



Bericht

Abteilung Luftqualität

Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing (RSD)

Resultate Messkampagne Basel 2018



Liestal, 24. September 2019

Impressum

Projektleitung

Markus Camenzind

Autor

Markus Camenzind

Facharbeiten

Durchführung Messungen, Validierung Daten: Serafin Brodmann, Student Uni Zürich

Einführung in RSD-Messungen: Felix Baum (AWEL), Michael Götsch (AWEL)

Auswertung und Darstellung: Gian-Marco Alt (AWEL), Jörg Sintermann (AWEL)

Danksagung

Das Lufthygieneamt beider Basel (LHA) wurde während der Vorbereitung, der Durchführung und der Auswertung der erhobenen Daten der Messungen in Basel tatkräftig durch das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich unterstützt. Das AWEL führt seit dem Jahr 2000 regelmässig Messungen mit dem RSD-Messsystem durch und verfügt somit über eine sehr grosse Erfahrung, von welcher wir für die Messungen in Basel profitieren konnten. Vielen Dank an das ganze Team des AWEL.

Vielen Dank auch an das Bundesamt für Strassen (ASTRA) für die anonymisierten Fahrzeugdaten aller Fahrzeuge der Schweiz und des Fürstentums Lichtenstein.

1. Übersicht

1.1. Inhaltsverzeichnis

1.	Übersicht	3
1.1.	Inhaltsverzeichnis	3
1.2.	Zusammenfassung	4
2.	Zielsetzung	6
3.	Bedeutung von Typenprüfungen und Emissionen im realