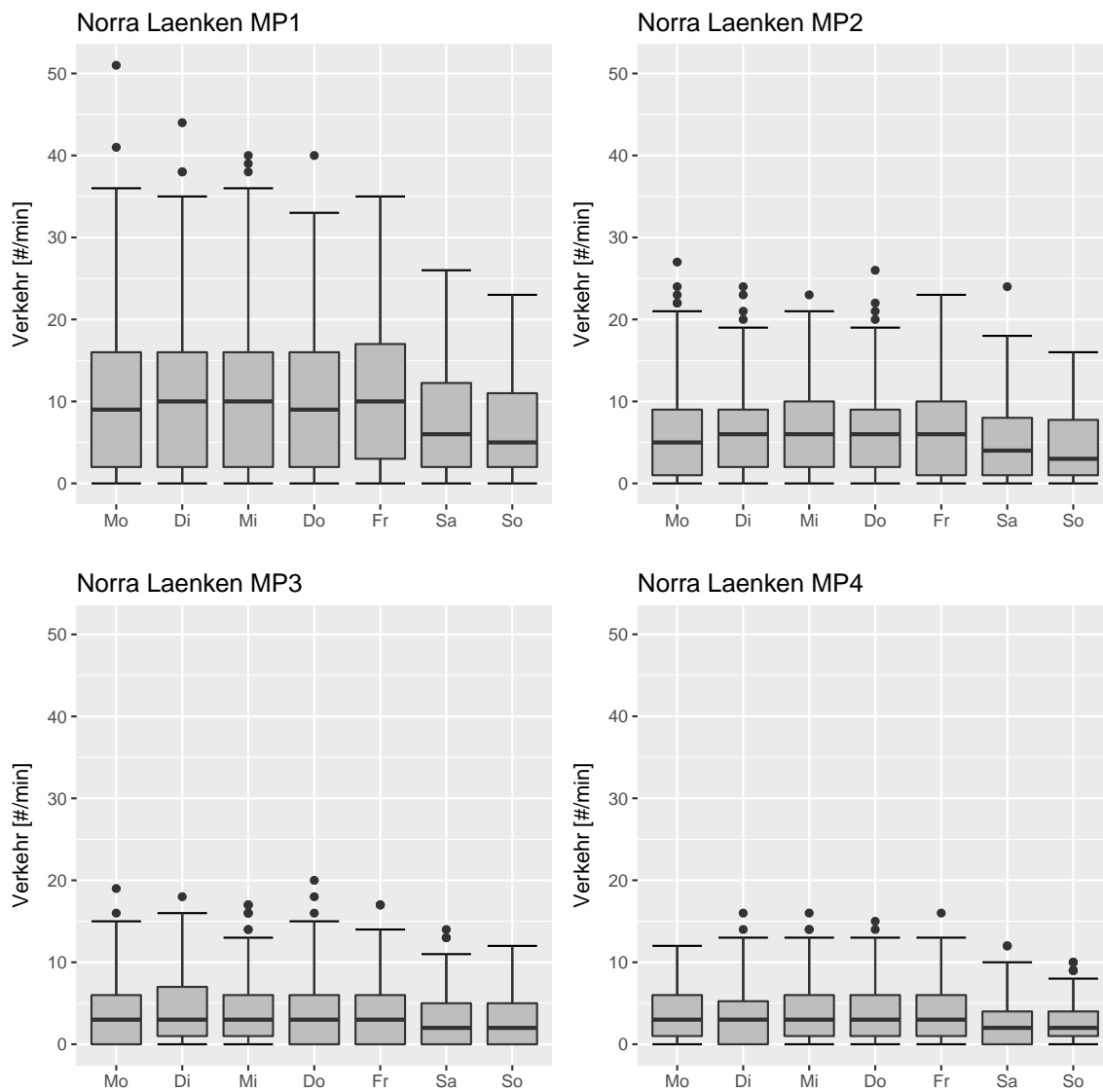
Die Messung der Stickoxidkonzentrationen (NO und NO<sub>2</sub>) erfolgt durch DOAS-Messgeräte der Fa. SICK AG, die bereits in Kapitel 4.3 vorgestellt wurden. Die Messwerte stammen aus dem Zeitraum vom 1.2.2017 - 31.3.2017 mit einer zeitlichen Auflösung von 36 Minuten.

Abbildung 6.2 zeigt Boxplots der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen an den vier Messpunkten im Norra Länken Tunnel. Eine Aufteilung erfolgt nach Wochentagen. Wie zu erwarten kommt es an den Wochenenden an allen Messpunkten zu geringeren Konzentrationen. Der Verlauf des gesamten Verkehrs (Summe von PKW und LKW) bleibt hingegen konstant (Abbildung 6.3). Der Rückgang der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen an den Wochenenden dürfte wohl mit einem geringeren Verkehrsaufkommen von LKW zusammenhängen. Anzumerken ist aber, dass in Schweden, im Gegensatz zu Österreich, kein generelles LKW-Fahrverbot an Wochenenden besteht.

Um den Zusammenhang zwischen NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und dem Verkehrsaufkommen zu untersuchen, wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt (Abbildung 6.4 bis 6.7).



**Abbildung 6.2:** NO<sub>x</sub>-Gehalt (Summe von NO und NO<sub>2</sub>) pro Wochentag während der Messperiode an den vier Messpunkten (MP1 bis MP4)



**Abbildung 6.3:** Gesamtes Verkehrsaufkommen (Summe von PKW und LKW) pro Wochentag während der Messperiode an den vier Messpunkten (MP1 bis MP4)



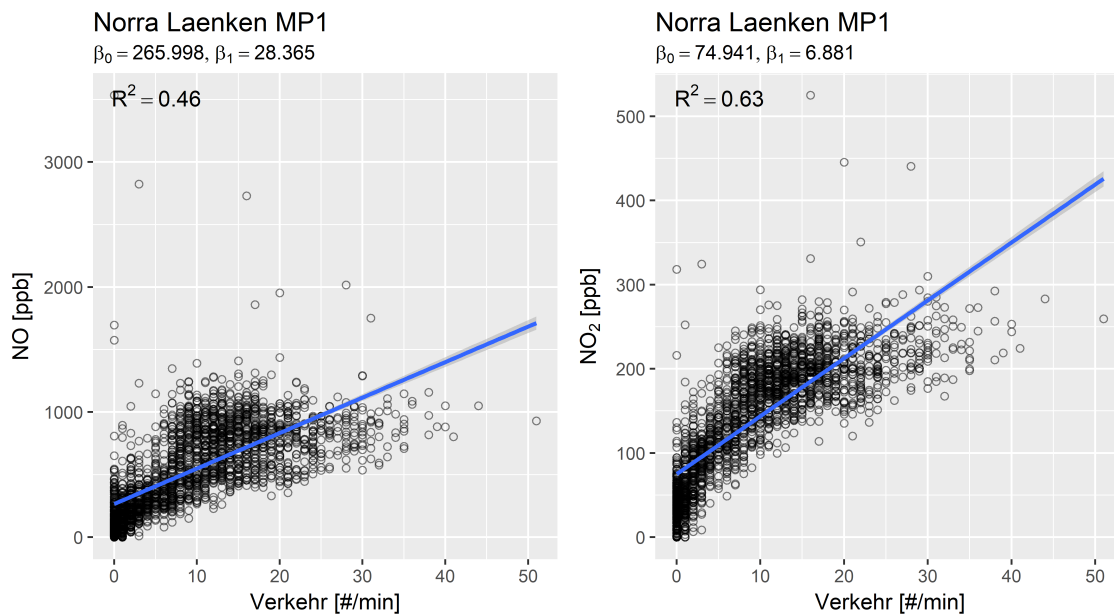


Abbildung 6.4: Zusammenhang zwischen NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und dem Verkehrsaufkommen (Summe von PKW und LKW), Messpunkt MP1

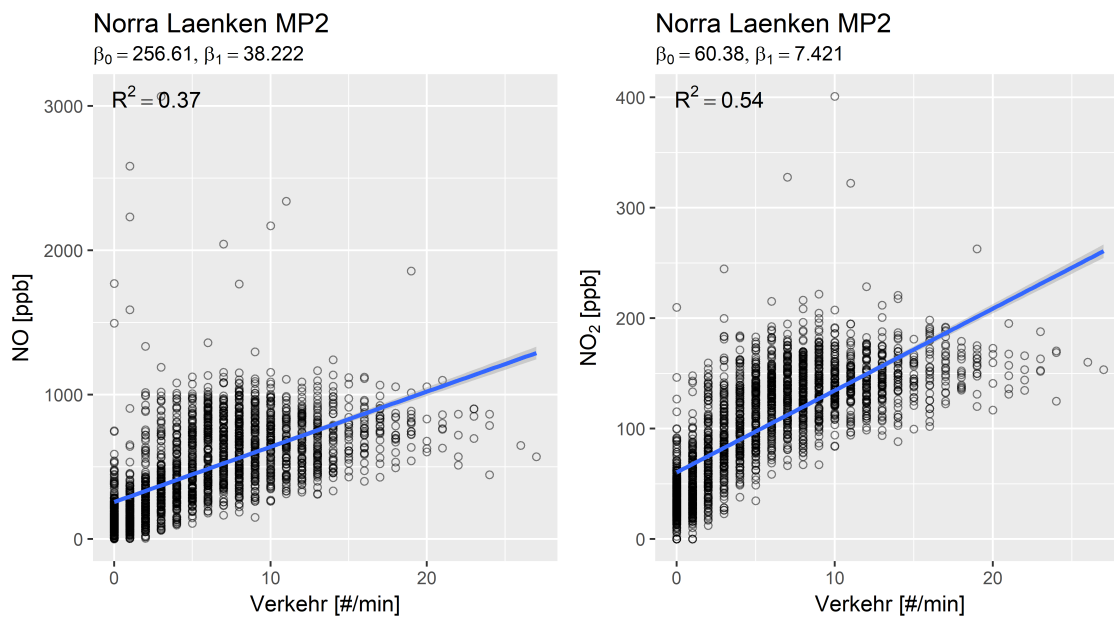
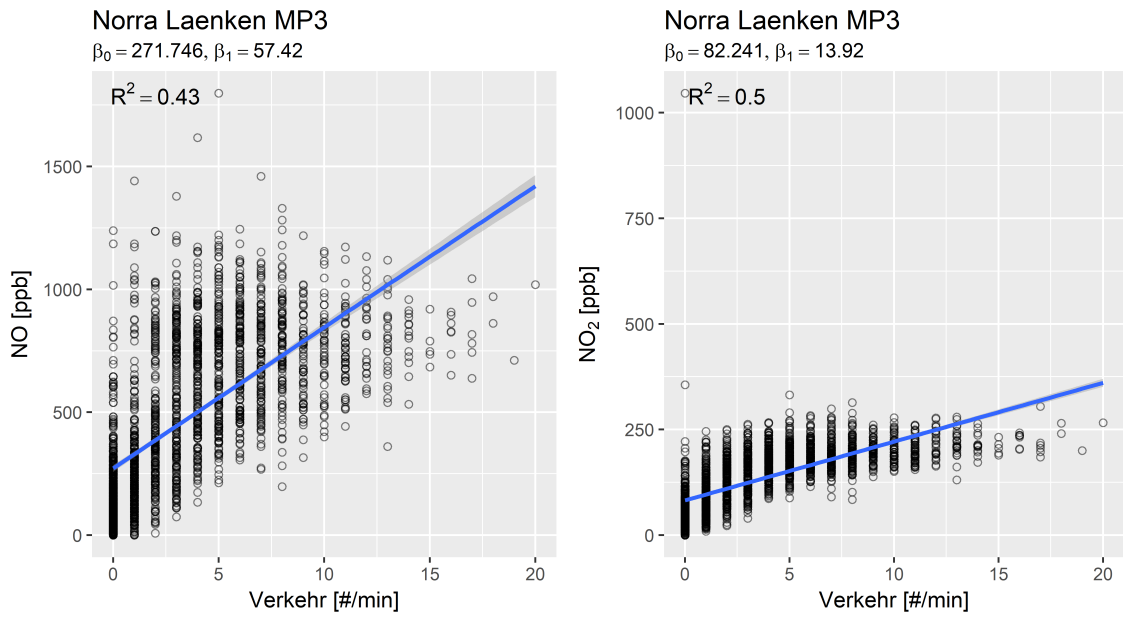
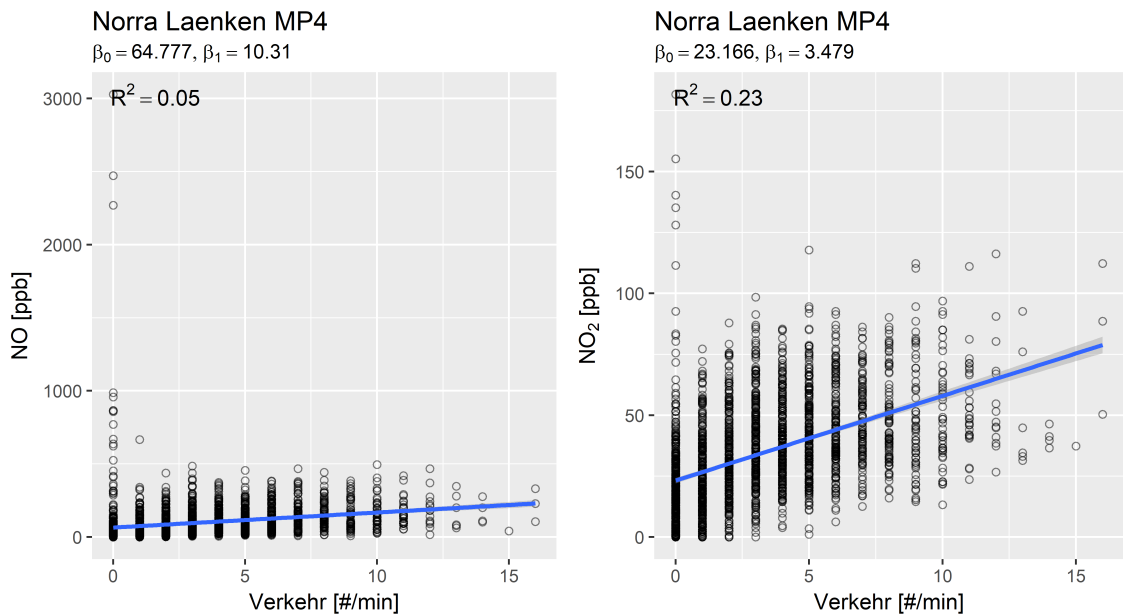


Abbildung 6.5: Zusammenhang zwischen NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und dem Verkehrsaufkommen (Summe von PKW und LKW), Messpunkt MP2

## 6 Stickoxidkonzentrationen im Norra Länken Tunnel



**Abbildung 6.6:** Zusammenhang zwischen NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und dem Verkehrsaufkommen (Summe von PKW und LKW), Messpunkt MP3

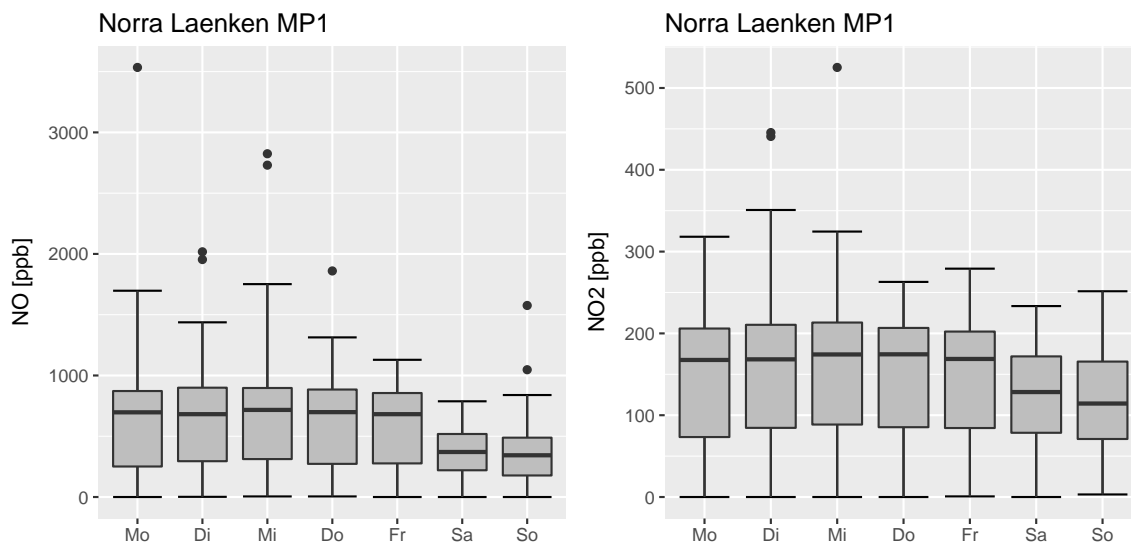


**Abbildung 6.7:** Zusammenhang zwischen NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und dem Verkehrsaufkommen (Summe von PKW und LKW), Messpunkt MP4

In allen Fällen wurden die Modellvoraussetzungen (siehe Kapitel 4.1) positiv getestet und eine statistische Signifikanz nachgewiesen ( $P \ll 0,05$ ). Das Bestimmtheitsmaß liefert mit  $R^2=0,05$  bis  $R^2=0,63$  aber nur eine beschränkte Aussagekraft. Dies ist vor allem auf den Umstand zurückzuführen, dass die Zahlen zum Verkehrsaufkommen lediglich als Summe von PKW und LKW zur Verfügung stehen. Weiters sei an dieser Stelle angemerkt, dass es ebenfalls keine Informationen über den Betriebszustand der Tunnellüftungsanlage gibt. Zu sehen ist aber, dass an allen vier Messpunkten die  $\text{NO}_2$ -Konzentration besser mit dem Verkehrsaufkommen korreliert als die  $\text{NO}$ -Konzentration.

Besonders der Messpunkt MP4 liefert bei null Verkehrsaufkommen einige hohe Konzentrationen. Diese Ausreißerpunkte finden sich auch in Abbildung 6.2, vor allem dienstags, wieder. Ein möglicher Grund hierfür könnte ein Verkehrsstau sein, kann aber aufgrund von mangelnder Kenntnis über den Verkehrsfluss nicht nachgewiesen werden.

In Abbildung 6.8 sind die Konzentrationen an  $\text{NO}$  bzw.  $\text{NO}_2$  über die Wochentage auszugswise am Messpunkt MP1 aufgetragen. Hier ist zu sehen, dass die  $\text{NO}_2$ -Konzentration relativ konstant bleibt, die  $\text{NO}$ -Konzentration hingegen am Wochenende leicht einbricht. Dies lässt, wie auch bereits vermutet, auf ein geringeres LKW-Aufkommen an Wochenenden und somit auf einen höheren Anteil an PKW schließen. Der Zusammenhang zwischen  $\text{NO}$ - bzw.  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen und dem Verkehrsaufkommen wurde bereits in Kapitel 4.5 näher erläutert.



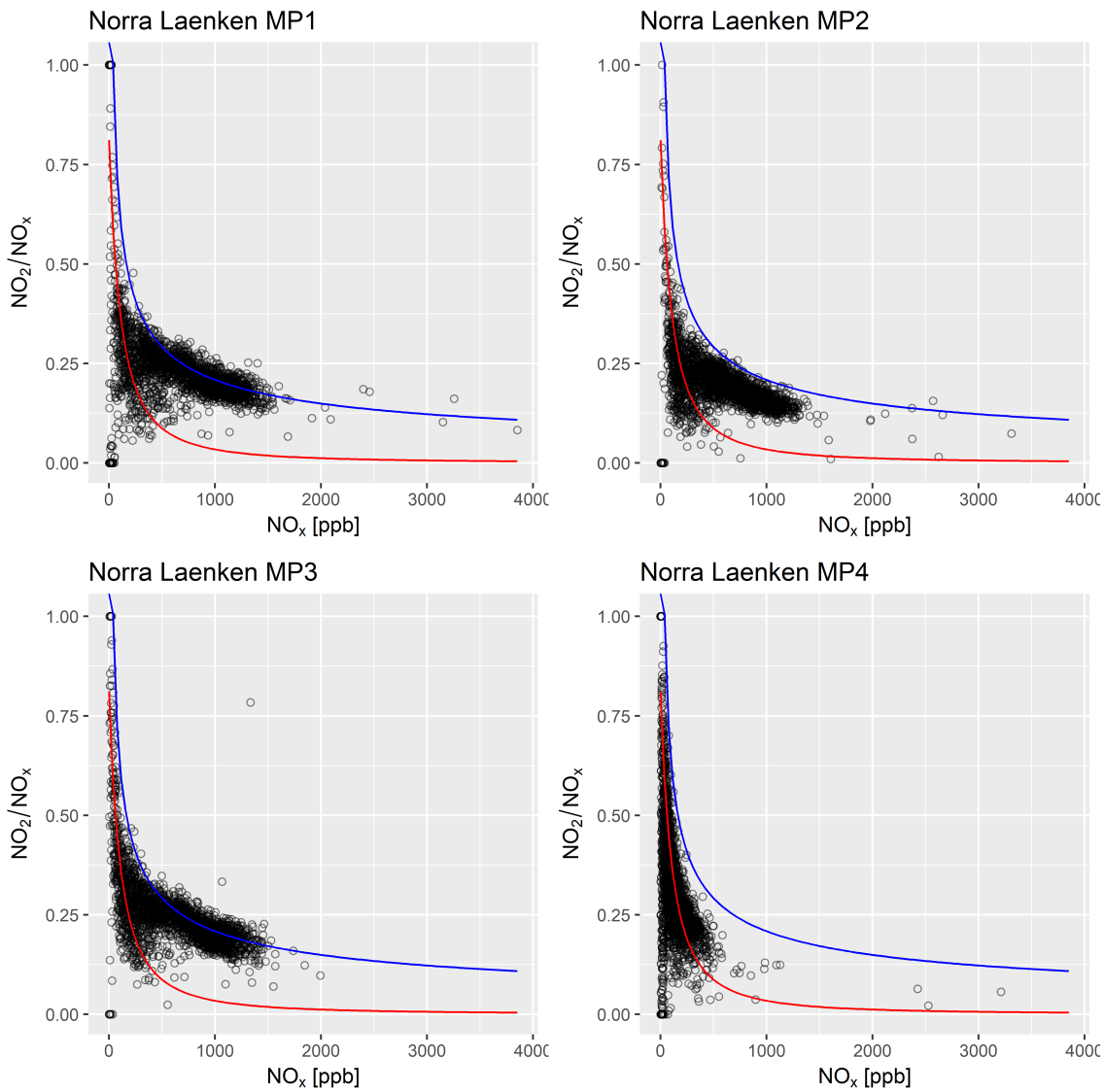
**Abbildung 6.8:** Verlauf der  $\text{NO}$ - und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen pro Wochentag, Messpunkt MP1

Abbildung 6.9 zeigt das Verhältnis von  $\text{NO}_2$  zu  $\text{NO}_x$  über die  $\text{NO}_x$ -Konzentration. Die rote Linie stellt die Berechnung gemäß *CLEM7* [16] dar und die blaue Linie

entspricht der neuen Berechnung, welche in Kapitel 4.5 vorgestellt wurde. Besonders an den Messpunkten MP1 und MP3, aber auch am Messpunkt MP2, lässt sich das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis mit Hilfe der neuen Berechnung besser abbilden. Lediglich am Messpunkt MP4 würde es zu einer Überschätzung des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses kommen.

Auffällig sind, im Vergleich zu den Messungen aus dem Plabutschunnel (Kapitel 4.5), die kleinen  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisse ( $<0,25$ ) bei niedrigen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen ( $<500$  ppb).

Wie zu sehen tritt eine Kombination von kleinem  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis und niedriger  $\text{NO}_x$ -Konzentration (Abbildung 6.10) hauptsächlich in den Nachtstunden auf. Dies dürfte der Fall sein, wenn der Hauptverursacher der Stickoxidkonzentrationen der Schwerverkehr ist. Wie bereits im Kapitel 2.5 beschrieben, haben LKW aufgrund ihrer Abgasnachbehandlung ein höheres  $\text{NO}/\text{NO}_x$ -Verhältnis als dieselbetriebene PKW.



**Abbildung 6.9:**  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis über die  $\text{NO}_x$ -Konzentration. Die rote Linie entspricht der Berechnung nach *CLEM7* [16] und die blaue Linie entspricht der Berechnung nach Gleichung 4.6

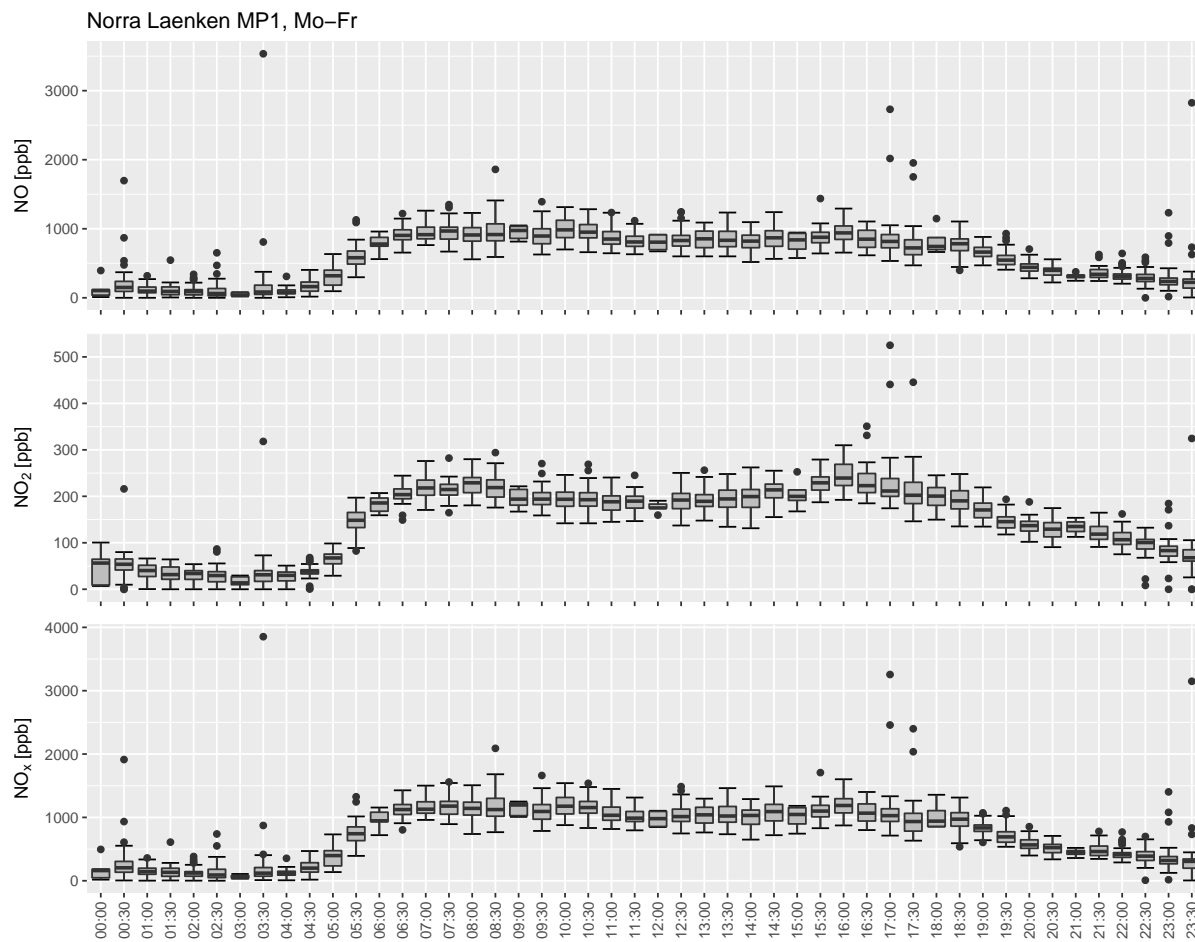
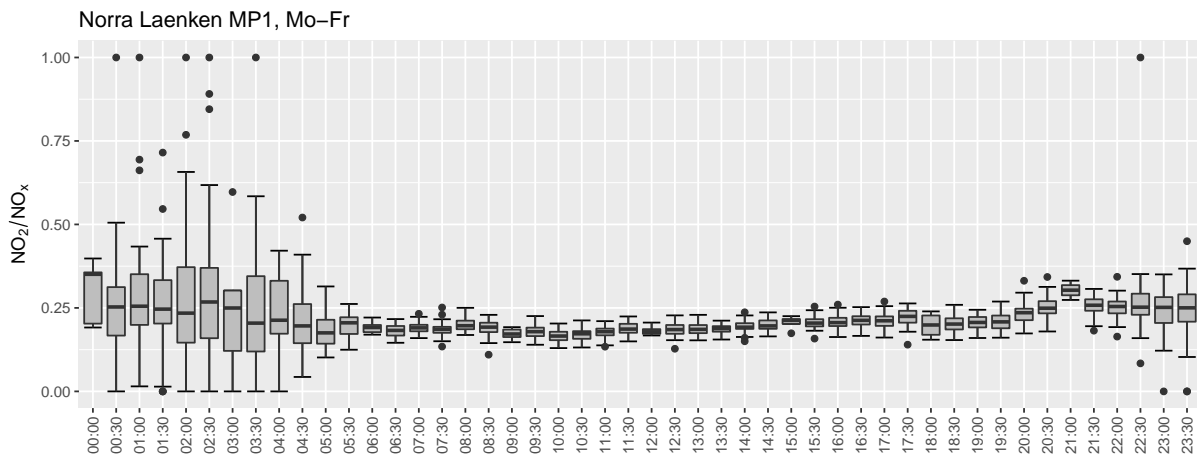
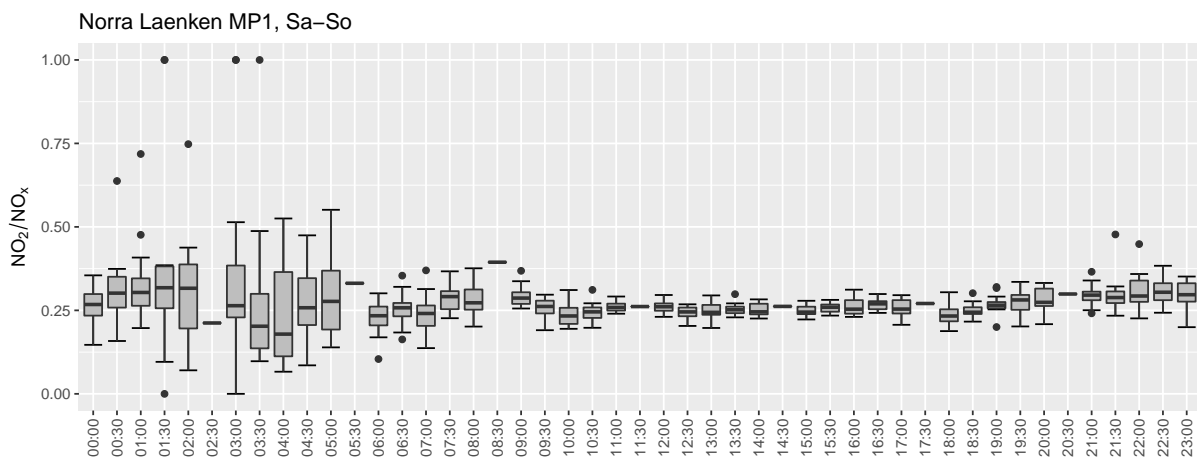


Abbildung 6.10: Verlauf der NO, NO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen über den Tag (wochen- tags), Messpunkt MP1

In Abbildung 6.11 ist der Verlauf des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses an Wochentagen und in Abbildung 6.12 an den Wochenenden dargestellt (Messpunkt MP1). Im Vergleich zu den Wochentagen, weist das Verhältnis an den Wochenenden, über den Tag einen etwas höheren Wert auf. Dies lässt vermuten, dass an Wochenenden der Anteil von dieselbetriebenen PKW geringer ist.



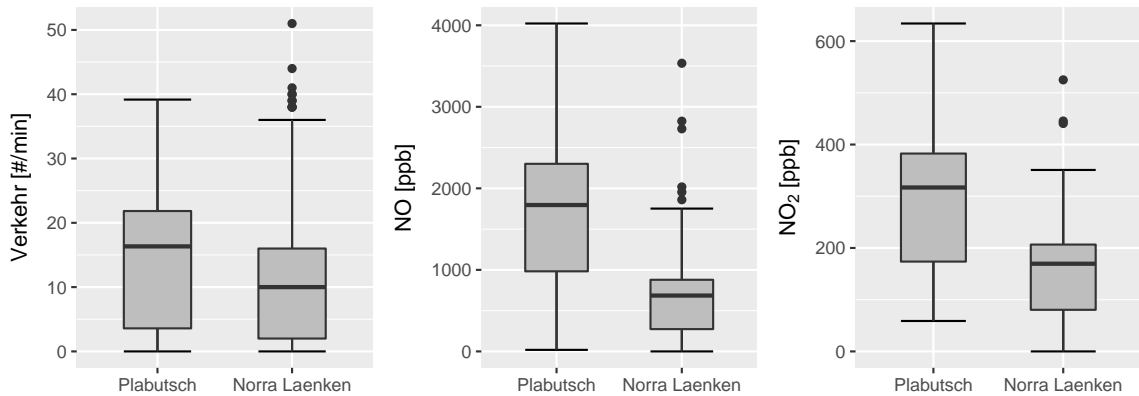
**Abbildung 6.11:** Verlauf des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses über den Tag (wochentags), Messpunkt MP1



**Abbildung 6.12:** Verlauf des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses über den Tag (Wochenende), Messpunkt MP1

In Abbildung 6.13 wurden beispielhaft die Daten an Wochentagen aus dem Plabutschunnel (Kapitel 4.5) und dem Messpunkt MP1 vom Norra Länken Tunnel gegenübergestellt. Wie zu sehen kommt es im Norra Länken Tunnel im Durchschnitt zu geringeren

Konzentrationen an NO (-62%) und NO<sub>2</sub> (-42%). Diese Differenzen kommen in erster Linie durch das verminderte Verkehrsaufkommen zustande. So gibt es unter der Woche etwa 39% weniger Verkehrsaufkommen als im Plabutschtunnel. Ein weiterer Grund für die deutlich niedrigeren NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen dürfte darin liegen, dass es durch die vielen Ein- und Ausfahrtsrampen zu einer zusätzlichen Belüftung und somit zu einer Verdünnung der Konzentrationen kommt.



**Abbildung 6.13:** Vergleich des gesamten Verkehrsaufkommens (PKW und LKW) und der NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentrationen zwischen den Daten aus dem Plabutschtunnel und dem Norra Länken Tunnel (am MP1) an Wochentagen (Mo-Fr)

### 6.3 Massenbilanz

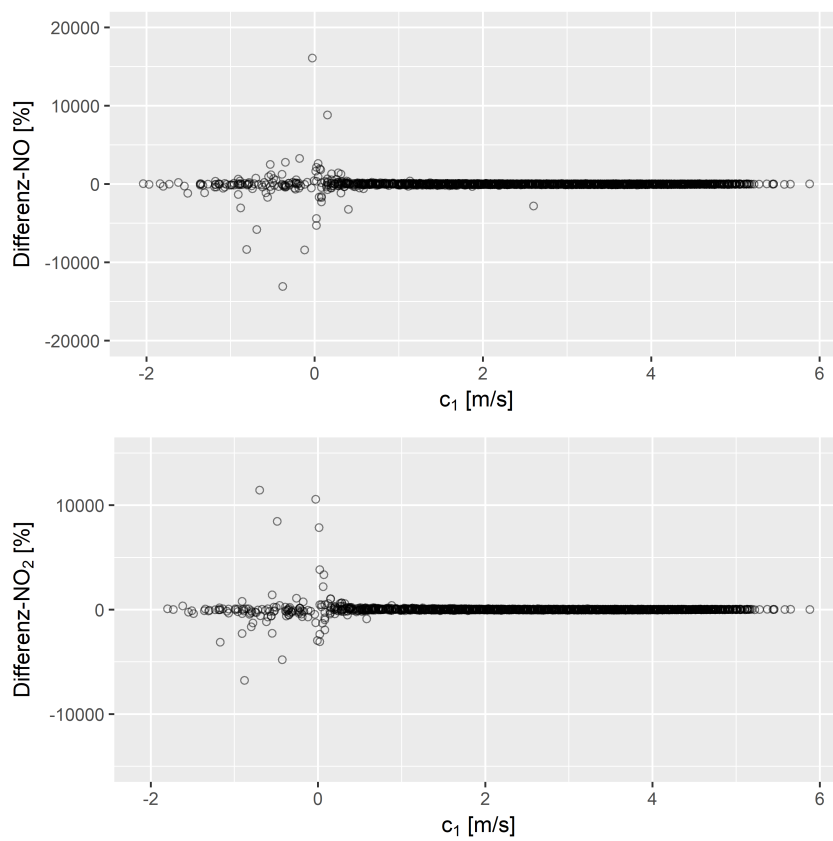
In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob sich die Schadstoffkonzentration in einem verzweigten Tunnel, mittels einer einfachen Massenbilanz, ermitteln lassen.

Dazu wurde, unter Annahme einer konstanten Dichte, eine Massenbilanz für die Messpunkte MP1, MP2 und MP3 aufgestellt (Gleichung 6.1).

$$-\dot{V}_1 \cdot k_1 + \dot{V}_2 \cdot k_2 + \dot{V}_3 \cdot k_3 = 0 \quad (6.1)$$

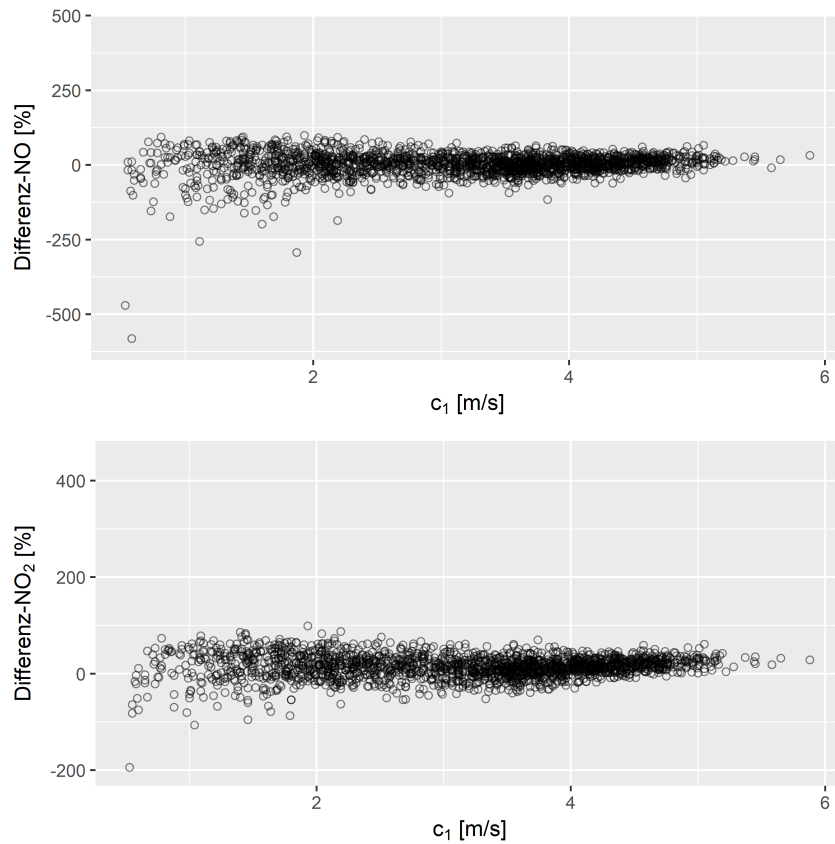
Die Berechnung wurde für jeden Zeitschritt durchgeführt. Naturgemäß hat der Volumenstrom, und somit die Luftgeschwindigkeit im Tunnel, einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Abbildung 6.14 zeigt die (relativen) Differenzen des ermittelten Produkts aus Volumenstrom und Konzentration  $\dot{V}_1 \cdot k_1$  im Vergleich zum Gemessenen. Auf der Abszisse wurde die Luftgeschwindigkeit am Messpunkt MP1 aufgetragen.





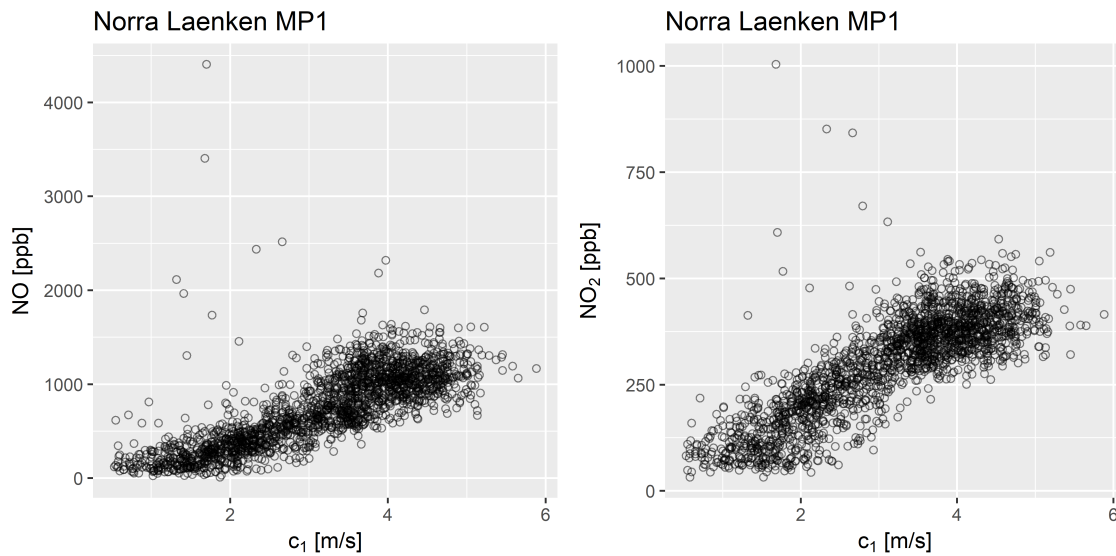
**Abbildung 6.14:** Relative Differenz (bezogen auf den MP1) des gemessenen und des aus der Massenbilanz errechneten Produkts von Volumenstrom und NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentration. Aufgetragen über die Luftgeschwindigkeit am MP1.

Wie zu sehen erreichen die Differenzen bei negativen Geschwindigkeiten sehr hohe Werte. Solch eine Umkehr der Strömungsrichtung wird durch die Massenbilanz nicht berücksichtigt. Aber auch kleine Strömungsgeschwindigkeiten von  $c < 0,5$  m/s führen zu sehr hohen Differenzen. Abbildung 6.15 zeigt nun die Differenzen, welche bei einer Strömungsgeschwindigkeit von  $c_1 > 0,5$  m/s berechnet wurden. Gut zu erkennen ist, dass je höher die Luftgeschwindigkeit ist, desto geringer sind die relativen Differenzen. Dies hat vor allem damit zu tun, dass mit steigender Luftgeschwindigkeit auch die Stickoxidkonzentration im Tunnel steigt (Abbildung 6.16). Durch die erhöhte Konzentration wird die relative Differenz kleiner.



**Abbildung 6.15:** Relative Differenz (bezogen auf den MP1) des gemessenen und des aus der Massenbilanz errechneten Produkts von Volumenstrom und NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentration. Aufgetragen über die Luftgeschwindigkeit am MP1. Nur Luftgeschwindigkeiten  $> 0,5$  m/s berücksichtigt.

Der Hauptgrund für die schlechte Übereinstimmung dürfte in der hohen zeitlichen Auflösung (36 min) der vorhandenen Daten liegen. Zwischen den Daten für den Messpunkt MP1 und den Messpunkten MP2 und MP3 liegt zwar eine Zeitdifferenz von elf Minuten vor, diese ist aber fix und kann nicht variiert werden. Die Entfernung zwischen den Messpunkten MP1 und MP2 beträgt ca. 850 m und zwischen MP1 und MP3 ca. 1250 m.



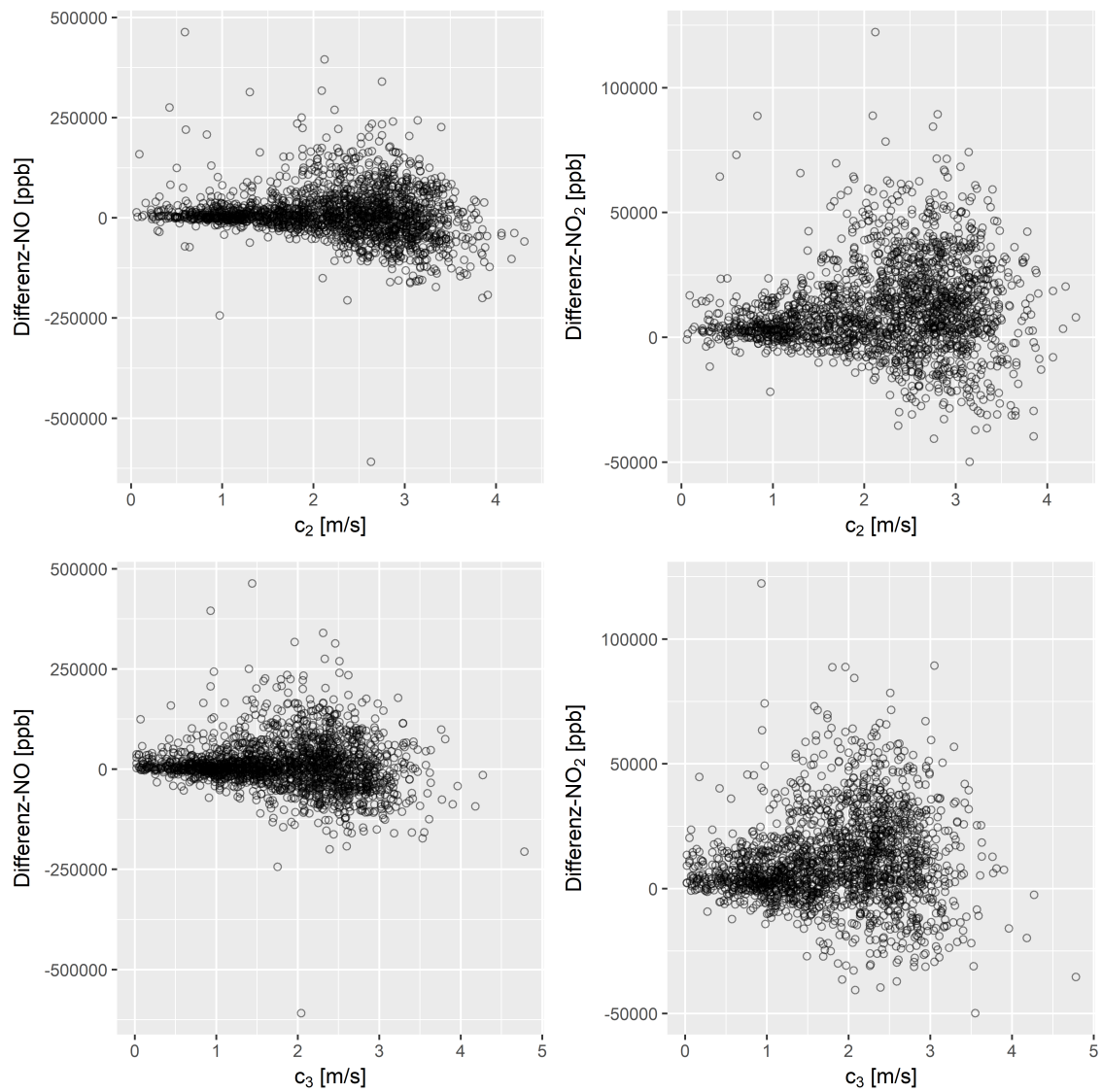
**Abbildung 6.16:** NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentration in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit am Messpunkt MP1

Bei einer Zeitdifferenz von elf Minuten müsste die Luftgeschwindigkeit demnach 1,3 m/s bzw. 1,9 m/s betragen.

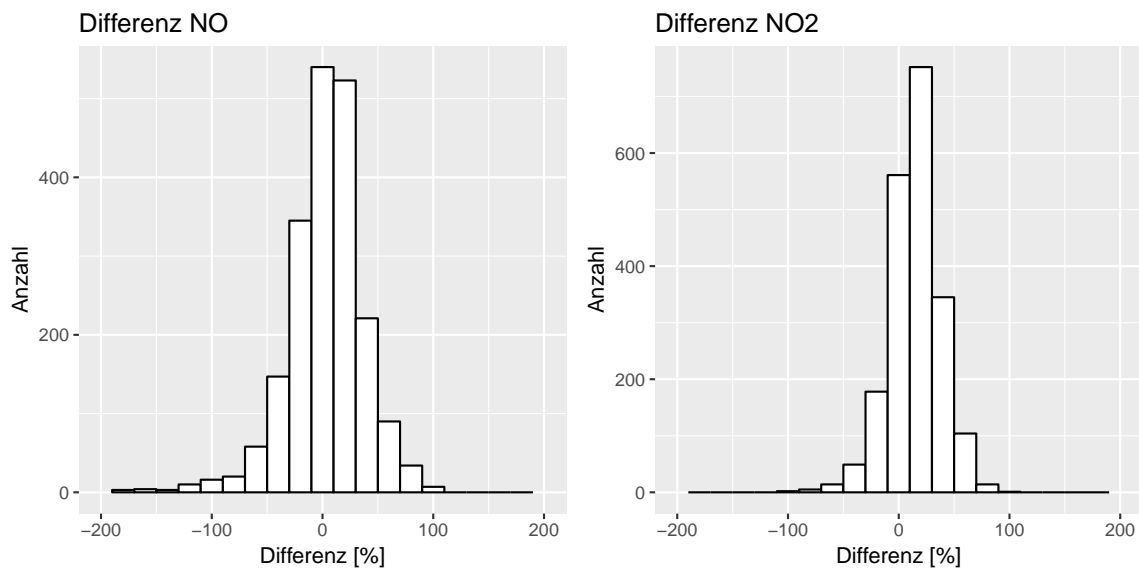
In Abbildung 6.17 sind nun die absoluten Differenzen über die Luftgeschwindigkeiten am Messpunkt MP2 und MP3 aufgetragen. Wie zu sehen, nehmen die absoluten Differenzen mit der Luftgeschwindigkeit zu. Es kann nicht festgestellt werden, dass die Berechnung bei »optimalen« Luftgeschwindigkeiten von 1,3 m/s bzw. 1,9 m/s eine bessere Übereinstimmung liefert.

Wie gezeigt, kommt es zu recht großen Abweichungen zwischen den errechneten und den gemessenen Werten. Der Mittelwert aller Differenzen beträgt beim NO 5% und beim NO<sub>2</sub> 18%. Dies zeigt, dass im Mittel die Berechnung brauchbare Ergebnisse liefert, für den einzelnen Zeitschritt aber größtenteils zu ungenau ist.

Zum Abschluss ist in Abbildung 6.18 die Verteilung der Differenzen dargestellt. Die Breite der einzelnen Klassen beträgt dabei 20%. Auch hier ist zu erkennen, dass es zu einer Normalverteilung um die 0% kommt. Anzumerken ist, dass die Differenzen bei  $\pm 200\%$  abgeschnitten wurden. Einzelne Ausreißer sind daher nicht dargestellt.



**Abbildung 6.17:** Absolute Differenzen des gemessenen und des aus der Massenbilanz errechneten Produkts von Volumenstrom und NO- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentration über die Luftgeschwindigkeit



**Abbildung 6.18:** Verteilung der relativen Differenzen von NO bzw. NO<sub>2</sub>. Die Klassenbreite beträgt 20%.



# 7 Emissionsfaktoren PIARC

## 7.1 Allgemeines

Die *PIARC* (World Road Association, ehemals Permanent International Association of Road Congresses, <https://www.piarc.org>) ist eine 1909 gegründete, gemeinnützige Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, einen Wissenstransfer im Bereich der Straßen und des Straßenverkehrs zu ermöglichen. Derzeit sind weltweit 121 Regierungsmitglieder der Organisation angehörig. [71]

Seit dem Jahr 1990, werden durch das Technical Committee C4 der *PIARC*, aktuelle Informationen für die Gestaltung und Dimensionierung von Lüftungsanlagen für Straßentunnel zusammengestellt. Die letzte Veröffentlichung erschien 2012 unter dem Titel »Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation« mit der Referenz 05.14.B [45].

Tunnellüftungsanlagen werden im Normalfall - also nicht im Brandfall - in Bezug auf die Luftqualität im Tunnel geregelt. Die Auslegung des benötigten Frischluft-Volumenstroms wird unter Berücksichtigung der spezifischen Emissionen sowie der Fahrzeuganzahl im Tunnel durchgeführt. Werte der spezifischen Emissionen pro Fahrzeug für CO und NO<sub>x</sub> [g/(h veh)] sowie für Extinktion (Trübe) [m<sup>2</sup>/(h veh)] werden als Emissionsfaktoren (EFa) bezeichnet und sind in den Veröffentlichungen der *PIARC* gelistet. Eine solche Berechnung des Frischluftbedarfs setzt Kenntnis über die Anzahl des zu erwartenden Verkehrs sowie über dessen Zusammensetzung (PKW, LNF, SNF, Diesel, Otto) voraus.

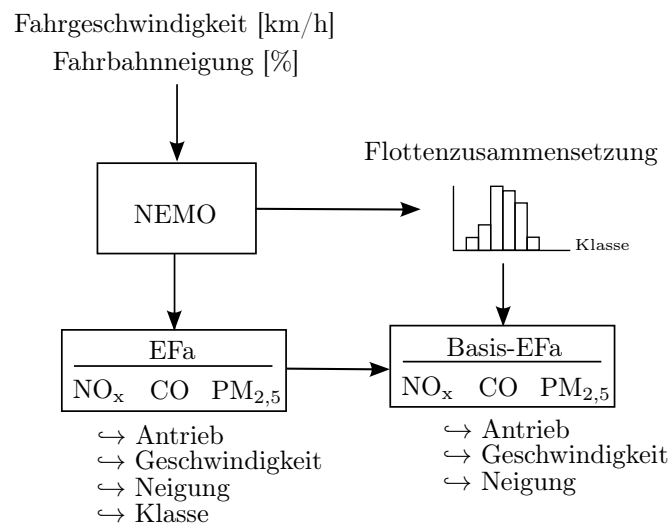
Falls keine Daten über die Flottenzusammensetzung zur Verfügung stehen, kann auf die vereinfachte Berechnung zurückgegriffen werden. Hierbei sind die Emissionsfaktoren durch eine angenommene Flottenzusammensetzung gewichtet. Diese sogenannten Basis-Emissionsfaktoren sind für Länder des Technologiestandards A (EU und USA) gültig. Eine Berücksichtigung anderer Technologiestandards (B und C) ist durch Verwendung von Umrechnungsfaktoren möglich. Für eine detailliertere Beschreibung der Berechnung wird auf [45] verwiesen.

Da die Emissionswerte der einzelnen Fahrzeuge sowie die Flottenzusammensetzung laufenden Änderungen unterliegen, soll in dieser Arbeit eine Erneuerung der Emissionsfaktoren für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) erfolgen. Unter LNF versteht man Fahrzeuge

zur Güterbeförderung, die eine zulässige Gesamtmasse von 3.500 kg nicht überschreiten. Eine Unterteilung erfolgt in dieselbetriebene und benzinbetriebene Fahrzeuge.

## 7.2 Ermittlung der Emissionsfaktoren

Die Ermittlung der Emissionswerte erfolgt durch Simulation mittels des am IVT der TU Graz entwickelten Emissionsmodells NEMO 4.0.0 (*Network Emission Modell*) [53] in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnneigung. Als Bezugsjahr dient das Jahr 2015. Abbildung 7.1 zeigt schematisch die Vorgehensweise zur Ermittlung der Emissionsfaktoren.



**Abbildung 7.1:** Schematische Darstellung der Ermittlung der Emissionsfaktoren mittels NEMO

Wie zu sehen, erfolgt die Berechnung der Emissionsfaktoren ( $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{PM}_{2,5}$ ) pro jeweiliger Antriebsart, Fahrgeschwindigkeit, Fahrbahnneigung und Abgasklasse (Tabelle 7.1).

Um nun die für die vereinfachte Berechnung benötigten Basis-Emissionsfaktoren ermitteln zu können, wird eine repräsentative Flottenzusammensetzung (Tabelle 7.2) berücksichtigt.

Für die Berechnung mit NEMO wird eine Fahrgeschwindigkeit vorausgesetzt. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung der Stillstandsemissionen (Emissionen bei 0 km/h) mittels des Emissionsmodells PHEMlight 11.7.5 (*Passenger car and Heavy duty Emission Model*), das ebenfalls am IVT der TU Graz entwickelt wurde.



**Tabelle 7.1:** Flottenzusammensetzung von LNF bis 3,5 t für das Bezugsjahr 2015 (Gesamtanteil: Otto 3%, Diesel 97%) (Daten aus NEMO 4.0.0)

Klasse	Otto	Diesel
pre EURO	0%	0%
EURO 1	15,1%	3,3%
EURO 2	10,3%	4,4%
EURO 3	9,8%	13,8%
EURO 4	33,6%	36,9%
EURO 5	29,7%	39,4%
EURO 6	1,5%	2,1%

**Tabelle 7.2:** Unterteilungen für die Berechnung der Emissionsfaktoren

Merkmal	Unterteilung
Antriebsart	Diesel, Otto
Fahrgeschwindigkeit [km/h]	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130
Fahrbahnneigung [%]	-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6
Abgasklasse	pre EURO, EURO 1, EURO 2, EURO 3, EURO 4, EURO 5, EURO 6

Wie bereits angesprochen, gilt neben CO und NO<sub>x</sub> die Extinktion (Trübe) als limitierte Komponente in Straßentunneln. Bei der Trübe handelt es sich nicht um einen Schadstoff im eigentlichen Sinn. Als Hauptverursacher der Trübe gelten Partikel in der Luft, und hier insbesondere der Feinstaub (PM<sub>2,5</sub>). Eine Umrechnung der Emissionsfaktoren des Feinstaubes (PM<sub>2,5</sub>) in Trübe ist durch einen linearen Zusammenhang möglich (Formel 7.1).  $K$  entspricht der Licht-Extinktion in m<sup>-1</sup> und  $\mu$  der Massenkonzentration von PM<sub>2,5</sub> in mg/m<sup>3</sup>. [45]

$$K = 0,0047 \cdot \mu \quad (7.1)$$

Als Feinstaub PM<sub>2,5</sub> wird jene Staubfraktion bezeichnet, bei welcher 50% der Partikel einen aerodynamischen Durchmesser von maximal 2,5 µm aufweisen [69]. Die Feinstaub-Emissionsfaktoren berücksichtigen dabei Emissionen, die direkt durch die Verbrennung entstehen (exhaust).

Eine weitere Quelle für den Feinstaub sind die sogenannten nicht-verbrennungsbedingten Partikel (non exhaust). Die nicht-verbrennungsbedingten Emissionen entstehen durch Abrieb-Prozesse (Reifenabrieb, Bremsabrieb, etc.) sowie durch die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub [45]. Sie sind somit von der Art des Antriebs (Benzin, Diesel, Elektro etc.) unabhängig, nicht jedoch von der Fahrzeuggröße (Fahrzeugklasse) und der Geschwindigkeit. Weiters spielt die Art des Tunnels (Gegenverkehr, Richtungsverkehr)

eine entscheidende Rolle. So gibt es in Tunneln mit Richtungsverkehr durch die natürliche Längslüftung einen besseren Abtransport der Staubpartikel, und somit geringere nicht-verbrennungsbedingte Emissionen. Aufgrund der hohen Komplexität dieses Themengebiets wird in dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen. Aus diesem Grund erfolgt keine erneute Berechnung der non exhaust Emissionen.

Um den Einfluss der ständigen Erneuerung der Fahrzeugflotte zu berücksichtigen, wurden für die zukünftigen Jahre 2020, 2025, 2030 und 2035 Korrekturfaktoren berechnet. Diese Faktoren werden als Zeitfaktoren bezeichnet und sind in den Tabellen 7.9, 7.10 und 7.11 aufgelistet. Als Basisjahr dient wiederum das Jahr 2015.

Die Tabellen 7.3 bis 7.8 zeigen nun die errechneten Basis-Emissionsfaktoren für LNF  $< 3,5\text{ t}$  für das Basisjahr 2015 und den Technologiestandard A. Detaillierte Aufstellungen der einzelnen Emissionsfaktoren sind in Anhang A aufgelistet.

Der Vollständigkeit halber wurden die Emissionsfaktoren von PKW und schweren Nutzfahrzeugen (SNF), die im Zuge zweier Bachelorarbeiten am IVT der TU Graz ([41] und [59]) ermittelt wurden, angefügt (Anhang B und C). Zusätzlich wurden die Stillstandsemissionen (Emissionen bei  $0\text{ km/h}$ ) mittels des Emissionsmodells PHEMlight neu berechnet.

In der letzten Veröffentlichung der PIARC [45] wurden die  $\text{PM}_{2,5}$ -Emissionsfaktoren (bzw. Trübe) für Otto-PKW nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund erfolgte letztlich auch keine Ermittlung im Zuge der zitierten Bachelorarbeit [41]. Um jedoch einen vollständigen Datensatz der Emissionsfaktoren zu gewährleisten, wurden in dieser Arbeit ebenfalls die Emissionsfaktoren für  $\text{PM}_{2,5}$  (Tabelle A.17) bzw. die Basis-Emissionsfaktoren für Trübe (Tabelle A.11) und die dazugehörigen Zeitfaktoren (Tabelle A.21) für Otto-PKW berechnet.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Basis-Emissionsfaktoren für PKW und SNF im Rahmen dieser Arbeit neu berechnet wurden. Aus diesem Grund kann es zu geringfügigen Unterschieden, zwischen den Werten aus den beiden Bachelorarbeiten und den in Anhang B und C ersichtlichen Werten kommen.

**Tabelle 7.3:** Basis-Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, LNF Otto

EFa LNF Otto NO <sub>x</sub> [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	3,7	3,8	4,1	4,8	5,2	5,9	6,3
20	3,9	4,3	4,6	5,8	6,8	7,6	8,2
30	4,2	4,6	5,5	7,1	8,1	9,2	10,3
40	4,3	5,1	6,4	8,2	9,5	10,9	13,0
50	4,6	5,5	7,4	9,2	11,0	13,3	16,1
60	4,9	5,9	8,2	10,2	12,6	15,7	18,9
70	5,1	6,3	8,9	11,4	14,7	18,7	22,5
80	5,4	6,7	9,9	12,8	16,9	21,6	26,3
90	5,8	7,2	10,9	14,9	19,8	24,8	28,1
100	6,3	8,7	12,4	17,4	23,8	27,9	29,2
110	6,9	10,2	14,5	20,5	27,4	30,2	31,5
120	7,8	12,0	17,6	23,7	29,2	32,4	35,1
130	9,2	14,0	21,1	28,5	30,3	33,1	39,2

**Tabelle 7.4:** Basis-Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, LNF Diesel

EFa LNF Diesel NO <sub>x</sub> [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
10	10,6	11,5	14,0	16,1	16,3	18,8	20,6
20	10,6	11,5	14,4	16,9	21,5	26,8	32,4
30	10,6	11,5	15,3	20,2	28,0	36,0	45,4
40	10,6	11,9	15,9	24,8	35,1	47,4	65,1
50	10,6	12,1	18,7	30,7	43,8	59,2	81,4
60	10,6	12,4	20,3	35,1	55,1	79,9	110,6
70	10,6	12,6	23,7	42,5	71,9	103,2	144,3
80	10,6	13,9	28,6	53,5	88,3	134,6	171,1
90	10,6	16,0	35,7	71,6	114,1	160,9	206,9
100	10,6	19,3	47,6	91,7	148,8	194,8	236,4
110	10,9	29,3	70,3	124,4	182,7	227,8	268,5
120	15,1	45,1	98,1	157,2	214,4	261,0	299,7
130	24,7	71,2	139,9	198,6	251,3	292,8	325,0

**Tabelle 7.5:** Basis-Emissionsfaktoren für CO, LNF Otto

EFa LNF Otto CO [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
10	36,1	36,5	37,1	42,7	45,1	50,5	53,0
20	45,7	47,6	51,1	58,8	65,0	82,9	99,3
30	57,3	59,0	61,8	77,9	98,8	121,2	148,8
40	68,5	71,2	79,1	98,5	129,6	166,5	238,7
50	80,8	83,7	94,9	124,4	171,6	231,5	298,4
60	92,9	96,1	110,7	150,1	213,5	337,8	511,5
70	105,5	109,4	124,4	177,2	285,1	488,2	807,0
80	118,2	121,2	146,3	216,0	382,9	638,7	1385,3
90	128,7	131,6	174,6	281,6	562,4	1047,3	2165,8
100	141,1	150,4	207,7	371,9	728,5	1614,2	3371,8
110	153,8	169,3	261,7	557,4	1294,3	2811,9	4544,8
120	170,3	205,3	363,4	755,4	1861,6	3940,1	5447,9
130	186,4	250,5	583,8	1455,8	3357,0	5110,0	6076,0

**Tabelle 7.6:** Basis-Emissionsfaktoren für CO, LNF Diesel

EFa LNF Diesel CO [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	2,3	2,4	2,4	2,7	2,7	2,9	3,0
20	3,1	3,2	3,4	3,7	3,9	3,9	4,0
30	3,9	4,0	4,2	4,7	4,8	4,9	5,0
40	4,8	4,9	5,3	5,6	5,8	5,8	6,1
50	5,6	5,8	6,3	6,6	6,7	6,8	7,1
60	6,5	6,7	7,3	7,5	7,6	7,8	8,1
70	7,3	7,6	8,2	8,3	8,7	8,9	9,5
80	8,2	8,7	9,2	9,4	9,7	10,2	10,8
90	9,0	9,7	10,1	10,4	10,8	11,5	12,4
100	9,9	10,7	10,9	11,3	12,2	12,9	13,7
110	11,0	11,7	12,1	12,7	13,8	14,5	15,2
120	12,3	12,7	13,1	14,1	15,3	15,9	16,5
130	13,4	13,7	14,6	15,7	16,6	17,2	17,9

**Tabelle 7.7:** Basis-Emissionsfaktoren für Trübe, LNF Otto

EFa LNF Otto Trübe [m <sup>2</sup> /h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
20	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8
30	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	1,0	1,3
40	0,3	0,3	0,3	0,5	0,9	1,4	2,4
50	0,3	0,3	0,4	0,6	1,1	2,3	3,9
60	0,3	0,3	0,4	0,9	1,7	3,3	5,4
70	0,4	0,4	0,4	1,0	2,6	4,8	7,4
80	0,4	0,4	0,5	1,4	3,4	6,3	9,3
90	0,4	0,4	0,7	2,2	5,0	8,9	13,5
100	0,4	0,4	1,0	3,1	6,7	12,6	18,5
110	0,4	0,5	1,5	4,8	9,1	16,2	26,1
120	0,4	0,6	2,8	6,8	12,6	21,9	36,0
130	0,4	1,0	4,4	8,8	16,9	29,3	44,6

**Tabelle 7.8:** Basis-Emissionsfaktoren für Trübe, LNF Diesel

EFa LNF Diesel Trübe [m <sup>2</sup> /h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
10	3,2	3,2	3,4	4,5	4,7	5,3	5,6
20	4,1	4,2	4,8	5,5	6,0	6,9	8,0
30	4,3	4,4	5,2	6,2	7,5	8,7	10,4
40	4,7	4,8	5,7	7,2	8,9	11,0	12,9
50	5,0	5,7	6,7	8,3	10,9	13,7	16,1
60	5,3	5,8	7,0	9,4	12,1	15,4	18,6
70	5,6	6,0	7,9	11,0	14,6	18,2	22,2
80	5,9	6,8	9,1	12,6	16,9	21,2	24,4
90	6,1	7,2	10,2	15,1	19,8	23,6	27,5
100	6,4	7,9	12,7	17,9	23,0	26,8	30,8
110	7,0	10,1	15,6	21,3	26,1	30,2	34,6
120	8,4	13,1	19,1	24,4	29,3	34,0	38,3
130	10,0	16,3	23,3	28,2	33,0	37,8	41,5

**Tabelle 7.9:** Zeitfaktoren für NO<sub>x</sub> im Vergleich zum Jahr 2015, LNF Otto und Diesel

Jahr	Otto NO <sub>x</sub>	Diesel NO <sub>x</sub>
2015	1,00	1,00
2020	0,41	0,63
2025	0,25	0,35
2030	0,24	0,23
2035	0,23	0,18

**Tabelle 7.10:** Zeitfaktoren für CO im Vergleich zum Jahr 2015, LNF Otto und Diesel

Jahr	Otto CO	Diesel CO
2015	1,00	1,00
2020	0,67	0,68
2025	0,57	0,56
2030	0,57	0,54
2035	0,56	0,53

**Tabelle 7.11:** Zeitfaktoren für Trübe im Vergleich zum Jahr 2015, LNF Otto und Diesel

Jahr	Otto Tr.	Diesel Tr.
2015	1,00	1,00
2020	0,74	0,42
2025	0,58	0,17
2030	0,57	0,08
2035	0,56	0,04

**Tabelle 7.12:** Aufteilung von LNF in Otto und Diesel für die Jahre 2015 bis 2035

Jahr	Otto	Diesel
2015	3%	97%
2020	2%	98%
2025	2%	98%
2030	2%	98%
2035	1%	99%
Durchschnitt	2%	98%

## 8 Schlussfolgerung und Ausblick

Durch die im Plabutschunnel durchgeführten Messungen konnten zum Teil sehr hohe Konzentrationen an NO und NO<sub>2</sub> nachgewiesen werden, wobei die maximal gemessenen Konzentrationen von NO bei 4.021 ppb und jene von NO<sub>2</sub> bei 634 ppb lagen. Die mittleren Konzentrationen (als Median) betragen unter der Woche 1.795 ppb an NO und 316 ppb an NO<sub>2</sub> und an den Wochenenden 899 ppb an NO und 274 ppb an NO<sub>2</sub>. Trotz der hohen Konzentrationen im Tunnel dürfte die Konzentration im Fahrzeuginnenraum jedoch größtenteils nicht über den gesundheitsrelevanten Grenzwert steigen. Eine Berechnung ergab, dass nur ca. 1% der Werte der Innenraumkonzentration über dem Grenzwert der WHO liegen, jedoch nur wenn die Fahrzeugklimaanlage im Umluftbetrieb arbeitet. Weiters ist davon auszugehen, dass sich die Konzentrationen an NO und NO<sub>2</sub> mit steigender Tunnellänge ebenfalls erhöhen.

Die multiple lineare Regressionsanalyse zeigte einen starken Zusammenhang zwischen dem Verkehrsaufkommen und der NO- ( $R_a^2=0,91$ ) und NO<sub>2</sub>-Konzentration ( $R_a^2=0,9$ ). Eine Analyse der Ruß-Konzentration (Black Carbon) ergab, dass nur ein begrenzter Zusammenhang ( $R^2=0,58$ ) zwischen der Black Carbon Konzentration und der Trübe besteht. Auch der Zusammenhang mit dem Verkehrsaufkommen ( $R_a^2=0,6$ ) und dem NO ( $R^2=0,33$ ) bzw. NO<sub>2</sub> ( $R^2=0,56$ ) muss als begrenzt angesehen werden.

Die Überprüfung der DOAS-Kompaktmessgeräte der Fa. SICK zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten aus den CLD-Messungen ( $R^2=0,99$  bei NO bzw.  $R^2=0,94$  bei NO<sub>2</sub>). Die DOAS-Messung lieferte jedoch im Durchschnitt etwas überhöhte Werte wobei einige Ausreißer (<1%) auf eine Fehlfunktion hindeuteten. Dennoch kann festgehalten werden, dass sich die Kompaktmessgeräte gut für Messungen in Straßentunneln eignen.

Das eigens entwickelte Modell zur Berechnung der Stickoxidkonzentrationen im Tunnel lieferte brauchbare Werte für die Abschätzung der Konzentration in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens, der Luftgeschwindigkeit und der Entfernung zum Tunnelportal. Für eine genaue Bestimmung der Stickoxidkonzentrationen oder als Ersatz einer Messung ist das Modell zurzeit aber als ungeeignet anzusehen. Ob eine Verringerung der zeitlichen Auflösung von derzeit sechs Minuten auf z.B. eine Minute eine Verbesserung mit sich bringt, könnte in zukünftigen Projekten untersucht werden.

Die Berechnung der Emissionsfaktoren aus den gemessenen Stickoxidkonzentrationen lieferte im Vergleich zu den Werten gemäß HBEFA 3.3 durchaus realistische Werte.

Wie gezeigt, spielt auch die Luftgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle bei der Berechnung.

Die Analyse der Stickoxidkonzentrationen aus dem Norra Länken Tunnel zeigte im Vergleich zum Plabutschunnel im Durchschnitt niedrigere Werte. So liegt die mittlere NO-Konzentration unter der Woche am MP1 bei 605 ppb und die mittlere NO<sub>2</sub>-Konzentration bei 148 ppb. Dies hängt wahrscheinlich einerseits mit dem niedrigeren Verkehrsaufkommen und andererseits mit den zusätzlichen Einfahrtsrampen und der damit verbesserten Belüftung zusammen. Da die Daten über das Verkehrsaufkommen nur als Summe von PKW und LKW zur Verfügung standen, weist die lineare Regression nur eine begrenzte Aussagekraft auf. Des Weiteren wurde gezeigt, dass der Anteil des NO<sub>2</sub> am gesamten NO<sub>x</sub>, im Vergleich zum Plabutschunnel, niedriger ist, was wohl auf den niedrigeren Anteil an Diesel-PKW in Schweden zurückzuführen ist. Eine Berechnung der Stickoxidkonzentrationen durch eine Massenbilanz lieferte keine brauchbaren Ergebnisse. Die Differenzen der berechneten und der gemessenen Konzentrationen sind zum Teil sehr hoch, was wohl auf die hohe zeitliche Auflösung (36 Minuten) zurückzuführen sein könnte.

Abschließend wurde eine Aktualisierung von Emissionsfaktoren vorgenommen, welche durch die PIARC als Grundlage für die Berechnung des Frischluftbedarfs in Straßentunneln veröffentlicht werden. Mittels der Simulationsmodelle NEMO 4.0.0 und PHEM-light 11.7.5 konnten die Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, CO und Trübe für leichte Nutzfahrzeuge berechnet, wobei die Werte der Trübe aus den Emissionsfaktoren des Feinstaubes (PM<sub>2,5</sub>) durch einen linearen Zusammenhang ermittelt wurden. Durch die Berücksichtigung einer durchschnittlichen Flottenzusammensetzung konnten - aus den für jede Abgasklasse angeführten Emissionsfaktoren - die Basis-Emissionsfaktoren berechnet werden. Um Emissionsfaktoren auch für zukünftige Jahre zu erhalten, wurden Korrekturfaktoren - so genannte Zeitfaktoren - ermittelt, welche die ständige Verjüngung der Fahrzeugflotte berücksichtigen sollen. Da neben den verbrennungsbedingten Partikeln (exhaust) auch nicht-verbrennungsbedingte Partikel (non-exhaust) als Quelle für den Feinstaub gelten, müssen diese ebenfalls bei der Trübe mitberücksichtigt werden. Aufgrund des hohen Komplexitätsgrades wurde dieses Themengebiet in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher behandelt und könnte in zukünftigen Projekten untersucht werden.



# Literatur

- [1] Aalborg Energie Technik a/s. *AET liefert SNCR DeNOx-Systeme zur wesentlichen Reduktion der Emissionen - Reduktion von NOx-Emissionen im Rauchgas*. URL: <http://aet-biomass.de/de-DE/Home/Dienstleistungen/Emissions%5C-minderung.aspx> (besucht am 22.02.2017).
- [2] Akademien der Wissenschaften Schweiz. "Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge". In: *Swiss Academies Factsheets 11 (5)* (2016).
- [3] Ralf Arnold. *Prinzip der FTIR-Spektroskopie*. URL: <http://www.ir-spektroskopie.de/spec/ftir-prinzip/> (besucht am 13.02.2017).
- [4] ASFINAG. *Verkehrszählung - asfinag.at*. URL: <http://www.asfinag.at/unterwegs/verkehrszaehlung> (besucht am 08.04.2017).
- [5] Australian Bureau of Statistics. *Motor Vehicle Census, Australia, 31 Jan 2016; Released at 11:30 AM (CANBERRA TIME) 21/07/2016*. 21. Juli 2016. URL: <http://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/mf/9309.0> (besucht am 30.05.2017).
- [6] Klaus Backhaus et al. *Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung*. Unter Mitarb. von Springer-Verlag GmbH. 14., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2016.
- [7] Richard van Basshuysen und Fred Schäfer, Hrsg. *Handbuch Verbrennungsmotor*. Wiesbaden: Springer Verlag, 2015.
- [8] Günter Baumbach. *Luftreinhalung; Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen - Meßtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften*. Unter Mitarb. von K Baumann et al. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1992.
- [9] Claus Bliefert. *Umweltchemie*. 2., erweiterte Auflage. Weinheim: WILEY, 1997.
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). *Tunnelliste 2016*. URL: <https://www.bmvit.gv.at/verkehr/strasse/tunnel/downloads/tunnelliste2016.pdf> (besucht am 12.02.2017).
- [11] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Bericht der Untersuchungskommission Volkswagen*. URL: <https://www.bmvi.de/>

- SharedDocs / DE / Anlage / VerkehrUndMobilitaet / Strasse / bericht -  
 untersuchungskommission - volkswagen . pdf ? \_ \_ blob = publicationFile (be-  
 sucht am 12.02.2017).
- [12] John Burrows et al. “Atmosphärische Spurenstoffe und ihre Sondierung”. In: *Chemie in unserer Zeit* 41.3 (2007), S. 170–191.
- [13] Núria Castell et al. *Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring*. ETC/ACM Technical Paper 2013/16. 2013.
- [14] Centre on Emission Inventories and Projections. *Submissions 2016*. URL: [http://www.ceip.at/ms/ceip\\_home1/ceip\\_home/status\\_reporting/2016\\_submissions/](http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/status_reporting/2016_submissions/) (besucht am 12.12.2016).
- [15] Qiang Cui et al. “The spin-forbidden reaction  $\text{CH}(2\pi) + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{N}(4\text{S})$  revisited. II. Nonadiabatic transition state theory and application”. In: *The Journal of Chemical Physics* 110.19 (1999), S. 9469–9482.
- [16] Department of Science, Information Technology and Innovation. *CLEM7 tunnel: air emission assessment and best practice operational management for air quality*. Brisban: Queensland Government, 2015.
- [17] Axel Donges und Reinhard Noll. *Laser Measurement Technology; Fundamentals and Applications*. Springer Series in Optical Sciences. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [18] E. J. Dunlea et al. “Evaluation of nitrogen dioxide chemiluminescence monitors in a polluted urban environment”. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 7.10 (2007), S. 2691–2704.
- [19] Peter Eckert und Sebastian Rakowski. “Schadstoffbildung und -reduktion”. In: *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Hrsg. von Günter P. Merker und Rüdiger Teichmann. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014, S. 471–523.
- [20] Wolfgang Eifler et al. *Küttner Kolbenmaschinen*. 7. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage gmbH, 2009.
- [21] Lars Elertson. “Control of the Tunnel-Ventilation system in the northern Link (Norra Länken) in Stockholm”. In: *7th Symposium Tunnel Safety and Ventilation; 7. Tagung Sicherheit und Belüftung von Tunnelanlagen*. Hrsg. von Helmut Eichlseder. Reports of the Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology vol. 97. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2014, S. 38–41.

- 
- [22] European Environment Agency. *Air pollution : Air pollution harms human health and the environment*. URL: <http://www.eea.europa.eu/themes/air/intro> (besucht am 19.02.2017).
- [23] Ulrich Förstner. *Umweltschutztechnik*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- [24] Gabi Förtsch und Heinz Meinholz. *Handbuch Betrieblicher Immissionsschutz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [25] Arnold A. Gaertner, Howard W. Yoon und Thomas A. Germer. “Chapter 3 - Dispersive Methods”. In: *Experimental Methods in the Physical Sciences*. Hrsg. von Joanne C. Zwinkels {and} Benjamin K. Tsai Thomas A. Germer. Bd. 46. Spectrophotometry Accurate Measurement of Optical Properties of Materials. Academic Press, 2014, S. 67–95.
- [26] Holger Großmann. *Pkw-Klimatisierung: physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*. 2. Aufl. VDI. Berlin: Springer, 2013. 309 S.
- [27] Helmut Günzler und Herbert Michael Heise. *IR-Spektroskopie: eine Einführung*. 3., neubearb. Aufl. Weinheim: VCH, 1996.
- [28] Werner Hässelbarth. *BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen*. Unter Mitarb. von Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. 1. Fassung. Forschungsbericht / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung 266. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, 2004.
- [29] Stefan Hausberger et al. “Emission factors for heavy-duty vehicles and validation by tunnel measurements”. In: *Atmospheric Environment*. 11th International Symposium, Transport and Air Pollution 37.37 (2003), S. 5237–5245.
- [30] Jürgen Hedderich und Lothar Sachs. *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.
- [31] Marlene Hinterhofer. “Anteil der verkehrsbedingten PM 10 und PM 2,5 Emissionen aus Abrieb und Wiederaufwirbelung an der Feinstaubbelastung in Österreich”. Diss. Graz: Technische Universität Graz, 2014.
- [32] Elisabeth A. Holland et al. “Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets”. In: *Biogeochemistry* 46.1 (1999), S. 7–43.
- [33] Christoph Hüglin et al. *Sensortechnologien für die Messung von Luftschadstoffen; Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen von kostengünstigen Sensoren*. Dübendorf: Empa, Abt. Luftfremdstoffe/Umwelttechnik, 2015.

- [34] ILF beratende Ingenieure. *Erweiterung und Vertiefung des österr. Tunnelmodells – TuRisMo 2; Arbeitsbericht zum Arbeitsausschuss Tunnel-Sicherheit*. Linz, 2015.
- [35] JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 100:2008; Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. URL: [http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf) (besucht am 19.02.2017).
- [36] Franz Joos. *Technische Verbrennung; Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [37] Jörgen Kolar. *Stickstoffoxide und Luftreinhaltung: Grundlagen, Emissionen, Transmission, Immissionen, Wirkungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1990.
- [38] Gerhard Lammel und Heiner Flessa. “Anthropogene Störung des Stickstoff-Kreislaufs”. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 10.5 (1998), S. 295–305.
- [39] Zhihua Liu et al. “Impacts of continuously regenerating trap and particle oxidation catalyst on the NO<sub>2</sub> and particulate matter emissions emitted from diesel engine”. In: *Journal of Environmental Sciences* 24.4 (2013), S. 624–631.
- [40] Gunnar Lotsberg. *Observations of NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> volume ratio in three tunnels in Norway*. 173. Leikanger: Norwegian Public Roads Administration, 2013.
- [41] Stefanie Mahringer. *Ermittlung von Emissionsdaten für die Auslegung von Tunnelbelüftungen*. Graz: Bachelorarbeit an der Technische Universität Graz, 2017.
- [42] Ashley N. Martin et al. “In-vehicle nitrogen dioxide concentrations in road tunnels”. In: *Atmospheric Environment* 144 (2016), S. 234–248.
- [43] Hans-Joachim Mittag. *Statistik: eine Einführung mit interaktiven Elementen*. 4., wesentlich überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2016.
- [44] Rainer Parthier. *Messtechnik; Grundlagen und Anwendungen der elektrischen*. 8. Aufl. Wiesbaden: Springer Viewega, 2016.
- [45] PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation. *Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation*. La Défense cedex: World Road Association (PIARC), 2012.
- [46] Wilfried Plafmann. “Meßtechnik”. In: *Vieweg Handbuch Elektrotechnik*. Hrsg. von Wolfgang Böge und Wilfried Plafmann. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2007, S. 735–808.

- 
- [47] U. Platt. “Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)”. In: *Air monitoring by spectroscopic techniques*. Hrsg. von Markus W. Sigrist. Chemical analysis v. 127. New York: Wiley, 1994.
- [48] U. Platt, D. Perner und H. W. Pätz. “Simultaneous measurement of atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption”. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 84 (C10 1979), S. 6329–6335.
- [49] Ulrich Platt und Jochen Stutz. *Differential optical absorption spectroscopy; principles and applications*. Physics of earth and space environments. Berlin: Springer, 2008.
- [50] Thomas Pongratz und Dietmar Öttl. *Einfluss der Entlüftung des Plabutschunnels auf die Stickstoffdioxid Belastung im Westen von Graz*. Lu-1-2011. Graz: Amt der Steiermärkischen Landesregierung Fachabteilung 17C, 2011.
- [51] Fernando Puente León und Uwe Kiencke. *Messtechnik: Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker*. 9., überarb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [52] Republik Österreich. *Allgemeines Nacht-, Wochenend- und Feiertagsfahrverbot*. HELP.gv.at. 2017. URL: <https://www.help.gv.at/Portal.Node/hlpd/public/content/6/Seite.063230.html> (besucht am 15.05.2017).
- [53] Martin Rexeis und Stefan Hausberger. “Calculation of Vehicle Emissions in Road Networks with the model “NEMO””. In: Transport&Airpollution Conference. Graz, 2005.
- [54] RTP Environmental Associates. *Ambient Ratio Method Version 2 (ARM2) for use with AERMOD for 1-hr NO<sub>2</sub> Modeling*. Boulder, 2013.
- [55] Jürgen Schnelle-Kreis et al. “Atmosphärische Aerosole: Quellen, Vorkommen, Zusammensetzung”. In: *Chemie in unserer Zeit* 41.3 (2007), S. 220–230.
- [56] Waldemar Helmut Schön. *Handbuch der Reinsten Gase*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [57] Emily G. Snyder et al. “The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring”. In: *Environmental Science & Technology* 47.20 (2013), S. 11369–11377.
- [58] Statistik Austria. *Kraftfahrzeuge - Bestand*. URL: [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge\\_-\\_bestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html) (besucht am 12.12.2016).
- [59] Reinhard Steiner. *Ermittlung von Emissionsfaktoren für LKW bei Fahrten in Straßentunneln*, Bachelorarbeit. Graz: Bachelorarbeit an der Technische Universität Graz, 2017.

- [60] C. Streffer et al. “Auswirkungen von Schadstoffen, Lärm und Strahlen”. In: *Gasreinigung und Luftreinhaltung*. Hrsg. von Klaus Görner und Kurt Hübner. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002, S. 67–136.
- [61] Peter J. Sturm et al. *Ermittlung von aktuellen Emissionsfaktoren für limitierte und nicht limitierte Schadstoffkomponenten des Straßen- und Schienenverkehrs*. Graz: Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH, 2015.
- [62] Trafikverket Swedish Transport Administration. *About the project*. Trafikverket. 2017. URL: <http://www.trafikverket.se/en/startpage/projects/Road-construction-projects/Norra-lanken/About-the-project/> (besucht am 08.05.2017).
- [63] Helmut Tschöke et al. “Abgasemission von Dieselmotoren”. In: *Handbuch Dieselmotoren*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, S. 461–536.
- [64] Umweltbundesamt. *Emissionstrends 1990–2014; Ein Überblick über die Verursacher von Luftschadstoffen in Österreich (Datenstand 2016); Report REP-0574*. Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2016.
- [65] Umweltbundesamt. *Verkehr als Hauptverursacher für Stickoxide*. URL: [http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen\\_verkehr/verk\\_schadstoffe/stickoxide/](http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen_verkehr/verk_schadstoffe/stickoxide/) (besucht am 12.04.2017).
- [66] J. Warnatz, U. Maas und Robert W. Dibble. *Combustion; physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation*. 4th ed. Berlin, New York: Springer, 2006.
- [67] J. Warnatz, U. Riedel und R. Schmidt. “Different Levels of Air Dissociation Chemistry and Its Coupling with Flow Models”. In: *Advances in Hypersonics*. Hrsg. von John J. Bertin, Jacques Periaux und Josef Ballmann. Progress in Scientific Computing 8/9. Boston: Birkhäuser, 1992, S. 67–103.
- [68] WHO Regional Office for Europe. *Air Quality Guidelines - Global Update 2005*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2006.
- [69] Gerhard Wiegand. *Gasmessstechnik in Theorie und Praxis: Messgeräte, Sensoren, Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [70] S. Wiesner et al. “Stoffquellen”. In: *Gasreinigung und Luftreinhaltung*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002, S. 315–455.
- [71] World Road Association (PIARC). *About PIARC*. URL: <https://www.piarc.org/en/about-piarc/> (besucht am 07.04.2017).
- [72] Hiroyuki Yamada, Rumiko Hayashi und Kenichi Tonokura. “Simultaneous measurements of on-road/in-vehicle nanoparticles and NOx while driving: Actual si-

tuations, passenger exposure and secondary formations”. In: *Science of The Total Environment* 563–564 (2016), S. 944–955.

- [73] Hakan Peter Yozgatli. “Unsicherheitsbilanzen in der quantitativen FT-IR-Spektroskopie”. Diss. Berlin: Humboldt-Universität, 2002.





# Anhang

## A Emissionsfaktoren für LNF

Tabelle A.1: Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, LNF Otto

EFa LNF Otto NO <sub>x</sub> [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,66	16,40	18,30	19,73	19,73	19,73	19,73	19,73	19,73	19,73	19,73	21,00	26,00	34,42
EURO 1	1,69	14,60	14,76	15,62	15,73	16,47	16,80	17,05	17,15	17,36	18,56	20,86	25,37	32,62
EURO 2	0,60	5,72	5,99	6,25	6,48	6,96	7,43	7,74	9,01	10,62	12,27	12,80	13,00	13,50
EURO 3	0,34	2,09	2,19	2,29	2,35	2,37	2,46	2,61	2,75	2,97	3,20	3,50	3,84	4,24
EURO 4	0,17	1,46	1,60	1,78	1,92	2,10	2,32	2,53	2,69	2,89	3,08	3,39	3,78	4,11
EURO 5	0,06	0,74	0,94	1,16	1,35	1,59	1,82	2,05	2,28	2,53	2,80	3,04	3,29	3,58
EURO 6	0,07	0,71	0,91	1,14	1,32	1,57	1,81	2,04	2,26	2,52	2,78	3,02	3,28	3,57
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,66	16,51	24,21	24,30	24,47	24,51	24,55	24,65	25,34	27,12	36,50	58,56	97,98	139,94
EURO 1	1,69	15,18	16,90	17,77	18,92	20,02	21,12	22,49	23,51	24,85	30,86	37,50	44,49	52,76
EURO 2	0,60	5,81	6,32	6,75	7,43	8,15	8,87	9,62	10,24	10,95	14,34	15,46	17,98	21,21
EURO 3	0,34	2,19	2,29	2,35	2,51	2,72	2,92	3,12	3,29	3,61	3,98	4,35	5,33	6,02
EURO 4	0,17	1,50	1,71	1,92	2,19	2,45	2,71	2,89	3,13	3,45	3,79	4,33	5,27	5,75
EURO 5	0,06	0,74	0,98	1,22	1,48	1,73	1,98	2,18	2,43	2,71	2,98	3,41	3,84	4,31
EURO 6	0,07	0,71	0,95	1,20	1,45	1,70	1,95	2,16	2,40	2,69	2,96	3,33	3,82	4,28
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,66	18,00	25,10	30,42	37,84	44,81	51,77	57,85	71,87	91,09	118,32	158,39	211,46	272,65
EURO 1	1,69	15,94	18,19	21,56	24,93	28,21	31,49	33,63	37,38	40,80	46,98	55,82	69,66	86,35
EURO 2	0,60	6,80	6,86	8,35	9,83	11,21	12,58	13,44	15,12	16,40	18,76	21,77	27,16	32,43
EURO 3	0,34	2,34	2,39	2,71	3,12	3,50	3,87	4,14	4,55	5,14	5,71	6,40	7,07	8,36
EURO 4	0,17	1,58	1,80	2,05	2,50	2,94	3,38	3,75	4,20	4,73	5,21	5,90	6,61	7,28
EURO 5	0,06	0,80	1,02	1,34	1,63	2,04	2,24	2,54	2,85	3,23	3,61	4,06	4,54	4,91
EURO 6	0,07	0,72	1,01	1,30	1,59	1,98	2,21	2,50	2,82	3,19	3,56	4,00	4,46	4,83
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,66	35,00	41,78	52,73	65,52	81,50	97,48	115,76	140,44	174,82	215,92	269,48	322,95	322,95
EURO 1	1,69	19,34	23,16	28,42	32,30	35,83	39,36	43,79	49,36	58,63	69,68	84,50	97,94	121,65
EURO 2	0,60	7,22	8,77	10,85	12,47	13,96	15,44	17,17	19,23	22,65	26,85	32,08	37,91	45,42
EURO 3	0,34	2,72	2,97	3,47	3,90	4,16	4,51	5,02	5,51	6,11	7,08	8,28	9,74	11,85

**Tabelle A.1:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, LNF Otto (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,17	1,74	2,15	2,76	3,28	3,74	4,20	4,72	5,30	5,87	6,39	6,93	7,62	8,18
EURO 5	0,06	0,88	1,17	1,55	1,91	2,25	2,58	2,94	3,33	3,74	4,12	4,41	4,94	5,24
EURO 6	0,07	0,83	1,14	1,51	1,87	2,20	2,53	2,88	3,27	3,66	4,05	4,35	4,82	5,15
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,66	38,57	53,83	76,58	98,83	123,54	150,07	182,48	219,80	263,71	309,40	357,82	357,82	357,82
EURO 1	1,69	21,44	27,45	32,03	37,50	43,73	49,95	58,91	69,13	82,25	102,30	117,41	122,77	124,40
EURO 2	0,60	7,96	10,28	12,18	14,36	16,74	19,11	22,68	26,13	31,01	35,98	43,61	47,34	49,05
EURO 3	0,34	2,73	3,30	3,84	4,25	4,80	5,35	6,06	7,01	8,07	9,29	10,94	12,58	13,65
EURO 4	0,17	1,89	2,54	3,23	3,80	4,40	4,99	5,50	5,97	6,59	7,13	7,98	8,82	10,07
EURO 5	0,06	0,90	1,31	1,75	2,13	2,54	2,95	3,30	3,67	4,00	4,44	4,90	5,35	5,88
EURO 6	0,07	0,87	1,27	1,70	2,07	2,47	2,86	3,22	3,58	3,92	4,32	4,79	5,25	5,76
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,66	47,24	72,18	102,07	132,56	165,71	208,37	248,48	303,44	345,21	358,35	358,35	358,35	358,35
EURO 1	1,69	24,40	30,80	36,96	43,56	54,03	64,49	78,74	92,20	105,77	119,34	128,70	138,40	139,22
EURO 2	0,60	8,99	11,49	13,94	16,49	20,45	24,40	29,17	33,37	39,03	44,69	47,50	49,20	50,88
EURO 3	0,34	2,97	3,67	4,03	4,67	5,60	6,53	7,60	8,70	10,21	11,72	12,76	13,23	13,70
EURO 4	0,17	2,12	2,94	3,63	4,34	4,89	5,44	6,02	6,63	7,38	8,12	9,18	10,22	10,79
EURO 5	0,06	1,00	1,49	1,91	2,37	2,77	3,17	3,48	3,94	4,37	4,80	5,28	5,78	6,20
EURO 6	0,07	0,97	1,44	1,86	2,29	2,69	3,08	3,40	3,82	4,28	4,74	5,17	5,64	6,07
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,66	53,05	89,54	127,65	173,05	216,31	264,14	311,96	358,87	358,87	358,87	358,87	358,87	358,87
EURO 1	1,69	26,17	33,45	41,51	53,54	66,93	79,61	96,31	113,00	119,41	120,65	130,47	148,60	166,36
EURO 2	0,60	9,57	12,49	15,50	20,12	25,15	29,64	35,26	42,22	45,20	48,30	50,70	53,81	62,26
EURO 3	0,34	3,15	3,68	4,41	5,47	6,65	7,83	9,42	11,00	12,11	13,24	14,30	15,11	15,75
EURO 4	0,17	2,28	3,16	4,03	4,73	5,42	6,10	6,73	7,62	8,50	9,40	10,30	11,37	12,44
EURO 5	0,06	1,06	1,58	2,09	2,55	2,97	3,38	3,71	4,08	4,65	5,22	5,66	5,98	6,43
EURO 6	0,07	1,02	1,52	2,02	2,47	2,88	3,28	3,60	4,03	4,54	5,08	5,50	5,81	6,25

**Tabelle A.2:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, LNF Diesel

EFa LNF Diesel NO <sub>x</sub> [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,52	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01	30,00	44,20	72,33
EURO 1	5,88	14,70	14,70	14,70	14,79	14,79	14,79	14,79	14,79	14,79	14,79	21,13	36,13	58,88
EURO 2	5,53	14,00	14,09	14,09	14,09	14,09	14,09	14,09	14,09	14,09	14,09	14,09	23,34	43,10
EURO 3	4,12	13,55	13,55	13,55	13,55	13,55	13,55	13,55	13,55	13,55	13,55	13,94	22,24	36,02
EURO 4	3,62	9,30	9,40	9,41	9,41	9,41	9,41	9,41	9,41	9,41	9,41	9,41	14,26	22,05
EURO 5	3,60	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	11,29	19,31
EURO 6	1,28	3,60	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	4,00	6,04
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,52	20,29	20,29	20,38	20,91	21,67	22,43	23,28	27,14	34,58	49,03	72,35	112,11	163,08
EURO 1	5,88	18,40	18,40	18,63	19,81	19,85	20,00	21,73	25,00	31,25	41,02	61,12	90,85	137,35
EURO 2	5,53	14,60	14,68	14,70	14,79	14,92	15,04	15,50	19,11	22,77	30,78	47,45	71,41	111,92
EURO 3	4,12	13,55	13,56	13,60	13,83	14,20	14,56	14,91	17,50	20,62	28,10	41,25	60,11	94,56
EURO 4	3,62	9,44	9,48	9,50	9,77	9,94	10,11	10,39	11,58	14,40	17,18	26,86	43,86	67,11
EURO 5	3,60	12,09	12,09	12,09	12,61	12,88	13,14	13,20	13,90	14,50	15,68	23,85	35,99	59,43
EURO 6	1,28	4,29	4,30	4,31	4,44	4,56	4,67	4,68	4,70	5,29	6,00	8,01	12,17	19,80
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,52	24,59	26,19	30,50	34,00	39,86	42,47	49,17	60,68	78,84	104,07	147,41	210,00	274,93
EURO 1	5,88	22,51	22,72	27,00	28,98	36,22	37,67	42,97	53,02	68,29	87,89	128,13	179,35	240,08
EURO 2	5,53	19,23	20,11	23,00	24,17	30,22	30,58	33,92	44,06	53,92	72,25	106,61	151,62	203,74
EURO 3	4,12	17,41	19,72	21,50	22,12	25,00	27,61	31,27	38,57	49,16	62,08	91,87	126,52	166,28
EURO 4	3,62	13,00	13,10	14,00	14,40	17,00	18,54	22,07	26,62	32,86	46,65	66,87	94,07	135,91
EURO 5	3,60	13,00	13,00	13,00	13,66	16,00	17,62	20,67	24,22	30,15	39,05	59,73	82,75	124,12
EURO 6	1,28	4,93	4,93	4,93	4,94	6,00	6,08	7,16	8,39	10,54	13,14	20,42	28,50	42,36
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,52	28,88	31,86	38,76	46,54	58,18	70,16	85,44	108,21	141,43	185,57	245,08	313,64	382,22
EURO 1	5,88	26,61	29,20	34,81	41,35	51,68	62,16	75,86	93,14	124,43	162,23	212,66	272,92	334,06
EURO 2	5,53	23,85	25,89	29,98	35,09	43,86	52,64	63,12	78,09	105,79	138,03	184,25	238,83	292,92
EURO 3	4,12	21,26	23,20	26,50	31,58	39,48	47,02	55,64	69,49	92,08	116,42	151,79	188,12	222,03

**Tabelle A.2:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, LNF Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	3,62	15,12	15,85	18,49	23,31	29,14	32,43	41,13	51,61	68,35	88,45	120,37	153,00	192,73
EURO 5	3,60	14,03	14,31	17,99	22,22	27,00	30,53	35,78	45,58	61,94	78,37	108,88	137,25	181,00
EURO 6	1,28	4,93	5,17	6,38	7,85	9,81	10,82	12,52	15,72	21,77	27,25	38,90	48,35	62,92
	Steigung 2%													
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,52	28,88	39,83	51,73	66,74	83,42	104,87	136,09	171,66	217,37	272,87	337,67	404,17	457,92
EURO 1	5,88	26,61	35,84	46,52	59,70	74,62	91,89	120,53	151,18	193,53	241,70	299,92	357,75	413,70
EURO 2	5,53	23,85	31,63	41,14	52,33	65,41	79,11	104,35	129,93	168,50	210,68	264,71	318,17	369,58
EURO 3	4,12	21,26	27,73	35,90	46,13	57,66	70,83	91,40	111,62	141,52	175,13	205,07	237,47	265,41
EURO 4	3,62	15,12	19,77	26,38	32,51	40,64	53,12	68,82	85,37	110,66	143,69	177,80	210,50	247,95
EURO 5	3,60	14,54	19,36	24,73	30,85	38,57	47,78	62,74	76,26	99,10	135,14	167,03	194,03	231,58
EURO 6	1,28	5,24	6,81	8,84	10,99	13,74	16,68	22,39	26,75	36,26	43,30	57,14	68,30	81,43
	Steigung 4%													
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,52	33,04	48,38	67,55	88,00	110,00	150,36	192,94	243,00	292,80	353,66	418,17	467,91	505,06
EURO 1	5,88	30,21	43,42	60,54	79,24	99,05	134,71	170,94	214,91	262,78	318,16	372,09	422,54	457,36
EURO 2	5,53	27,96	38,47	53,54	69,64	87,06	118,04	150,98	190,49	234,34	280,99	331,86	379,99	411,27
EURO 3	4,12	24,54	33,54	47,24	59,24	74,05	101,83	128,94	157,35	186,52	217,73	247,99	277,58	304,63
EURO 4	3,62	17,74	25,25	33,43	46,88	58,60	76,81	100,07	131,97	154,51	187,12	223,04	258,30	292,52
EURO 5	3,60	16,55	24,11	31,81	40,33	50,41	69,28	89,78	121,00	147,00	181,00	209,66	240,24	272,37
EURO 6	1,28	5,98	8,61	11,37	14,10	17,63	24,42	32,48	43,29	50,28	62,49	73,90	84,40	95,54
	Steigung 6%													
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,52	37,81	58,24	84,51	120,02	150,03	203,77	257,31	312,47	366,59	429,57	477,18	520,58	563,68
EURO 1	5,88	34,12	52,57	75,91	105,87	132,34	180,72	230,11	276,64	328,81	383,50	431,15	470,34	509,29
EURO 2	5,53	30,62	48,40	66,44	92,92	116,15	161,24	202,15	248,00	293,88	343,91	387,93	422,22	458,21
EURO 3	4,12	26,56	41,51	57,37	82,25	102,81	136,86	168,14	196,81	223,90	252,99	286,47	311,79	338,37
EURO 4	3,62	18,90	30,32	44,76	62,77	78,47	107,54	142,91	167,59	205,13	233,15	266,59	298,24	322,92
EURO 5	3,60	18,69	28,81	38,70	57,19	71,49	96,74	129,00	154,00	189,98	217,71	246,46	279,44	303,27
EURO 6	1,28	6,61	10,28	13,60	20,26	25,33	35,79	43,45	55,93	67,14	76,60	86,86	98,96	107,39

Tabelle A.3: Emissionsfaktoren für CO, LNF Otto

EFa LNF Otto CO [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	278,82	678,72	702,59	726,45	749,21	777,92	806,62	829,15	851,05	891,19	934,42	1.002,15	1.139,23	1.285,90
EURO 1	10,90	91,00	105,69	128,97	148,72	171,33	193,94	214,23	241,62	268,30	292,67	312,07	351,70	417,53
EURO 2	5,76	50,80	63,91	78,64	91,18	106,99	122,79	138,83	155,77	166,99	180,36	202,99	218,72	244,37
EURO 3	1,08	24,89	35,67	48,27	60,06	71,95	83,83	95,80	109,29	121,45	133,14	145,95	156,37	168,76
EURO 4	3,80	23,42	30,94	38,97	47,87	57,14	66,40	76,62	85,11	91,33	101,03	110,72	124,82	127,73
EURO 5	3,78	21,83	29,67	38,31	47,26	56,56	65,85	76,12	84,70	91,31	100,70	110,09	120,12	124,51
EURO 6	4,11	23,67	30,84	39,41	48,44	60,55	67,18	77,46	85,96	93,00	102,85	112,69	121,02	126,80
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	278,82	689,01	712,88	750,74	795,86	838,79	881,71	923,07	972,53	1.050,11	1.187,77	1.325,43	1.460,67	1.662,42
EURO 1	10,90	91,10	114,13	136,71	160,47	184,04	207,60	232,49	255,50	279,87	331,66	383,45	510,44	643,71
EURO 2	5,76	50,90	67,36	83,33	99,53	115,96	132,39	148,96	164,70	178,55	208,85	239,15	299,99	366,62
EURO 3	1,08	28,90	38,70	48,86	60,81	73,12	85,42	97,56	109,69	121,50	138,74	156,22	185,33	223,15
EURO 4	3,80	23,42	30,94	38,97	47,87	57,14	66,40	76,62	85,11	91,33	101,03	110,72	124,82	148,94
EURO 5	3,78	21,83	29,67	38,31	47,26	56,56	65,85	76,12	84,70	91,31	100,70	110,09	120,12	140,76
EURO 6	4,11	23,67	30,84	39,41	48,44	60,55	67,18	77,46	85,96	93,00	102,85	112,69	121,02	143,04
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	278,82	701,20	715,30	785,20	880,07	960,32	1.040,57	1.148,23	1.252,84	1.326,40	1.450,66	1.677,36	2.020,72	2.540,23
EURO 1	10,90	91,20	120,40	139,01	185,95	224,49	263,02	295,34	358,95	436,30	528,66	700,53	1.001,16	1.648,88
EURO 2	5,76	52,30	69,21	85,20	110,12	135,99	161,86	178,51	214,47	258,59	305,45	392,36	546,99	822,55
EURO 3	1,08	30,60	40,11	51,68	66,59	82,63	98,67	111,30	129,52	154,96	184,12	226,17	307,65	462,27
EURO 4	3,80	24,01	35,02	43,19	51,35	60,35	69,35	79,01	90,44	105,28	125,38	152,28	207,24	333,09
EURO 5	3,78	22,10	32,50	40,05	51,20	59,97	68,73	77,31	86,85	101,45	116,93	136,03	181,14	300,26
EURO 6	4,11	24,07	31,99	40,70	54,58	61,30	68,01	77,67	88,34	103,39	119,59	137,66	182,70	297,74
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	278,82	740,33	814,96	939,83	1.064,70	1.135,89	1.207,08	1.286,56	1.450,82	1.683,79	1.958,67	2.457,49	3.202,41	4.043,23
EURO 1	10,90	112,23	148,91	200,55	252,19	320,38	388,56	461,28	570,08	761,77	997,09	1.602,59	2.220,73	4.350,86
EURO 2	5,76	63,52	89,56	119,24	148,91	187,69	226,46	266,53	327,47	428,51	550,12	780,44	1.114,40	2.144,49
EURO 3	1,08	30,74	47,26	62,94	81,65	105,39	129,12	152,10	185,68	243,28	292,70	433,66	574,62	1.100,88

**Tabelle A.3:** Emissionsfaktoren für CO, LNF Otto (*Fortsetzung*)

EURO 4	3,80	24,88	35,20	46,03	58,88	73,76	88,63	107,06	127,91	161,77	224,52	316,61	408,70	736,21
EURO 5	3,78	25,30	34,41	44,11	55,68	69,60	82,86	94,21	112,85	142,83	195,31	278,27	361,23	718,52
EURO 6	4,11	25,80	33,65	44,92	57,62	72,02	85,68	97,13	115,03	144,70	200,45	282,10	363,74	753,56
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	278,82	754,36	901,30	1.041,64	1.122,87	1.270,84	1.418,80	1.643,65	1.893,28	2.375,37	2.962,83	3.880,39	5.629,81	7.887,19
EURO 1	10,90	117,65	172,03	265,22	346,77	462,75	578,72	771,02	983,29	1.490,77	2.040,22	3.890,65	5.770,37	10.544,11
EURO 2	5,76	67,49	100,00	153,80	198,62	264,40	330,18	432,12	542,90	861,05	1.179,20	1.969,57	2.731,92	5.248,97
EURO 3	1,08	33,14	50,47	79,41	107,66	143,66	179,65	242,30	300,86	435,60	570,33	983,11	1.395,89	2.703,32
EURO 4	3,80	26,70	38,24	55,92	75,26	98,86	122,45	166,38	243,33	328,04	399,26	660,28	921,30	1.510,73
EURO 5	3,78	26,19	35,36	52,76	67,57	87,64	107,70	143,85	216,69	308,03	352,02	600,78	849,53	1.461,37
EURO 6	4,11	26,32	37,05	55,19	70,51	90,03	109,54	146,71	222,23	328,55	358,86	610,82	862,78	1.527,65
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	278,82	839,58	999,02	1.079,33	1.235,16	1.491,09	1.747,02	2.156,99	2.566,95	3.345,94	4.116,08	6.862,46	9.348,72	11.528,52
EURO 1	10,90	137,11	227,34	331,76	452,70	671,63	890,56	1.346,58	1.802,60	2.930,94	4.848,24	8.325,04	11.427,96	12.842,42
EURO 2	5,76	79,91	130,47	187,29	259,44	375,91	492,37	717,58	942,79	1.550,11	2.467,67	4.324,38	5.879,30	7.796,61
EURO 3	1,08	37,62	63,99	98,34	137,43	194,44	251,45	368,92	486,38	834,59	1.261,06	2.214,23	3.203,26	4.413,55
EURO 4	3,80	27,89	46,11	69,88	96,44	120,55	210,91	286,93	362,94	598,18	833,42	1.425,83	2.096,18	3.003,75
EURO 5	3,78	27,44	42,97	60,22	82,42	103,03	183,86	253,11	322,36	524,37	726,37	1.335,40	1.907,29	2.985,08
EURO 6	4,11	26,92	45,31	63,21	85,01	106,26	190,88	259,35	327,82	531,41	735,00	1.385,68	1.977,35	3.022,23
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	278,82	871,68	1.025,30	1.172,21	1.458,43	1.823,04	2.246,51	2.904,74	3.780,69	5.428,27	7.552,04	9.915,42	12.122,86	13.858,42
EURO 1	10,90	146,66	277,38	410,37	656,73	820,91	1.390,47	2.091,68	4.022,05	5.723,85	10.221,55	12.658,28	13.738,09	15.418,96
EURO 2	5,76	83,30	156,64	232,85	367,63	459,53	797,17	1.112,18	2.089,99	3.694,79	5.299,59	6.541,41	7.529,54	8.377,56
EURO 3	1,08	38,66	78,28	120,54	200,42	250,53	421,07	570,37	1.080,72	1.926,89	2.773,06	3.726,72	4.612,57	4.903,15
EURO 4	3,80	29,70	54,26	85,86	137,14	171,43	291,71	509,77	721,07	1.155,43	1.589,78	2.526,24	3.254,21	3.450,32
EURO 5	3,78	27,50	49,44	71,50	116,16	145,21	258,02	481,23	691,46	1.115,53	1.539,59	2.401,97	3.383,94	3.997,67
EURO 6	4,11	28,61	52,34	74,20	120,06	150,08	276,19	491,87	739,03	1.034,49	1.625,28	2.535,58	3.553,25	4.275,24

Tabelle A.4: Emissionsfaktoren für CO, LNF Diesel

EFa LNF Diesel CO [g/h] 2015														
Steigung -6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	8,66	31,00	31,25	32,18	34,81	37,14	39,46	41,69	43,78	45,62	48,24	60,00	68,95	75,36
EURO 1	5,70	21,63	22,27	24,01	26,46	28,67	30,88	32,82	34,82	37,11	38,56	43,89	53,23	58,33
EURO 2	1,86	8,17	9,39	10,63	12,50	14,29	16,08	17,81	19,49	21,19	22,63	24,87	29,07	31,96
EURO 3	0,34	2,40	3,55	4,63	5,84	7,03	8,22	9,31	10,51	11,77	13,26	14,88	16,10	17,40
EURO 4	0,11	1,50	2,22	2,98	3,71	4,46	5,20	5,92	6,64	7,39	8,25	9,11	10,03	10,80
EURO 5	0,04	0,89	1,51	2,14	2,77	3,47	4,07	4,71	5,35	6,00	6,65	7,32	8,00	8,69
EURO 6	0,05	0,87	1,49	2,13	2,76	3,45	4,05	4,69	5,34	5,98	6,63	7,29	7,90	8,64
Steigung -4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	8,66	31,67	33,00	35,00	37,95	39,91	42,90	46,62	51,00	58,52	65,37	71,23	77,87	87,84
EURO 1	5,70	23,26	23,68	25,86	28,50	29,90	32,40	35,45	40,20	45,01	49,16	54,41	59,20	65,17
EURO 2	1,86	8,20	9,48	11,24	13,07	14,76	16,44	18,32	20,93	23,56	26,35	28,79	30,71	34,15
EURO 3	0,34	2,40	3,57	4,85	6,09	7,40	8,70	10,08	11,80	12,73	13,60	14,90	16,10	17,40
EURO 4	0,11	1,50	2,23	2,99	3,76	4,53	5,29	6,13	7,00	7,69	8,65	9,44	10,16	10,80
EURO 5	0,04	0,89	1,53	2,17	2,82	3,53	4,11	4,75	5,35	6,09	6,70	7,43	8,09	8,69
EURO 6	0,05	0,87	1,50	2,15	2,80	3,50	4,07	4,71	5,34	6,06	6,74	7,41	8,07	8,64
Steigung -2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	8,66	32,00	33,00	39,81	46,58	51,56	56,54	59,30	63,30	67,80	72,02	80,62	95,52	121,91
EURO 1	5,70	23,30	23,70	27,50	33,54	37,46	41,38	43,61	46,94	50,80	53,56	60,62	68,63	85,73
EURO 2	1,86	8,30	10,93	12,20	14,87	17,21	19,54	20,94	23,47	25,46	27,33	30,55	33,45	39,75
EURO 3	0,34	2,50	3,95	5,13	6,56	7,85	9,00	10,10	11,85	13,02	13,65	14,90	16,15	17,44
EURO 4	0,11	1,50	2,51	3,13	3,92	4,76	5,60	6,39	7,12	8,01	8,73	9,50	10,20	10,83
EURO 5	0,04	0,92	1,53	2,21	2,84	3,55	4,21	4,87	5,49	6,17	6,70	7,51	8,13	8,69
EURO 6	0,05	0,88	1,50	2,19	2,82	3,52	4,16	4,83	5,47	6,14	6,77	7,48	8,10	8,64
Steigung 0%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	8,66	40,73	42,70	47,00	52,23	56,38	60,52	63,75	68,82	75,81	86,00	105,53	128,17	157,19
EURO 1	5,70	27,69	29,77	33,01	36,98	40,52	44,05	46,70	50,11	56,17	61,27	73,96	87,71	107,93
EURO 2	1,86	9,86	11,72	14,24	15,92	18,18	20,43	22,31	24,06	27,08	29,23	34,33	39,11	46,28
EURO 3	0,34	2,64	4,16	5,74	6,99	7,86	9,10	10,22	11,85	13,03	13,65	14,95	16,17	17,52



**Tabelle A.4:** Emissionsfaktoren für CO, LNF Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,11	1,58	2,51	3,29	4,09	4,90	5,71	6,40	7,40	8,01	8,79	9,51	10,22	10,85
EURO 5	0,04	0,92	1,55	2,26	2,93	3,66	4,23	4,87	5,49	6,22	6,72	7,51	8,15	8,69
EURO 6	0,05	0,89	1,53	2,23	2,90	3,63	4,20	4,84	5,52	6,18	6,81	7,48	8,10	8,64
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	8,66	40,90	47,86	51,63	56,10	60,04	63,97	70,96	79,02	90,96	115,02	137,83	160,95	179,31
EURO 1	5,70	27,70	32,76	36,14	39,75	42,78	45,81	51,51	55,86	63,45	80,84	96,57	112,00	124,98
EURO 2	1,86	9,90	12,70	14,74	17,02	18,85	20,68	23,57	25,63	29,65	36,11	41,17	47,30	52,93
EURO 3	0,34	2,71	4,63	5,74	6,99	7,87	9,11	10,54	11,90	13,04	13,67	14,95	16,31	17,77
EURO 4	0,11	1,61	2,54	3,29	4,09	4,92	5,75	6,50	7,40	8,01	8,79	9,52	10,23	10,88
EURO 5	0,04	0,92	1,63	2,26	2,93	3,66	4,24	4,92	5,49	6,23	6,72	7,51	8,15	8,69
EURO 6	0,05	0,89	1,59	2,25	2,90	3,63	4,24	4,88	5,52	6,20	6,81	7,48	8,10	8,66
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	8,66	41,81	48,84	54,09	57,59	64,04	70,49	82,00	98,45	115,20	138,37	161,97	180,61	195,04
EURO 1	5,70	28,32	33,50	37,73	40,72	45,61	50,49	56,93	68,34	80,41	96,68	110,99	125,02	135,35
EURO 2	1,86	10,44	12,76	15,35	17,21	19,72	22,23	24,78	29,14	33,75	39,75	46,79	52,06	56,37
EURO 3	0,34	3,13	4,63	5,76	7,00	7,87	9,13	10,54	11,91	13,04	13,72	15,11	16,58	17,98
EURO 4	0,11	1,76	2,54	3,41	4,09	4,93	5,76	6,51	7,40	8,02	8,80	9,52	10,25	11,03
EURO 5	0,04	0,94	1,63	2,29	2,93	3,66	4,26	4,92	5,49	6,23	6,72	7,52	8,15	8,70
EURO 6	0,05	0,91	1,61	2,26	2,90	3,63	4,24	4,88	5,53	6,20	6,82	7,48	8,10	8,68
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	8,66	44,94	50,34	55,36	62,84	73,70	84,55	102,97	119,50	142,17	163,74	181,66	198,19	214,61
EURO 1	5,70	30,11	34,51	38,36	43,20	49,73	56,26	68,64	80,60	97,66	111,65	125,02	136,38	147,69
EURO 2	1,86	10,82	13,34	15,55	17,87	20,83	23,78	28,54	33,09	39,42	45,93	50,99	55,54	60,24
EURO 3	0,34	3,35	4,65	5,80	7,00	7,88	9,15	10,55	11,92	13,04	13,88	15,38	16,77	18,17
EURO 4	0,11	1,76	2,59	3,45	4,34	5,05	5,76	6,51	7,42	8,02	8,80	9,53	10,28	11,14
EURO 5	0,04	0,97	1,63	2,30	3,00	3,75	4,30	4,92	5,50	6,23	6,74	7,52	8,15	8,74
EURO 6	0,05	0,93	1,61	2,27	2,96	3,70	4,25	4,88	5,53	6,20	6,82	7,48	8,10	8,71

Tabelle A.5: Emissionsfaktoren für PM, LNF Otto

EFa LNF Otto PM [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17
EURO 1	0,01	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
EURO 2	0,01	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
EURO 3	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
EURO 4	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
EURO 5	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
EURO 6	0,00	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,23	0,46	0,74
EURO 1	0,01	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,17	0,28	0,44
EURO 2	0,01	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	0,15	0,15	0,15	0,20	0,37	0,62
EURO 3	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,12	0,20
EURO 4	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,12
EURO 5	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,10
EURO 6	0,00	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,10
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,15	0,15	0,17	0,17	0,20	0,20	0,22	0,30	0,41	0,57	0,95	1,57	2,57
EURO 1	0,01	0,11	0,11	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,20	0,27	0,39	0,61	1,07	1,73
EURO 2	0,01	0,11	0,11	0,14	0,15	0,19	0,21	0,21	0,28	0,40	0,57	0,87	1,66	2,52
EURO 3	0,00	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,14	0,19	0,28	0,51	0,84
EURO 4	0,00	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,09	0,13	0,19	0,36	0,55
EURO 5	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,10	0,15	0,30	0,49
EURO 6	0,00	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,11	0,16	0,31	0,51
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,17	0,18	0,20	0,26	0,32	0,45	0,56	0,74	1,14	1,61	2,57	3,80	4,42
EURO 1	0,01	0,13	0,13	0,15	0,19	0,23	0,32	0,40	0,51	0,79	1,11	1,74	2,56	3,04
EURO 2	0,01	0,16	0,19	0,21	0,27	0,34	0,48	0,60	0,78	1,23	1,80	2,75	3,98	5,35
EURO 3	0,00	0,08	0,08	0,08	0,10	0,12	0,17	0,20	0,26	0,42	0,55	0,92	1,23	1,73

**Tabelle A.5:** Emissionsfaktoren für PM, LNF Otto (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,00	0,04	0,04	0,05	0,07	0,08	0,12	0,14	0,19	0,29	0,43	0,63	0,84	1,08
EURO 5	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,10	0,11	0,16	0,25	0,37	0,59	0,80	1,04
EURO 6	0,00	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,12	0,17	0,26	0,39	0,63	0,86	1,13
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,17	0,20	0,32	0,46	0,65	0,84	1,24	1,64	2,57	3,44	4,72	6,94	9,39
EURO 1	0,01	0,13	0,15	0,23	0,33	0,41	0,60	0,88	1,15	1,74	2,45	3,17	4,42	5,78
EURO 2	0,01	0,17	0,21	0,35	0,50	0,63	0,96	1,42	1,87	2,82	3,86	5,63	7,33	10,81
EURO 3	0,00	0,08	0,08	0,13	0,18	0,22	0,32	0,49	0,62	0,94	1,20	1,80	2,28	3,21
EURO 4	0,00	0,04	0,05	0,09	0,13	0,16	0,24	0,36	0,49	0,66	0,85	1,10	1,60	2,11
EURO 5	0,00	0,04	0,04	0,08	0,10	0,13	0,21	0,31	0,44	0,63	0,81	1,05	1,60	1,92
EURO 6	0,00	0,04	0,05	0,08	0,11	0,14	0,22	0,33	0,47	0,66	0,88	1,13	1,50	2,00
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,19	0,30	0,48	0,65	1,10	1,54	2,25	2,96	4,31	6,29	8,27	11,22	14,16
EURO 1	0,01	0,14	0,21	0,35	0,47	0,79	1,10	1,64	2,17	2,94	4,11	5,29	7,09	8,90
EURO 2	0,01	0,20	0,33	0,53	0,75	1,28	1,81	2,72	3,62	5,33	7,60	9,87	13,24	17,76
EURO 3	0,00	0,08	0,12	0,19	0,27	0,42	0,57	0,85	1,14	1,64	2,32	3,01	4,00	5,64
EURO 4	0,00	0,05	0,08	0,13	0,20	0,33	0,47	0,64	0,82	1,17	1,65	2,13	2,65	3,10
EURO 5	0,00	0,04	0,07	0,11	0,17	0,29	0,42	0,61	0,79	1,10	1,56	2,03	3,03	4,71
EURO 6	0,00	0,04	0,07	0,12	0,18	0,23	0,44	0,65	0,85	1,20	1,69	2,18	3,18	4,51
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,20	0,40	0,62	1,11	1,84	2,57	3,65	4,74	6,92	9,14	11,79	15,75	18,87
EURO 1	0,01	0,15	0,29	0,45	0,82	1,28	1,75	2,44	3,13	4,43	5,73	8,77	10,81	12,14
EURO 2	0,01	0,21	0,45	0,71	1,34	2,19	3,03	4,24	5,51	7,66	10,87	15,55	20,01	22,91
EURO 3	0,00	0,08	0,16	0,25	0,48	0,74	1,01	1,34	1,65	2,42	3,21	4,73	6,30	6,88
EURO 4	0,00	0,05	0,11	0,19	0,35	0,54	0,73	1,01	1,16	1,78	2,53	3,23	4,82	6,50
EURO 5	0,00	0,04	0,10	0,16	0,30	0,50	0,70	0,98	1,22	1,86	2,52	3,47	5,56	7,81
EURO 6	0,00	0,04	0,10	0,17	0,32	0,52	0,72	1,07	1,24	1,98	2,50	3,76	5,82	8,25

Tabelle A.6: Emissionsfaktoren für PM, LNF Diesel

EFa LNF Diesel PM [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard							Steigung -6%							
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,59	8,30	8,41	8,57	9,00	9,28	9,87	10,41	10,57	11,20	12,00	13,05	15,00	18,33
EURO 1	0,63	4,25	4,28	4,40	4,91	5,00	5,20	5,30	5,88	6,00	6,50	7,00	8,00	9,17
EURO 2	0,54	2,94	2,95	2,96	3,23	3,47	3,71	3,97	4,09	4,20	4,30	4,60	5,00	5,94
EURO 3	0,10	0,88	0,88	0,90	0,91	0,98	1,05	1,09	1,14	1,22	1,36	1,61	2,18	2,95
EURO 4	0,16	0,70	1,25	1,30	1,43	1,54	1,64	1,77	1,87	1,95	1,99	2,14	2,58	2,97
EURO 5	0,02	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,11	0,11
EURO 6	0,02	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11
v [km/h]: Standard							Steigung -4%							
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,59	8,30	8,62	8,76	9,02	9,30	10,09	10,88	11,41	12,10	14,00	18,05	23,44	29,23
EURO 1	0,63	4,30	4,35	4,45	4,98	5,00	5,20	5,37	5,88	6,06	7,00	9,21	12,11	16,45
EURO 2	0,54	2,94	2,95	3,00	3,31	3,51	3,72	4,00	4,10	4,25	4,70	5,95	7,45	9,29
EURO 3	0,10	0,90	0,92	1,01	1,09	1,36	1,40	1,42	1,68	1,87	2,34	3,01	3,96	5,32
EURO 4	0,16	0,70	1,28	1,32	1,45	1,82	1,85	1,89	2,17	2,28	2,39	3,01	3,96	4,66
EURO 5	0,02	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14
EURO 6	0,02	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14
v [km/h]: Standard							Steigung -2%							
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,59	8,50	9,11	9,38	10,75	12,00	12,55	13,66	16,11	18,66	22,31	27,19	32,81	38,14
EURO 1	0,63	4,97	5,20	5,25	5,57	5,90	6,28	6,71	8,30	9,66	11,71	15,14	19,47	23,28
EURO 2	0,54	3,20	3,25	3,29	3,78	4,10	4,27	4,48	5,45	5,88	7,29	8,87	10,69	12,23
EURO 3	0,10	0,90	1,23	1,36	1,55	1,93	2,00	2,27	2,67	3,15	3,87	5,07	6,44	8,18
EURO 4	0,16	0,74	1,40	1,55	1,69	2,05	2,11	2,43	2,74	3,03	3,84	4,48	5,38	6,51
EURO 5	0,02	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,14	0,15	0,24
EURO 6	0,02	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15	0,24
v [km/h]: Standard							Steigung 0%							
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,59	9,60	10,49	11,69	12,67	14,85	17,04	19,26	22,46	26,21	30,89	35,72	41,55	48,07
EURO 1	0,63	5,00	5,46	5,86	6,30	7,62	8,94	10,12	12,07	14,59	18,23	21,51	25,71	30,00
EURO 2	0,54	3,30	3,70	3,89	4,25	4,94	5,64	6,24	7,44	8,64	10,13	11,58	13,40	15,37
EURO 3	0,10	1,27	1,45	1,71	2,05	2,45	2,84	3,29	3,93	4,92	5,86	7,32	8,55	9,85

**Tabelle A.6:** Emissionsfaktoren für PM, LNF Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,16	1,20	1,61	1,84	2,23	2,49	2,74	3,35	3,68	4,36	5,07	5,97	6,70	7,62
EURO 5	0,02	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15	0,19	0,22	0,33
EURO 6	0,02	0,05	0,05	0,06	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15	0,19	0,21	0,31
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,59	9,62	11,71	13,76	16,36	19,11	21,82	25,28	29,40	33,03	37,56	43,78	49,97	56,64
EURO 1	0,63	5,07	5,88	7,05	8,62	10,20	11,82	14,20	17,32	20,34	22,92	26,97	30,92	34,77
EURO 2	0,54	3,38	3,91	4,65	5,45	6,50	7,29	8,38	9,58	10,86	12,20	14,20	16,22	18,53
EURO 3	0,10	1,48	1,83	2,29	2,65	3,31	3,81	4,74	5,54	6,83	8,20	9,17	10,20	11,19
EURO 4	0,16	1,26	1,70	2,17	2,58	3,23	3,52	4,20	4,82	5,50	6,37	7,17	8,00	9,04
EURO 5	0,02	0,05	0,06	0,07	0,10	0,10	0,10	0,12	0,13	0,17	0,24	0,29	0,31	0,39
EURO 6	0,02	0,05	0,06	0,07	0,10	0,10	0,10	0,12	0,13	0,17	0,19	0,26	0,31	0,39
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,59	10,45	12,86	16,31	19,33	23,50	26,81	31,00	35,11	39,56	45,09	51,60	57,69	62,28
EURO 1	0,63	5,37	6,51	8,62	10,33	12,91	15,69	18,56	21,49	24,61	28,37	31,23	35,43	38,35
EURO 2	0,54	3,67	4,30	5,39	6,30	7,87	8,87	10,24	11,49	12,96	14,67	16,62	18,91	20,47
EURO 3	0,10	1,65	2,15	2,62	3,35	4,19	5,05	6,15	7,21	8,29	9,40	10,46	11,58	12,70
EURO 4	0,16	1,45	1,98	2,52	3,27	4,09	4,39	5,09	6,00	6,49	7,27	8,28	9,33	10,57
EURO 5	0,02	0,05	0,07	0,07	0,10	0,11	0,12	0,15	0,20	0,22	0,31	0,34	0,40	0,46
EURO 6	0,02	0,05	0,07	0,07	0,10	0,11	0,12	0,15	0,20	0,22	0,29	0,34	0,40	0,46
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,59	11,26	14,91	18,56	23,13	28,00	31,54	36,07	40,85	46,10	52,82	58,66	64,00	69,30
EURO 1	0,63	5,66	7,86	9,86	12,95	16,19	19,16	22,88	25,67	28,50	32,10	36,07	39,35	42,61
EURO 2	0,54	3,71	5,11	6,01	7,62	9,20	10,35	11,69	13,31	15,03	16,98	19,19	20,88	22,66
EURO 3	0,10	1,68	2,37	3,21	4,07	5,09	6,40	7,85	8,51	9,63	10,61	11,85	12,90	13,99
EURO 4	0,16	1,56	2,32	3,08	3,72	4,65	5,15	6,14	6,70	7,53	8,45	9,48	10,67	11,55
EURO 5	0,02	0,06	0,07	0,08	0,11	0,13	0,16	0,21	0,25	0,31	0,36	0,41	0,47	0,51
EURO 6	0,02	0,06	0,07	0,08	0,11	0,12	0,14	0,18	0,23	0,30	0,35	0,41	0,46	0,50

## B Emissionsfaktoren für PKW

**Tabelle A.7:** Basis-Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, PKW Otto

EFa PKW Otto NO <sub>x</sub> [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
10	3,3	3,4	2,4	3,1	3,9	4,2	4,6
20	3,6	3,7	3,2	4,3	5,1	5,7	6,3
30	3,8	4,3	4,1	5,2	6,3	7,0	8,0
40	4,2	4,7	5,4	6,2	7,4	8,7	10,1
50	4,6	5,2	6,0	7,1	8,5	10,4	12,3
60	4,8	5,3	6,3	7,8	9,6	12,0	14,8
70	5,0	5,5	6,6	8,5	10,7	13,9	17,6
80	5,1	5,6	7,2	9,2	12,1	16,3	20,7
90	5,3	5,8	7,7	10,3	13,9	18,7	23,7
100	5,5	6,0	8,3	11,7	16,6	21,9	27,1
110	5,7	6,4	9,4	14,0	19,3	25,0	30,9
120	6,2	7,3	11,2	16,3	22,5	29,0	35,4
130	7,0	8,8	15,1	21,3	27,1	33,7	40,4

**Tabelle A.8:** Basis-Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, PKW Diesel

EFa PKW Diesel NO <sub>x</sub> [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
10	12,9	16,9	10,2	19,1	18,1	21,0	23,7
20	12,9	13,1	12,2	19,3	22,8	25,7	29,8
30	11,0	13,2	13,4	20,8	25,2	30,8	36,4
40	10,1	12,9	14,6	23,8	29,3	36,5	46,8
50	10,2	13,0	18,0	26,0	31,8	44,6	59,9
60	10,2	13,5	20,0	28,8	40,2	57,0	75,4
70	9,6	13,3	20,9	31,9	47,7	69,4	93,3
80	9,1	13,6	21,8	35,8	58,1	82,9	120,0
90	8,9	14,3	25,8	43,3	70,2	105,1	149,2
100	9,3	16,0	30,2	53,4	84,9	131,8	184,3
110	10,1	19,0	35,7	66,7	109,8	166,2	230,1
120	11,1	23,4	47,4	84,4	139,9	204,5	276,5
130	13,3	30,7	63,3	112,3	177,6	257,4	323,5

**Tabelle A.9:** Basis-Emissionsfaktoren für CO, PKW Otto

EFa PKW Otto CO [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
10	37,5	26,0	28,1	30,1	32,9	35,9	39,4
20	38,7	46,3	37,1	42,8	49,8	56,0	60,6
30	49,5	55,9	48,2	56,0	66,9	73,5	81,7
40	58,9	62,8	65,5	71,9	82,8	93,7	114,4
50	68,6	72,0	76,9	85,3	98,1	121,4	155,0
60	71,3	77,4	82,8	92,5	104,9	137,9	192,5
70	75,2	81,5	87,5	98,9	112,5	155,6	233,9
80	79,4	85,5	92,3	106,8	121,8	179,4	303,6
90	83,2	89,3	97,1	112,8	137,2	225,7	397,6
100	87,5	94,7	102,5	123,7	171,1	304,1	551,7
110	93,5	102,4	113,0	157,0	258,7	491,9	953,3
120	107,2	126,0	150,7	218,6	417,4	876,0	1602,6
130	135,7	176,0	217,6	349,4	673,5	1506,9	2521,4

**Tabelle A.10:** Basis-Emissionsfaktoren für CO, PKW Diesel

EFa PKW Diesel CO [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
10	2,6	2,8	2,6	2,8	3,3	3,6	3,8
20	3,9	3,8	4,3	4,6	4,9	4,9	5,0
30	4,8	5,1	5,3	5,6	6,0	6,1	6,3
40	5,9	6,2	6,4	6,8	7,3	7,4	7,7
50	7,0	7,3	7,8	8,1	8,4	8,6	9,0
60	7,1	7,3	7,9	8,2	8,4	8,7	9,1
70	7,2	7,4	8,0	8,3	8,5	8,8	9,2
80	7,2	7,4	8,0	8,3	8,6	8,8	9,3
90	7,2	7,5	8,1	8,4	8,7	8,9	9,5
100	7,2	7,5	8,2	8,4	8,7	9,0	9,6
110	7,3	7,6	8,3	8,5	8,8	9,2	9,8
120	7,3	7,7	8,3	8,6	9,0	9,5	10,2
130	7,4	7,9	8,5	8,8	9,3	9,9	10,6

**Tabelle A.11:** Basis-Emissionsfaktoren für Trübe, PKW Otto

EFa PKW Otto Trübe [m <sup>2</sup> /h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
20	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4
30	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
40	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8
50	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9
60	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	1,0	1,8
70	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	1,6	2,1
80	0,2	0,2	0,3	0,5	1,1	1,9	3,2
90	0,2	0,2	0,3	0,7	1,7	2,7	3,9
100	0,2	0,3	0,4	1,0	2,0	3,6	5,4
110	0,2	0,3	0,6	1,7	3,1	4,9	6,5
120	0,2	0,4	0,9	2,1	3,8	6,1	8,9
130	0,4	0,5	1,7	3,4	5,6	8,1	11,9

**Tabelle A.12:** Basis-Emissionsfaktoren für Trübe, PKW Diesel

EFa PKW Diesel Trübe [m <sup>2</sup> /h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	4,5	5,5	3,4	4,7	4,7	5,1	5,4
20	6,3	6,8	6,1	6,7	7,5	7,9	8,3
30	7,2	7,6	7,4	8,0	9,0	9,6	10,2
40	7,1	7,6	7,9	8,3	9,5	10,2	11,4
50	8,2	8,6	9,2	9,6	11,0	12,0	13,7
60	10,1	10,4	11,2	12,3	13,4	15,0	16,9
70	11,4	11,8	12,9	14,1	15,4	17,6	19,9
80	12,8	13,3	14,4	16,0	18,0	20,1	22,7
90	14,2	14,9	16,2	17,9	20,3	22,9	25,3
100	15,6	16,6	18,2	20,3	22,7	25,7	28,2
110	17,1	18,3	20,2	22,7	25,3	28,6	31,0
120	18,6	20,3	22,5	25,6	28,5	31,8	34,2
130	20,6	22,5	26,0	29,7	32,1	35,0	37,9



**Tabelle A.13:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, PKW Otto

EFa PKW Otto NO <sub>x</sub> [g/h] 2015														
Steigung -6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,18	30,29	25,85	26,03	27,59	28,07	29,87	32,07	34,56	36,72	38,92	45,32	56,04	75,78
EURO 1	0,76	23,78	24,46	22,56	24,17	26,21	28,18	30,41	32,17	34,57	36,87	39,00	42,58	47,88
EURO 2	0,96	13,93	15,49	14,89	15,40	15,94	16,13	16,81	16,96	17,21	18,26	19,14	21,30	25,47
EURO 3	0,30	3,38	3,02	3,13	3,29	3,44	3,69	3,92	4,16	4,38	4,52	4,83	5,10	5,92
EURO 4	0,23	2,24	2,48	2,65	3,08	3,45	3,60	3,70	3,80	3,90	4,00	4,10	4,30	4,80
EURO 5	0,08	1,14	1,61	1,96	2,31	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
EURO 6	0,06	1,12	1,53	1,85	2,12	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
Steigung -4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,18	38,41	29,94	29,18	30,25	32,05	34,04	36,17	38,99	40,29	43,84	56,46	87,29	128,42
EURO 1	0,76	33,00	25,85	27,55	28,09	30,54	32,46	34,33	36,40	38,93	41,86	43,89	46,32	51,88
EURO 2	0,96	14,25	14,99	17,05	17,48	18,93	19,31	19,37	19,48	19,57	21,19	23,25	26,57	37,21
EURO 3	0,30	1,90	3,60	3,42	3,67	3,93	4,20	4,53	4,86	5,16	5,41	5,85	6,48	8,15
EURO 4	0,23	1,57	2,72	3,22	3,52	3,85	3,90	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,70	5,30
EURO 5	0,08	0,93	1,52	1,98	2,44	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84
EURO 6	0,06	0,91	1,45	1,83	2,26	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
Steigung -2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,18	12,80	21,40	26,21	35,72	38,88	40,57	47,64	63,84	79,54	102,95	144,20	199,45	300,94
EURO 1	0,76	14,79	20,26	24,57	33,30	37,45	39,99	42,40	45,90	48,35	50,01	55,20	65,16	99,74
EURO 2	0,96	9,56	14,54	17,22	21,86	22,97	24,79	25,23	26,42	27,50	28,19	30,76	34,24	51,53
EURO 3	0,30	3,13	2,89	3,57	4,43	4,59	4,77	4,93	5,33	5,83	6,31	7,16	8,21	9,70
EURO 4	0,23	2,47	2,40	2,95	4,13	4,38	4,87	5,06	5,51	5,83	6,12	6,73	7,86	8,85
EURO 5	0,08	0,93	1,47	2,01	2,64	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07
EURO 6	0,06	0,91	1,40	1,91	2,46	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91
Steigung 0%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,18	38,72	40,88	45,48	57,36	70,12	80,75	98,08	123,41	157,94	204,24	291,31	373,96	549,84
EURO 1	0,76	22,09	28,63	35,27	41,03	46,20	53,89	60,25	64,49	71,03	78,75	87,94	102,04	128,72
EURO 2	0,96	14,88	18,77	20,76	22,27	25,88	27,30	29,50	30,27	33,63	38,04	43,92	49,42	65,38
EURO 3	0,30	2,34	3,17	3,92	4,43	4,74	5,44	5,89	6,12	6,85	7,36	8,07	8,99	11,06

**Tabelle A.13:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, PKW Otto (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,23	1,81	2,86	3,78	4,19	4,64	5,26	5,74	6,07	6,48	7,16	7,92	8,87	10,47
EURO 5	0,08	0,99	1,74	2,17	2,78	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
EURO 6	0,06	0,98	1,71	2,16	2,65	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,18	40,62	52,33	68,73	83,13	102,19	131,21	162,86	206,29	276,32	368,97	465,83	570,00	690,00
EURO 1	0,76	27,62	33,94	41,71	48,09	57,75	66,09	74,93	85,87	95,36	114,14	129,05	143,13	171,07
EURO 2	0,96	16,45	20,48	23,09	24,97	27,44	30,25	34,35	38,03	41,95	48,65	57,34	68,03	89,25
EURO 3	0,30	3,28	4,05	4,63	5,01	5,58	6,07	6,69	7,28	7,89	8,60	9,39	10,44	13,54
EURO 4	0,23	2,62	3,59	4,41	5,20	5,74	6,37	6,68	7,05	7,82	8,37	9,25	11,08	13,66
EURO 5	0,08	1,35	1,92	2,40	2,94	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35
EURO 6	0,06	1,33	1,87	2,32	2,78	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,18	44,07	67,91	87,83	114,25	150,58	190,94	250,78	330,00	411,60	523,00	630,00	750,00	870,00
EURO 1	0,76	28,71	39,31	46,50	60,24	70,90	83,63	96,00	112,11	126,28	145,65	159,44	170,74	186,76
EURO 2	0,96	18,23	21,85	23,47	26,97	31,22	33,31	37,63	42,06	49,96	58,40	71,75	97,14	121,90
EURO 3	0,30	3,59	4,32	4,68	5,41	6,27	7,20	8,15	9,23	10,56	12,07	13,44	15,53	18,82
EURO 4	0,23	2,94	3,94	4,78	6,05	7,20	8,30	9,44	10,35	11,24	12,14	13,45	15,54	19,34
EURO 5	0,08	1,41	1,99	2,53	2,98	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41
EURO 6	0,06	1,42	1,95	2,43	2,81	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	1,18	52,96	79,75	110,34	153,87	203,25	282,16	369,70	463,94	550,00	660,00	780,00	910,00	1.060,00
EURO 1	0,76	32,08	43,49	56,97	69,54	85,21	102,55	120,46	139,65	155,54	167,87	180,76	195,23	210,55
EURO 2	0,96	19,36	22,76	25,69	30,35	36,72	40,53	48,00	59,51	71,00	88,17	107,13	128,63	145,79
EURO 3	0,30	3,74	4,43	5,09	6,02	7,44	8,24	9,17	10,10	12,34	15,29	17,61	19,88	23,83
EURO 4	0,23	3,15	4,26	5,51	7,05	8,25	9,47	10,93	12,52	14,26	15,71	17,76	20,95	25,08
EURO 5	0,08	1,52	2,10	2,57	3,01	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41
EURO 6	0,06	1,52	2,03	2,44	2,79	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15

**Tabelle A.14:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, PKW Diesel

EFa PKW Diesel NO <sub>x</sub> [g/h] 2015														
Steigung -6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,57	20,91	16,13	14,14	13,28	12,38	12,30	12,30	12,30	12,30	12,30	12,30	14,99	24,79
EURO 1	4,88	16,41	12,45	10,72	10,09	9,58	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	12,34	16,12
EURO 2	5,67	17,82	15,25	12,89	11,74	11,68	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,95	16,70
EURO 3	4,37	18,02	15,27	12,43	12,59	12,15	11,83	11,04	10,48	10,42	11,02	12,03	12,88	15,34
EURO 4	5,96	12,73	11,46	9,67	8,84	8,86	8,88	8,19	7,69	7,51	7,81	8,54	9,63	10,97
EURO 5	3,45	12,58	13,67	11,67	10,43	10,68	10,77	10,03	9,43	9,21	9,63	10,50	11,77	13,99
EURO 6	1,61	5,03	5,72	5,42	5,21	5,42	5,66	5,63	5,60	5,58	5,61	5,65	5,70	6,09
Steigung -4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,57	29,11	21,27	19,33	18,75	17,56	17,26	17,67	18,01	20,71	23,56	29,23	40,86	53,96
EURO 1	4,88	20,54	16,75	16,32	14,13	13,39	12,07	12,18	12,90	15,72	17,30	23,10	29,73	37,97
EURO 2	5,67	19,95	17,88	17,96	16,07	16,05	14,16	14,13	14,85	17,70	20,20	22,73	30,33	38,88
EURO 3	4,37	22,63	17,70	17,35	15,87	15,09	15,04	14,93	15,34	17,39	20,10	22,78	29,16	37,87
EURO 4	5,96	18,20	13,40	12,77	12,33	12,27	12,19	12,10	12,22	13,78	15,54	17,55	20,62	25,20
EURO 5	3,45	16,02	13,01	13,21	13,33	13,71	14,50	14,21	14,53	14,70	16,08	19,46	23,86	31,94
EURO 6	1,61	11,13	4,85	5,19	5,34	5,21	6,25	6,23	6,25	6,08	8,20	10,24	11,25	13,60
Steigung -2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,57	14,16	19,59	19,34	22,86	24,25	26,14	31,26	34,75	40,66	49,07	62,29	80,32	109,62
EURO 1	4,88	9,65	13,88	14,65	17,89	19,89	18,88	22,45	24,36	30,05	35,28	45,09	59,61	79,70
EURO 2	5,67	11,21	15,23	16,66	18,37	23,10	23,21	24,89	27,20	31,92	37,01	45,70	60,17	80,72
EURO 3	4,37	13,72	14,52	15,62	18,52	22,21	23,13	25,50	27,47	30,91	37,57	46,28	60,34	85,91
EURO 4	5,96	9,01	11,70	12,08	12,51	16,00	17,29	18,70	20,49	23,38	26,40	29,78	39,27	52,75
EURO 5	3,45	10,36	12,72	14,19	15,20	18,71	21,43	21,90	22,39	27,11	31,77	37,19	49,58	64,66
EURO 6	1,61	5,20	4,75	5,19	5,57	7,04	8,98	9,20	9,40	9,61	10,71	12,23	16,61	24,39
Steigung 0%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,57	27,06	26,50	29,65	33,78	39,02	41,81	48,85	57,76	69,83	83,69	103,00	132,88	178,76
EURO 1	4,88	18,60	19,16	21,44	24,34	28,61	31,37	35,75	42,34	51,63	63,88	79,00	100,73	135,56
EURO 2	5,67	21,51	22,07	24,11	27,42	30,47	34,72	38,12	44,19	53,35	65,74	82,00	103,35	139,23
EURO 3	4,37	22,64	20,38	24,55	28,32	30,28	34,95	38,68	45,36	54,80	67,07	86,00	113,69	153,64

**Tabelle A.14:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, PKW Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	5,96	17,39	16,92	19,29	22,39	23,36	25,47	27,70	30,65	36,94	46,68	56,54	69,00	88,16
EURO 5	3,45	20,38	21,08	22,06	25,18	27,67	30,42	33,79	37,61	45,46	55,80	69,23	87,00	114,99
EURO 6	1,61	7,54	7,74	7,95	8,98	9,90	10,34	11,57	12,36	15,28	19,68	26,29	33,89	49,07
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,57	26,68	33,22	40,13	45,32	52,92	61,56	73,10	87,18	105,00	128,35	161,00	198,42	248,66
EURO 1	4,88	19,56	24,47	29,86	33,29	39,80	45,77	54,92	66,53	81,00	98,32	126,00	154,90	197,69
EURO 2	5,67	21,74	27,48	32,01	37,20	42,60	47,72	56,96	69,26	84,00	101,59	127,00	155,51	209,55
EURO 3	4,37	21,32	27,68	31,11	36,70	41,32	49,89	59,09	74,35	94,67	113,85	150,30	188,25	241,46
EURO 4	5,96	15,85	21,21	22,02	25,21	26,56	34,45	41,35	51,62	58,57	70,04	89,16	108,45	133,65
EURO 5	3,45	19,18	23,87	26,43	30,69	32,98	42,55	50,29	60,39	72,47	87,64	112,64	144,92	182,65
EURO 6	1,61	7,29	8,49	9,46	10,42	11,19	14,26	17,11	22,47	27,43	34,67	48,28	66,48	88,83
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,57	30,20	39,73	47,27	58,00	71,19	82,70	106,51	123,87	153,78	191,72	227,82	270,58	310,36
EURO 1	4,88	22,04	29,50	34,94	43,37	53,80	63,94	80,27	93,17	120,22	146,61	181,88	215,93	247,94
EURO 2	5,67	24,78	31,66	37,77	45,59	56,13	66,81	84,66	99,04	127,45	150,33	189,05	233,32	278,61
EURO 3	4,37	25,13	31,16	38,06	46,36	56,89	71,04	92,78	109,59	141,32	175,11	224,43	278,70	339,10
EURO 4	5,96	19,58	22,53	26,39	30,69	37,88	50,69	58,09	68,86	86,34	101,98	130,07	152,95	188,87
EURO 5	3,45	22,14	27,06	32,46	38,24	46,64	59,73	71,60	86,00	107,90	136,89	170,73	209,05	262,89
EURO 6	1,61	8,02	9,66	11,09	12,66	15,82	22,18	27,23	33,75	46,08	61,69	84,54	116,28	179,63
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,57	33,17	43,51	56,58	72,50	90,34	115,90	143,00	173,90	207,00	247,18	285,58	324,33	360,58
EURO 1	4,88	24,41	32,26	42,27	54,98	69,47	87,06	103,07	135,05	158,37	198,56	230,21	258,60	286,34
EURO 2	5,67	27,49	36,23	44,79	57,36	72,82	93,00	109,56	141,71	175,00	213,60	250,30	296,22	336,08
EURO 3	4,37	28,13	36,37	45,70	58,62	79,09	98,74	122,73	161,35	200,24	249,73	309,28	363,00	423,46
EURO 4	5,96	22,03	25,91	30,74	40,13	51,82	62,21	77,54	95,83	120,31	138,97	170,62	205,39	239,79
EURO 5	3,45	25,04	31,62	38,41	49,20	61,65	78,43	96,73	123,63	153,24	188,17	234,83	280,42	326,22
EURO 6	1,61	8,93	10,78	12,74	16,75	23,88	29,28	40,32	54,62	73,36	105,00	148,71	207,16	264,50

**Tabelle A.15:** Emissionsfaktoren für CO, PKW Otto

EFa PKW Otto CO [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	261,67	537,09	553,20	570,72	591,06	632,39	645,84	680,95	706,38	736,66	757,49	799,04	893,26	1.193,28
EURO 1	2,20	75,20	85,94	95,89	117,10	138,41	151,07	160,59	176,03	196,96	208,26	229,18	263,09	348,53
EURO 2	1,28	47,07	57,05	68,84	86,28	103,68	108,02	114,85	119,74	124,62	135,10	145,33	191,14	302,96
EURO 3	1,20	45,20	41,77	51,80	64,50	77,53	80,58	87,66	94,67	97,86	102,56	107,14	119,82	141,61
EURO 4	1,58	37,33	30,91	43,45	50,46	57,69	59,35	63,79	69,81	73,81	79,72	85,30	95,90	120,63
EURO 5	0,78	21,58	24,48	33,31	42,17	50,79	53,10	55,07	57,02	59,04	61,10	65,46	75,91	89,83
EURO 6	0,64	10,31	18,96	34,66	43,49	52,47	53,61	55,54	56,45	58,48	60,60	63,96	70,17	88,66
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	261,67	565,56	588,26	651,89	679,41	741,87	774,92	798,85	822,47	847,57	867,40	892,48	1.046,98	1.474,30
EURO 1	2,20	86,18	96,96	115,64	129,25	151,44	170,62	180,58	198,25	209,21	226,24	257,05	296,85	424,21
EURO 2	1,28	44,50	63,53	78,60	92,26	109,87	111,07	121,19	126,51	132,31	146,65	168,86	265,96	402,90
EURO 3	1,20	24,86	56,89	59,34	69,98	81,81	86,23	100,24	111,65	117,26	121,31	136,40	151,17	197,60
EURO 4	1,58	15,34	47,03	55,07	54,19	58,32	64,28	69,25	73,79	78,84	84,30	89,90	116,64	172,03
EURO 5	0,78	11,43	26,69	33,91	43,04	51,68	55,76	57,67	59,44	61,16	65,17	70,97	85,40	112,39
EURO 6	0,64	10,31	20,05	35,26	44,50	53,11	55,94	56,89	57,82	61,33	64,03	67,94	75,55	102,27
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	261,67	586,65	610,21	667,80	798,19	862,01	891,01	920,12	948,41	952,61	971,19	980,07	1.261,18	1.719,79
EURO 1	2,20	80,57	84,45	94,45	136,34	173,44	185,16	196,31	211,20	228,38	246,24	291,69	368,89	565,28
EURO 2	1,28	33,20	53,22	67,14	109,34	120,27	128,96	137,53	147,28	162,50	183,10	226,23	397,52	619,38
EURO 3	1,20	33,13	35,33	51,25	75,45	87,29	94,70	109,21	123,18	130,44	139,56	160,14	196,61	243,89
EURO 4	1,58	22,09	27,02	37,24	51,46	59,85	66,53	72,30	78,40	84,85	90,13	96,60	141,85	217,98
EURO 5	0,78	11,43	21,94	31,62	43,86	53,73	58,16	60,52	62,37	64,58	68,05	76,86	93,94	129,97
EURO 6	0,64	10,31	22,73	32,71	44,39	55,09	57,37	59,20	61,48	64,96	67,33	69,15	83,72	114,34
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	261,67	592,68	649,93	734,32	832,82	889,62	943,60	1.003,52	1.076,14	1.104,89	1.167,65	1.342,96	1.672,90	2.450,00
EURO 1	2,20	85,92	95,21	132,25	172,80	203,42	223,07	230,24	247,13	269,56	300,93	380,60	543,72	868,72
EURO 2	1,28	40,98	61,63	93,99	112,77	138,05	173,32	190,67	233,74	266,14	295,22	432,12	664,96	1.273,05
EURO 3	1,20	34,60	42,80	66,27	81,01	105,82	130,23	136,51	148,30	168,45	196,84	236,48	302,87	426,80

Tabelle A.15: Emissionsfaktoren für CO, PKW Otto (Fortsetzung)

EURO 4	1,58	22,71	31,68	43,36	58,34	68,49	73,75	82,60	88,87	93,02	106,40	121,88	181,26	321,41
EURO 5	0,78	13,14	26,71	35,11	47,49	59,54	62,88	66,04	70,07	72,39	76,65	108,86	150,52	217,61
EURO 6	0,64	14,36	26,59	37,12	49,77	56,51	58,58	60,48	63,77	69,94	76,68	84,11	103,57	175,11
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	261,67	637,32	751,74	891,80	977,24	1.065,43	1.110,11	1.185,11	1.270,23	1.377,91	1.490,56	1.904,73	2.971,48	4.200,00
EURO 1	2,20	84,37	122,46	173,28	219,50	234,60	246,81	255,42	298,40	373,19	429,99	605,33	943,85	1.349,94
EURO 2	1,28	46,84	78,88	110,74	141,82	180,28	208,09	241,07	276,54	317,31	413,10	811,68	1.465,37	2.515,75
EURO 3	1,20	35,43	57,90	81,64	103,60	131,77	158,98	180,54	209,47	247,28	305,47	390,45	627,00	891,34
EURO 4	1,58	23,25	36,97	50,61	64,04	77,73	82,16	88,91	96,51	115,93	169,06	226,16	381,87	712,76
EURO 5	0,78	16,16	29,26	41,30	53,30	65,01	68,40	71,67	74,18	78,14	94,79	165,47	257,44	398,36
EURO 6	0,64	16,77	30,55	42,10	54,31	66,51	73,25	79,31	85,37	91,19	99,02	163,38	231,34	323,11
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	261,67	659,17	832,89	938,91	1.055,91	1.213,54	1.398,23	1.517,65	1.676,94	1.824,51	2.300,00	2.865,58	3.846,91	5.314,45
EURO 1	2,20	85,90	150,11	202,91	252,98	358,64	374,91	387,81	431,04	547,56	760,00	1.182,26	1.829,68	2.574,13
EURO 2	1,28	54,45	92,66	127,65	176,22	240,83	269,18	378,01	472,89	636,00	950,00	1.536,71	2.669,41	4.634,85
EURO 3	1,20	39,44	68,09	93,04	128,60	175,65	202,26	237,37	286,25	352,42	520,00	841,60	1.354,15	2.232,96
EURO 4	1,58	25,70	41,43	55,92	72,45	93,93	96,84	98,98	117,39	179,76	278,23	470,58	827,41	1.383,46
EURO 5	0,78	18,63	32,18	44,95	59,76	78,77	95,85	111,09	126,63	149,48	177,54	310,31	648,47	1.221,42
EURO 6	0,64	19,85	32,98	46,24	60,67	79,62	96,68	118,08	133,55	157,02	190,57	289,66	441,34	790,91
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	261,67	698,55	858,62	980,84	1.243,91	1.436,15	1.664,46	1.910,29	2.370,50	2.889,14	3.550,00	4.499,85	5.991,41	7.404,09
EURO 1	2,20	102,01	171,74	228,67	346,79	421,35	519,32	599,31	672,47	878,24	1.302,94	1.935,07	2.808,89	3.712,03
EURO 2	1,28	62,17	104,71	155,54	229,34	316,73	394,09	578,36	797,81	1.210,03	1.897,24	3.389,91	4.943,04	6.371,92
EURO 3	1,20	45,41	75,89	113,25	167,17	231,97	254,92	317,81	374,40	500,83	890,54	1.649,44	2.542,88	3.263,42
EURO 4	1,58	28,20	45,38	62,68	86,91	132,58	152,53	179,94	257,13	360,95	513,87	1.016,01	1.730,32	2.725,39
EURO 5	0,78	20,45	34,81	50,05	71,36	98,87	136,24	166,47	215,14	265,06	339,96	582,46	1.123,71	1.998,93
EURO 6	0,64	21,72	35,75	50,98	72,18	97,27	124,07	153,37	187,75	231,48	315,97	492,23	809,16	1.510,00

**Tabelle A.16:** Emissionsfaktoren für CO, PKW Diesel

EFa PKW Diesel CO [g/h] 2015														
Steigung -6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	2,74	37,02	33,59	32,54	34,56	36,33	37,05	38,65	39,95	40,36	41,92	43,20	46,88	54,32
EURO 1	2,15	19,15	18,65	19,71	21,89	24,71	26,69	30,11	31,75	32,87	33,46	34,94	36,42	42,19
EURO 2	3,92	8,41	10,31	12,16	13,97	16,37	16,37	16,37	16,37	16,37	16,37	16,37	16,37	16,37
EURO 3	0,67	3,33	5,38	6,77	8,60	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27
EURO 4	0,24	2,06	3,37	4,28	5,43	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50
EURO 5	0,02	1,69	2,83	3,57	4,51	5,39	5,39	5,39	5,39	5,39	5,39	5,39	5,39	5,39
EURO 6	0,19	1,74	2,80	3,79	4,73	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Steigung -4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	2,74	47,05	40,10	39,70	42,02	43,17	45,99	47,61	50,65	54,23	59,71	65,84	76,02	84,82
EURO 1	2,15	23,51	22,16	22,36	25,28	27,57	29,16	32,25	33,41	35,77	36,51	37,84	44,44	52,74
EURO 2	3,92	10,49	10,73	13,23	15,07	17,48	17,48	17,48	17,48	17,48	17,48	17,48	17,48	17,48
EURO 3	0,67	2,75	5,15	7,21	8,96	10,69	10,69	10,69	10,69	10,69	10,69	10,69	10,69	10,69
EURO 4	0,24	1,84	3,16	4,42	5,55	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62
EURO 5	0,02	1,72	2,66	3,77	4,66	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53
EURO 6	0,19	1,86	2,61	3,55	4,58	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55
Steigung -2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	2,74	27,25	36,99	38,12	39,16	39,87	40,37	45,55	52,19	56,34	61,92	69,45	76,50	90,11
EURO 1	2,15	24,44	23,92	24,30	26,89	29,09	31,95	34,54	37,42	39,52	42,65	45,91	49,82	57,17
EURO 2	3,92	6,80	10,39	13,09	15,58	19,02	19,02	19,02	19,02	19,02	19,02	19,02	19,02	19,02
EURO 3	0,67	3,31	6,22	8,01	9,43	11,52	11,52	11,52	11,52	11,52	11,52	11,52	11,52	11,52
EURO 4	0,24	2,23	3,64	4,66	5,79	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
EURO 5	0,02	1,66	3,07	3,85	4,86	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04
EURO 6	0,19	1,43	2,41	3,50	4,54	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62
Steigung 0%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	2,74	42,69	41,30	46,41	51,03	56,25	58,97	61,79	67,21	72,51	77,78	86,04	98,66	120,96
EURO 1	2,15	17,43	22,14	26,66	29,42	36,01	39,41	42,70	44,51	46,21	49,33	52,95	57,67	63,72
EURO 2	3,92	7,95	11,45	14,26	16,82	19,57	19,57	19,57	19,57	19,57	19,57	19,57	19,57	19,57
EURO 3	0,67	3,85	6,49	8,30	9,88	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66

**Tabelle A.16:** Emissionsfaktoren für CO, PKW Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,24	2,48	3,82	4,81	5,88	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03
EURO 5	0,02	1,81	3,42	4,08	5,08	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11
EURO 6	0,19	1,85	2,83	3,82	4,81	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	2,74	44,33	55,81	65,25	70,01	77,83	82,14	87,30	95,59	103,13	107,34	119,17	140,98	176,57
EURO 1	2,15	21,10	27,22	33,04	35,89	41,65	42,92	45,60	49,54	53,23	55,45	58,45	65,15	77,98
EURO 2	3,92	9,20	12,72	15,35	17,92	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07
EURO 3	0,67	4,53	6,67	8,62	10,38	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84
EURO 4	0,24	2,57	4,03	4,95	6,13	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07
EURO 5	0,02	2,25	3,58	4,34	5,37	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19
EURO 6	0,19	1,91	2,90	3,91	4,90	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	2,74	49,72	62,24	68,95	78,50	87,26	97,43	108,82	115,88	129,15	154,70	182,64	207,34	246,11
EURO 1	2,15	22,86	30,05	33,94	39,51	43,09	45,34	48,29	51,94	55,81	58,05	63,03	75,46	90,35
EURO 2	3,92	9,94	12,95	15,26	17,85	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17
EURO 3	0,67	4,64	6,85	8,46	10,41	12,39	12,39	12,39	12,39	12,39	12,39	12,39	12,39	12,39
EURO 4	0,24	2,83	3,88	5,02	6,13	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16
EURO 5	0,02	2,56	3,44	4,45	5,46	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27
EURO 6	0,19	1,95	3,01	4,03	5,04	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	2,74	52,99	62,97	74,85	84,74	95,25	105,55	120,63	142,05	165,06	195,96	230,22	279,51	321,36
EURO 1	2,15	24,35	29,95	36,44	40,31	44,40	48,15	52,86	57,70	62,31	67,24	73,35	86,03	102,35
EURO 2	3,92	10,33	13,20	15,48	17,70	20,30	20,30	20,30	20,30	20,30	20,30	20,30	20,30	20,30
EURO 3	0,67	4,93	6,87	8,59	10,55	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
EURO 4	0,24	2,96	3,97	5,03	6,27	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38
EURO 5	0,02	2,69	3,56	4,55	5,66	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60
EURO 6	0,19	2,02	3,10	4,13	5,41	6,96	6,96	6,96	6,96	6,96	6,96	6,96	6,96	6,96



**Tabelle A.17:** Emissionsfaktoren für PM, PKW Otto

EFa PKW Otto PM [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,13
EURO 1	0,01	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08
EURO 2	0,01	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,38
EURO 3	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,11
EURO 4	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
EURO 5	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,09
EURO 6	0,00	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,13	0,13	0,17	0,29	0,49
EURO 1	0,01	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,10	0,09	0,10	0,17	0,29
EURO 2	0,01	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,12	0,12	0,12	0,22	0,38
EURO 3	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,09	0,14
EURO 4	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06
EURO 5	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,09
EURO 6	0,00	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,10
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,07	0,07	0,07	0,12	0,14	0,14	0,14	0,20	0,26	0,34	0,60	0,95	1,63
EURO 1	0,01	0,06	0,06	0,06	0,07	0,09	0,09	0,09	0,12	0,16	0,22	0,34	0,55	1,00
EURO 2	0,01	0,06	0,06	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,16	0,21	0,29	0,48	0,80	1,54
EURO 3	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,09	0,12	0,18	0,30	0,51
EURO 4	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,09	0,15	0,26
EURO 5	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,11	0,14	0,28
EURO 6	0,00	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,15	0,24
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,13	0,13	0,13	0,17	0,22	0,27	0,32	0,46	0,69	0,98	1,61	2,25	3,29
EURO 1	0,01	0,08	0,09	0,09	0,11	0,13	0,16	0,20	0,28	0,40	0,59	1,00	1,33	2,03
EURO 2	0,01	0,08	0,09	0,11	0,15	0,18	0,22	0,28	0,39	0,58	0,85	1,54	2,10	3,27
EURO 3	0,00	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,16	0,22	0,34	0,53	0,72	1,12

Tabelle A.17: Emissionsfaktoren für PM, PKW Otto (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,08	0,11	0,17	0,28	0,38	0,58
EURO 5	0,01	0,05	0,05	0,05	0,06	0,08	0,08	0,08	0,10	0,12	0,15	0,28	0,29	0,48
EURO 6	0,00	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,09	0,10	0,12	0,15	0,24	0,26	0,41
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,13	0,16	0,22	0,28	0,35	0,51	0,73	0,99	1,58	2,06	3,52	4,79	6,26
EURO 1	0,01	0,08	0,10	0,13	0,17	0,21	0,30	0,42	0,61	0,98	1,25	1,97	2,64	3,52
EURO 2	0,01	0,09	0,13	0,19	0,23	0,29	0,44	0,63	0,91	1,54	1,94	3,15	4,35	5,75
EURO 3	0,00	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,18	0,24	0,36	0,53	0,68	1,07	1,47	1,94
EURO 4	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,19	0,28	0,36	0,58	0,71	0,92
EURO 5	0,01	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,10	0,12	0,16	0,27	0,28	0,40	0,40	0,74
EURO 6	0,00	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,11	0,13	0,16	0,24	0,26	0,35	0,48	0,64
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,13	0,21	0,29	0,40	0,50	0,91	1,37	1,83	2,91	3,37	5,87	6,94	10,77
EURO 1	0,01	0,09	0,13	0,18	0,26	0,32	0,52	0,93	1,14	1,66	2,12	3,30	3,80	5,58
EURO 2	0,01	0,11	0,18	0,25	0,37	0,47	0,81	1,36	1,72	2,66	3,52	5,51	6,70	9,06
EURO 3	0,00	0,05	0,08	0,10	0,15	0,19	0,33	0,48	0,61	0,92	1,25	1,91	2,23	2,99
EURO 4	0,00	0,03	0,04	0,05	0,08	0,10	0,17	0,26	0,34	0,54	0,64	0,90	1,11	1,40
EURO 5	0,01	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,25	0,25	0,33	0,50	0,55	0,74	0,94
EURO 6	0,00	0,06	0,08	0,09	0,10	0,13	0,15	0,22	0,27	0,30	0,46	0,50	0,62	0,81
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,01	0,16	0,27	0,38	0,67	0,84	1,59	2,08	3,53	4,62	6,22	8,59	12,92	17,53
EURO 1	0,01	0,10	0,16	0,25	0,40	0,49	0,99	1,27	1,98	2,55	3,48	4,23	6,23	9,17
EURO 2	0,01	0,14	0,23	0,36	0,60	0,74	1,55	2,02	3,17	4,29	5,74	7,34	9,71	14,43
EURO 3	0,00	0,06	0,10	0,15	0,23	0,29	0,55	0,72	1,09	1,48	1,95	2,43	3,24	4,68
EURO 4	0,00	0,03	0,05	0,08	0,12	0,15	0,30	0,40	0,58	0,73	0,92	1,23	1,62	2,08
EURO 5	0,01	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,27	0,27	0,42	0,43	0,69	0,70	0,94	1,14
EURO 6	0,00	0,07	0,09	0,10	0,13	0,16	0,26	0,26	0,37	0,48	0,61	0,65	0,87	1,09

**Tabelle A.18:** Emissionsfaktoren für PM, PKW Diesel

EFa PKW Diesel PM [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,63	6,35	5,37	5,08	5,04	5,26	5,28	5,48	5,60	6,07	6,49	6,95	7,91	13,73
EURO 1	0,58	5,36	4,22	4,00	3,91	4,34	4,58	4,82	5,08	5,40	5,78	5,97	6,49	8,62
EURO 2	0,56	3,99	3,71	3,69	3,50	3,99	4,20	4,40	4,64	4,95	5,35	5,69	6,08	7,03
EURO 3	0,09	1,53	1,85	1,96	1,97	2,22	2,33	2,58	2,84	3,14	3,49	3,86	4,26	4,76
EURO 4	0,16	1,55	2,06	2,25	2,24	2,40	2,72	3,01	3,29	3,59	3,91	4,23	4,55	4,97
EURO 5	0,02	0,48	0,95	1,17	1,16	1,38	1,86	2,17	2,47	2,77	3,08	3,38	3,69	4,00
EURO 6	0,05	0,48	0,97	1,19	1,18	1,40	1,89	2,20	2,50	2,81	3,11	3,41	3,71	4,01
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,63	6,35	6,85	5,69	5,86	6,07	6,10	6,45	6,90	8,52	9,50	10,49	13,33	17,57
EURO 1	0,58	6,73	5,86	4,52	4,65	4,87	4,91	5,22	5,69	6,15	6,86	7,36	9,32	11,21
EURO 2	0,56	5,81	4,49	4,13	4,03	4,35	4,47	4,77	5,09	5,60	6,37	6,73	7,71	8,73
EURO 3	0,09	1,87	2,04	2,31	2,25	2,49	2,62	2,91	3,24	3,70	4,28	4,65	5,34	6,11
EURO 4	0,16	2,09	2,11	2,28	2,44	2,60	2,92	3,22	3,53	3,91	4,32	4,87	5,22	5,84
EURO 5	0,02	0,50	0,95	1,18	1,16	1,39	1,87	2,17	2,48	2,78	3,09	3,42	3,71	4,04
EURO 6	0,05	0,52	0,95	1,19	1,18	1,40	1,89	2,19	2,49	2,80	3,10	3,42	3,71	4,03
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,63	6,35	7,16	7,89	8,29	8,11	8,07	9,52	11,03	12,42	15,27	18,24	22,89	33,36
EURO 1	0,58	2,23	3,92	4,23	4,82	5,56	6,03	6,58	7,30	8,44	9,58	11,34	13,58	18,45
EURO 2	0,56	1,86	3,23	3,66	4,03	4,95	5,28	5,65	6,20	6,97	7,60	8,88	10,02	12,36
EURO 3	0,09	1,12	1,78	2,21	2,74	2,98	3,15	3,63	4,02	4,52	5,19	5,81	6,56	8,09
EURO 4	0,16	1,10	1,88	2,30	2,42	2,80	3,20	3,61	3,99	4,50	5,02	5,54	6,32	7,38
EURO 5	0,02	0,47	0,94	1,17	1,16	1,41	1,89	2,22	2,49	2,81	3,13	3,44	3,75	4,07
EURO 6	0,05	0,48	0,95	1,18	1,17	1,41	1,90	2,22	2,49	2,81	3,11	3,42	3,74	4,06
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,63	6,35	7,16	7,89	8,29	8,11	8,07	9,52	11,03	12,42	15,27	18,24	22,89	33,36
EURO 1	0,58	2,23	3,92	4,23	4,82	5,56	6,03	6,58	7,30	8,44	9,58	11,34	13,58	18,45
EURO 2	0,56	1,86	3,23	3,66	4,03	4,95	5,28	5,65	6,20	6,97	7,60	8,88	10,02	12,36
EURO 3	0,09	1,12	1,78	2,21	2,74	2,98	3,15	3,63	4,02	4,52	5,19	5,81	6,56	8,09

**Tabelle A.18:** Emissionsfaktoren für PM, PKW Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,16	1,10	1,88	2,30	2,42	2,80	3,20	3,61	3,99	4,50	5,02	5,54	6,32	7,38
EURO 5	0,02	0,47	0,94	1,17	1,16	1,41	1,89	2,22	2,49	2,81	3,13	3,44	3,75	4,07
EURO 6	0,05	0,48	0,95	1,18	1,17	1,41	1,90	2,22	2,49	2,81	3,11	3,42	3,74	4,06
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,63	6,88	9,13	10,85	11,98	14,85	16,62	19,42	23,73	27,67	33,59	39,28	47,53	59,38
EURO 1	0,58	4,67	5,87	6,93	7,18	8,55	9,84	11,22	13,60	15,49	17,79	20,38	23,94	29,35
EURO 2	0,56	3,69	4,78	5,49	5,95	6,73	7,50	8,33	9,71	10,91	12,52	13,78	15,06	16,93
EURO 3	0,09	1,75	2,65	3,14	3,49	3,99	4,38	5,00	5,98	7,03	7,70	8,80	10,57	12,62
EURO 4	0,16	1,74	2,65	2,98	3,27	3,65	4,27	4,92	5,80	6,36	7,22	7,92	8,88	9,81
EURO 5	0,02	0,50	0,97	1,20	1,20	1,43	1,92	2,23	2,55	2,86	3,17	3,49	3,80	4,11
EURO 6	0,05	0,51	0,97	1,20	1,19	1,42	1,91	2,22	2,54	2,85	3,17	3,49	3,81	4,14
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,63	7,84	10,54	12,65	15,50	18,25	21,74	27,62	33,41	40,75	47,41	53,66	62,00	74,14
EURO 1	0,58	4,98	6,63	7,58	9,28	10,84	13,04	16,09	18,81	21,12	24,62	27,06	30,16	33,20
EURO 2	0,56	3,96	5,19	5,90	6,81	7,78	8,86	10,41	11,41	13,14	14,37	15,84	17,13	18,86
EURO 3	0,09	1,97	2,85	3,51	3,85	4,48	5,20	6,44	7,42	8,73	9,95	11,38	13,30	14,70
EURO 4	0,16	2,00	2,73	3,31	3,59	4,23	5,14	5,74	6,55	7,28	8,13	9,06	10,12	11,20
EURO 5	0,02	0,51	0,98	1,22	1,21	1,45	1,94	2,25	2,56	2,88	3,19	3,50	3,81	4,14
EURO 6	0,05	0,51	0,98	1,21	1,19	1,43	1,93	2,24	2,56	2,88	3,20	3,53	3,86	4,27
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	0,63	8,68	11,25	15,26	18,31	23,54	27,95	34,07	39,69	48,91	58,11	66,30	76,05	91,47
EURO 1	0,58	5,37	6,77	9,18	11,31	14,14	17,41	20,95	23,52	26,00	28,52	31,15	34,08	38,68
EURO 2	0,56	4,28	5,59	6,70	7,56	9,18	10,30	12,06	13,34	14,38	16,10	17,36	19,18	21,24
EURO 3	0,09	2,14	3,13	3,78	4,75	5,48	6,56	8,06	9,28	10,64	12,06	13,38	14,76	16,22
EURO 4	0,16	2,19	2,98	3,55	4,07	4,99	5,79	6,68	7,59	8,20	9,03	9,83	10,96	12,00
EURO 5	0,02	0,52	0,99	1,23	1,22	1,46	1,95	2,27	2,58	2,89	3,20	3,52	3,86	4,28
EURO 6	0,05	0,51	0,98	1,21	1,20	1,45	1,94	2,27	2,59	2,91	3,23	3,61	4,03	4,47

**Tabelle A.19:** Zeitfaktoren für NO<sub>x</sub> im Vergleich zum Jahr 2015, PKW Otto und Diesel

Jahr	Otto NO <sub>x</sub>	Diesel NO <sub>x</sub>
2015	1,00	1,00
2020	0,74	0,59
2025	0,59	0,35
2030	0,51	0,26
2035	0,47	0,23

**Tabelle A.20:** Zeitfaktoren für CO im Vergleich zum Jahr 2015, PKW Otto und Diesel

Jahr	Otto CO	Diesel CO
2015	1,00	1,00
2020	0,84	0,83
2025	0,76	0,75
2030	0,71	0,71
2035	0,69	0,69

**Tabelle A.21:** Zeitfaktoren für Trübe im Vergleich zum Jahr 2015, PKW Otto und Diesel

Jahr	Otto Tr.	Diesel Tr.
2015	1,00	1,00
2020	0,98	0,80
2025	0,98	0,75
2030	0,97	0,72
2035	0,96	0,70

## C Emissionsfaktoren für SNF

**Tabelle A.22:** Basis-Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, SNF 23 t Diesel

EFa SNF 23 t Diesel NO <sub>x</sub> [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
10	14,7	32,8	53,3	127,0	156,6	173,7	191,0
20	15,9	32,8	78,1	153,5	186,7	212,0	246,4
30	15,8	32,8	78,1	164,0	206,4	251,4	314,2
40	15,8	32,8	78,1	175,1	234,4	309,2	391,4
50	15,8	32,8	78,1	185,9	260,1	360,9	473,6
60	15,8	32,8	78,1	194,8	296,5	421,7	558,4
70	15,8	32,8	78,1	201,3	324,8	479,8	633,3
80	15,8	32,8	78,1	208,4	357,6	542,5	730,7
90	15,8	32,8	78,1	226,9	407,0	610,5	—
100	15,8	32,8	80,1	257,1	467,9	681,1	—
110	15,8	32,8	85,6	290,9	527,9	—	—
120	15,8	33,5	97,1	335,8	586,2	—	—
130	15,8	35,5	113,9	387,4	—	—	—

**Tabelle A.23:** Basis-Emissionsfaktoren für CO, SNF 23 t Diesel

EFa SNF 23 t Diesel CO [g/h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
10	5,3	9,3	14,2	36,0	49,7	62,2	73,9
20	5,5	9,3	20,0	48,0	72,3	86,7	103,5
30	5,5	9,3	20,2	57,1	89,5	104,7	113,2
40	5,5	9,3	20,2	65,2	99,8	110,7	114,4
50	5,5	9,3	20,2	72,7	105,5	111,4	116,0
60	5,5	9,3	20,2	78,3	107,4	111,9	119,5
70	5,5	9,3	20,2	80,6	108,6	113,4	124,3
80	5,5	9,3	20,2	83,0	109,3	116,1	131,7
90	5,5	9,3	20,2	84,9	109,5	119,1	—
100	5,5	9,3	20,3	90,8	110,5	125,4	—
110	5,5	9,3	21,6	99,6	112,9	—	—
120	5,5	9,5	25,6	105,6	117,7	—	—
130	5,5	10,3	33,7	109,8	—	—	—

**Tabelle A.24:** Basis-Emissionsfaktoren für Trübe, SNF 23 t Diesel

EFa SNF 23 t Diesel Trübe [m <sup>2</sup> /h] 2015							
v [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
10	4,4	5,2	6,2	9,3	11,0	12,7	14,4
20	4,6	5,2	7,8	10,8	14,2	17,1	20,6
30	4,6	5,2	8,0	12,1	17,2	21,5	24,5
40	4,6	5,2	8,3	12,9	20,1	24,2	27,1
50	4,7	5,2	8,3	14,1	21,9	26,4	30,6
60	4,8	5,2	8,3	15,5	23,8	28,0	34,5
70	4,8	5,2	8,3	16,8	25,2	30,6	37,5
80	4,8	5,2	8,3	18,5	26,3	33,5	42,9
90	4,8	5,2	8,3	20,0	27,7	36,1	—
100	4,8	5,2	8,4	22,2	29,8	39,8	—
110	4,8	5,4	8,7	23,6	32,7	—	—
120	4,8	5,4	8,9	25,8	34,9	—	—
130	4,8	5,7	10,0	28,1	—	—	—

Tabelle A.25: Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, SNF 23 t Diesel

EFa SNF 23 t Diesel NO <sub>x</sub> [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56	40,56
EURO 1	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60
EURO 2	40,58	40,58	32,23	29,36	29,85	30,20	30,32	30,38	30,39	30,39	30,39	30,39	30,39	30,39
EURO 3	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08	42,08
EURO 4	7,51	6,40	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51
EURO 5	11,71	9,55	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71	11,71
EURO 6	1,75	7,92	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	40,56	62,83	62,83	62,83	62,83	62,83	62,83	62,83	62,83	62,83	62,83	62,83	73,51	103,60
EURO 1	32,60	48,37	48,37	48,37	48,37	48,37	48,37	48,37	48,37	48,37	48,37	48,37	48,92	68,76
EURO 2	40,58	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	58,95	74,54
EURO 3	42,08	58,29	58,29	58,29	58,29	58,29	58,29	58,29	58,29	58,29	58,29	58,29	63,00	70,25
EURO 4	7,51	20,61	20,61	20,61	20,61	20,61	20,61	20,61	20,61	20,61	20,61	20,61	22,00	25,19
EURO 5	11,71	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29
EURO 6	1,75	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43	24,43
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	40,56	129,36	131,13	131,13	131,13	131,13	131,13	131,13	131,13	131,13	154,71	238,73	340,60	513,92
EURO 1	32,60	95,23	95,23	95,23	95,23	95,23	95,23	95,23	95,23	95,23	108,26	154,73	214,52	314,50
EURO 2	40,58	113,73	117,32	117,32	117,32	117,32	117,32	117,32	117,32	117,32	117,34	162,89	225,55	331,15
EURO 3	42,08	103,69	104,03	104,03	104,03	104,03	104,03	104,03	104,03	104,03	115,00	130,95	177,23	245,52
EURO 4	7,51	45,47	56,80	56,80	56,80	56,80	56,80	56,80	56,80	56,80	62,00	76,35	112,31	150,22
EURO 5	11,71	53,40	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68	94,68
EURO 6	1,75	16,20	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	40,56	254,95	347,57	434,84	521,86	592,31	665,33	744,82	832,10	998,57	1.241,67	1.514,54	1.825,06	2.158,36
EURO 1	32,60	181,58	244,03	298,33	350,67	404,97	459,70	501,59	571,43	671,88	812,13	973,74	1.162,15	1.367,31
EURO 2	40,58	207,27	267,22	325,14	387,61	440,33	489,28	532,69	590,92	689,00	817,89	962,34	1.137,58	1.311,18
EURO 3	42,08	179,88	228,98	278,21	325,77	376,09	415,30	441,50	456,82	512,99	639,19	736,24	844,49	990,77



**Tabelle A.25:** Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, SNF 23 t Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	7,51	129,76	170,70	199,47	228,12	252,14	269,81	281,36	311,00	360,00	434,55	486,16	542,16	620,62
EURO 5	11,71	150,79	178,91	177,56	177,56	177,56	177,56	177,56	177,56	183,00	187,28	206,66	241,11	276,26
EURO 6	1,75	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93
Steigung 2%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	40,56	362,89	587,13	782,53	1.005,47	1.257,85	1.467,37	1.692,19	1.942,89	2.210,03	2.543,74	2.790,22	3.045,22	—
EURO 1	32,60	255,73	400,03	545,02	683,44	825,77	963,34	1.091,09	1.246,54	1.421,15	1.620,98	1.814,68	1.978,83	—
EURO 2	40,58	280,45	434,92	571,73	700,47	828,79	960,37	1.077,11	1.216,24	1.382,01	1.593,86	1.758,29	1.937,28	—
EURO 3	42,08	240,47	375,12	438,52	550,01	633,88	740,40	825,51	911,56	1.054,38	1.207,12	1.374,40	1.538,12	—
EURO 4	7,51	176,79	250,65	315,00	369,85	417,92	491,66	535,33	576,88	649,23	736,51	832,00	917,95	—
EURO 5	11,71	179,97	179,97	179,97	186,00	195,00	216,51	232,24	254,02	287,93	334,97	380,62	424,50	—
EURO 6	1,75	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,80	35,29	35,29	35,75	—
Steigung 4%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	40,56	488,18	818,24	1.199,76	1.556,63	1.914,86	2.257,35	2.591,79	2.908,06	3.242,58	3.602,83	—	—	—
EURO 1	32,60	331,90	567,88	795,92	1.016,25	1.236,33	1.461,69	1.665,74	1.883,92	2.104,46	2.339,57	—	—	—
EURO 2	40,58	365,67	595,09	802,55	1.010,40	1.218,00	1.444,24	1.639,20	1.841,27	2.040,89	2.266,37	—	—	—
EURO 3	42,08	310,02	465,35	616,71	775,56	912,06	1.088,18	1.244,40	1.413,26	1.602,04	1.790,08	—	—	—
EURO 4	7,51	218,60	302,39	406,77	509,19	588,61	667,03	759,17	855,79	954,35	1.064,52	—	—	—
EURO 5	11,71	182,00	183,00	186,42	224,63	259,11	300,27	342,41	388,22	438,54	490,56	—	—	—
EURO 6	1,75	33,50	33,50	33,50	33,50	33,50	33,50	33,50	35,00	37,86	40,61	—	—	—
Steigung 6%														
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	40,56	600,90	1.075,12	1.597,69	2.097,23	2.556,74	2.986,42	3.387,85	3.891,48	—	—	—	—	—
EURO 1	32,60	412,08	731,96	1.041,00	1.353,00	1.642,75	1.938,99	2.196,48	2.525,99	—	—	—	—	—
EURO 2	40,58	446,31	746,37	1.031,71	1.319,84	1.615,06	1.895,00	2.122,46	2.438,66	—	—	—	—	—
EURO 3	42,08	386,52	578,44	792,64	1.005,73	1.225,94	1.454,43	1.661,03	1.920,08	—	—	—	—	—
EURO 4	7,51	255,46	378,89	515,68	621,97	750,23	881,48	990,33	1.141,39	—	—	—	—	—
EURO 5	11,71	183,40	196,00	226,92	279,71	338,38	400,16	454,66	525,21	—	—	—	—	—
EURO 6	1,75	33,80	33,80	33,80	33,80	33,80	35,00	38,64	43,67	—	—	—	—	—

Tabelle A.26: Emissionsfaktoren für CO, SNF 23 t Diesel

EFa SNF 23 t Diesel CO [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%							Steigung -4%						
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75
EURO 1	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77
EURO 2	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67
EURO 3	10,52	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28
EURO 4	1,92	1,67	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92
EURO 5	2,62	2,18	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
EURO 6	0,81	0,30	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
pre EURO	26,75	36,35	36,35	36,35	36,35	36,35	36,35	36,35	36,35	36,35	36,35	36,35	37,29	38,45
EURO 1	15,77	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59	21,59
EURO 2	12,67	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	16,73	17,35
EURO 3	10,52	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21	33,21
EURO 4	1,92	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	6,27
EURO 5	2,62	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	7,30	8,54
EURO 6	0,81	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
pre EURO	26,75	69,76	69,76	69,76	69,76	69,76	69,76	69,76	69,76	69,76	72,00	74,03	79,00	107,82
EURO 1	15,77	37,55	39,23	39,23	39,23	39,23	39,23	39,23	39,23	39,23	41,00	42,86	47,34	71,26
EURO 2	12,67	26,51	30,02	30,26	30,26	30,26	30,26	30,26	30,26	30,26	31,00	32,36	38,58	57,20
EURO 3	10,52	44,68	48,96	48,96	48,96	48,96	48,96	48,96	48,96	48,96	48,96	50,00	55,00	63,94
EURO 4	1,92	13,95	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	16,00	18,39	27,19	35,49
EURO 5	2,62	10,91	19,91	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	22,00	27,00	37,49
EURO 6	0,81	1,50	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48
pre EURO	26,75	85,49	102,25	118,41	129,45	133,00	142,00	159,26	162,00	172,56	176,00	184,33	202,25	237,00
EURO 1	15,77	59,85	70,55	80,16	84,35	93,12	100,52	119,92	125,28	127,00	131,33	153,11	170,10	188,51
EURO 2	12,67	49,19	55,48	68,03	74,00	83,17	96,25	107,65	113,89	115,00	118,24	123,43	124,56	128,37
EURO 3	10,52	68,97	76,00	81,44	83,00	88,00	96,00	100,80	102,00	103,05	106,07	115,55	117,51	124,45

**Tabelle A.26:** Emissionsfaktoren für CO, SNF 23 t Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	1,92	30,96	44,00	52,63	61,19	68,14	72,55	75,00	82,00	90,00	105,00	111,00	115,69	115,46		
EURO 5	2,62	42,16	60,53	74,16	87,90	99,65	106,68	108,00	111,00	113,37	122,00	135,00	145,00	150,52		
EURO 6	0,81	3,54	5,46	6,77	6,88	6,67	6,96	7,57	7,57	7,57	7,57	7,84	7,84	7,84		
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	Steigung 2%		60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	26,75	104,81	131,91	137,41	149,90	166,72	173,16	192,40	211,00	221,87	225,00	231,40	252,53	—		
EURO 1	15,77	73,23	93,33	108,48	123,82	129,11	148,44	163,95	176,23	180,23	200,30	217,13	236,77	—		
EURO 2	12,67	58,46	83,49	96,96	109,71	111,87	125,26	130,12	130,12	132,00	133,00	139,00	149,74	—		
EURO 3	10,52	75,11	86,83	101,15	107,26	108,48	114,95	117,40	121,39	121,39	121,39	123,69	132,21	—		
EURO 4	1,92	45,95	67,86	82,00	100,61	103,47	108,00	114,83	115,00	115,83	117,67	126,31	136,62	—		
EURO 5	2,62	63,41	98,95	125,00	140,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	151,00	153,00	157,00	—		
EURO 6	0,81	5,77	7,40	9,13	9,30	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,86	11,26	—		
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	Steigung 4%		60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	26,75	126,81	145,00	161,91	175,88	191,56	215,00	240,00	254,07	274,00	296,89	—	—	—		
EURO 1	15,77	82,71	109,35	130,72	151,99	173,67	181,21	203,99	227,86	250,97	278,86	—	—	—		
EURO 2	12,67	69,13	97,37	111,00	125,06	125,06	128,00	132,00	142,52	156,84	174,41	—	—	—		
EURO 3	10,52	80,30	100,85	109,39	112,85	115,93	117,00	122,00	131,25	139,58	154,05	—	—	—		
EURO 4	1,92	58,59	77,44	101,08	113,82	113,52	115,50	120,64	131,06	142,24	158,01	—	—	—		
EURO 5	2,62	83,47	120,00	148,31	156,00	156,00	156,00	156,00	156,00	156,00	160,00	—	—	—		
EURO 6	0,81	6,96	9,09	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	10,24	11,44	13,09	—	—	—		
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	Steigung 6%		60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	26,75	132,42	155,00	179,30	212,64	230,00	254,53	288,57	319,73	—	—	—	—	—		
EURO 1	15,77	94,91	129,04	154,98	174,12	201,82	234,10	262,78	300,54	—	—	—	—	—		
EURO 2	12,67	86,70	110,99	126,42	129,00	131,29	146,92	163,29	187,24	—	—	—	—	—		
EURO 3	10,52	89,23	109,04	114,12	117,00	124,00	135,11	145,16	165,34	—	—	—	—	—		
EURO 4	1,92	69,29	95,19	112,03	118,00	122,00	135,09	147,84	168,94	—	—	—	—	—		
EURO 5	2,62	100,94	146,36	160,06	160,06	160,06	160,06	163,00	166,00	—	—	—	—	—		
EURO 6	0,81	7,20	10,98	10,98	10,98	10,98	11,50	12,20	13,93	—	—	—	—	—		

Tabelle A.27: Emissionsfaktoren für PM, SNF 23 t Diesel

EFa SNF 23 t Diesel PM [g/h] 2015														
v [km/h]: Standard	Steigung -6%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,62	10,06	10,06	10,06	10,26	10,65	10,94	11,06	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11
EURO 1	5,53	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45
EURO 2	1,43	2,76	2,76	2,76	2,76	2,82	2,86	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88
EURO 3	1,29	5,14	5,14	5,14	5,17	5,31	5,41	5,46	5,47	5,47	5,47	5,47	5,47	5,47
EURO 4	0,20	0,20	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
EURO 5	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
EURO 6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
v [km/h]: Standard	Steigung -4%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,62	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	11,06	11,11	11,11	11,11	11,65	12,51	12,89
EURO 1	5,53	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,68	7,68	7,68
EURO 2	1,43	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,93	3,15	3,44
EURO 3	1,29	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,46	5,47	5,47	5,47	5,71	5,71	5,71
EURO 4	0,20	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,48
EURO 5	0,10	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,33
EURO 6	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
v [km/h]: Standard	Steigung -2%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,62	12,87	13,15	13,41	13,41	13,41	13,41	13,41	13,41	13,41	14,51	16,56	18,20	21,43
EURO 1	5,53	10,62	10,64	10,64	10,64	10,64	10,64	10,64	10,64	10,64	10,64	11,16	11,50	15,75
EURO 2	1,43	2,95	3,42	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69	4,14	4,59	5,12	6,83
EURO 3	1,29	5,35	5,74	5,83	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,63	6,54	7,18
EURO 4	0,20	0,67	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,81	1,10	1,47
EURO 5	0,10	0,57	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
EURO 6	0,01	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,10
v [km/h]: Standard	Steigung 0%													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,62	17,31	19,49	21,84	24,07	24,52	26,92	29,91	30,30	34,32	36,46	42,01	48,42	58,57
EURO 1	5,53	14,06	15,52	16,31	16,50	17,80	18,78	21,28	22,67	22,90	26,61	31,95	37,23	46,45
EURO 2	1,43	5,17	5,70	6,65	7,10	8,38	10,04	11,65	13,24	13,24	13,60	15,15	16,74	18,95
EURO 3	1,29	6,76	6,76	7,02	7,10	7,35	7,98	8,86	9,87	10,03	10,50	11,13	12,68	14,59

**Tabelle A.27:** Emissionsfaktoren für PM, SNF 23 t Diesel (*Fortsetzung*)

EURO 4	0,20	1,17	1,45	1,71	2,01	2,27	2,46	2,60	2,90	3,30	3,88	3,95	3,95	3,95		
EURO 5	0,10	1,15	1,60	1,93	2,19	2,44	2,66	2,76	3,00	3,50	4,10	4,21	4,43	4,43		
EURO 6	0,01	0,11	0,16	0,18	0,19	0,20	0,22	0,23	0,26	0,28	0,28	0,31	0,35	0,38		
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	Steigung 2%		60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,62	19,81	25,29	28,06	32,65	36,71	40,81	45,82	48,46	57,40	67,00	72,59	79,22	—	—	—
EURO 1	5,53	15,84	17,82	20,51	24,34	27,82	31,59	36,25	39,48	45,98	54,76	64,90	70,77	—	—	—
EURO 2	1,43	5,76	8,42	11,27	12,53	13,75	15,19	16,95	17,81	18,60	19,80	22,56	25,01	—	—	—
EURO 3	1,29	6,78	7,60	9,11	9,74	11,00	11,33	12,40	13,58	14,70	16,64	19,15	20,47	—	—	—
EURO 4	0,20	1,50	2,25	2,80	3,35	3,55	3,88	3,92	3,92	3,92	3,96	4,00	4,10	—	—	—
EURO 5	0,10	1,67	2,43	2,90	3,66	3,85	4,26	4,26	4,27	4,27	4,27	4,27	4,45	—	—	—
EURO 6	0,01	0,16	0,20	0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,37	0,39	0,42	0,48	0,53	—	—	—
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	Steigung 4%		60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,62	23,35	32,22	35,88	42,32	48,57	57,06	68,27	75,85	84,00	93,33	—	—	—	—	—
EURO 1	5,53	16,37	20,99	27,33	33,55	40,83	47,86	55,93	65,76	74,95	83,38	—	—	—	—	—
EURO 2	1,43	6,82	11,31	13,67	15,79	17,38	18,40	20,30	22,77	25,93	29,03	—	—	—	—	—
EURO 3	1,29	7,09	8,92	10,84	11,82	13,23	14,65	17,14	19,61	21,54	23,85	—	—	—	—	—
EURO 4	0,20	1,91	2,65	3,46	3,85	3,96	3,96	3,96	4,03	4,13	4,53	—	—	—	—	—
EURO 5	0,10	2,11	2,88	3,74	4,21	4,37	4,37	4,37	4,45	4,48	4,86	—	—	—	—	—
EURO 6	0,01	0,19	0,25	0,30	0,33	0,37	0,40	0,45	0,50	0,54	0,61	—	—	—	—	—
v [km/h]: Standard	0	10	20	30	40	50	Steigung 6%		60	70	80	90	100	110	120	130
pre EURO	6,62	25,56	33,76	43,43	53,79	67,09	77,32	88,03	100,61	—	—	—	—	—	—	—
EURO 1	5,53	18,01	25,71	34,64	43,78	55,45	67,65	77,60	89,88	—	—	—	—	—	—	—
EURO 2	1,43	8,82	13,15	16,27	18,40	20,26	23,43	26,92	31,11	—	—	—	—	—	—	—
EURO 3	1,29	7,49	10,29	12,16	14,05	17,07	20,20	22,31	25,60	—	—	—	—	—	—	—
EURO 4	0,20	2,31	3,27	3,82	3,90	4,00	4,15	4,32	4,87	—	—	—	—	—	—	—
EURO 5	0,10	2,49	3,62	4,16	4,30	4,40	4,57	4,66	5,25	—	—	—	—	—	—	—
EURO 6	0,01	0,21	0,29	0,34	0,38	0,45	0,51	0,56	0,65	—	—	—	—	—	—	—

**Tabelle A.28:** Zeitfaktoren für NO<sub>x</sub>, CO und Trübe im Vergleich zum Jahr 2015, SNF 23 t Diesel

Jahr	NO <sub>x</sub>	CO	Trübe.
2015	1,00	1,00	1,00
2020	0,43	0,45	0,39
2025	0,21	0,22	0,17
2030	0,14	0,14	0,09
2035	0,11	0,10	0,07

**Tabelle A.29:** Massenfaktoren für NO<sub>x</sub>, CO und Trübe im Vergleich zu SNF mit 23 t

Masse	NO <sub>x</sub>	CO	Trübe
15 t	0,81	0,85	0,82
23 t	1,00	1,00	1,00
32 t	1,16	1,17	1,21

**Tabelle A.30:** Erreichbare Höchstgeschwindigkeiten [km/h] für SNF in Abhängigkeit der Fahrbahnsteigung

Masse	2%	4%	6%
15 t	120	100	80
23 t	120	100	80
32 t	110	70	50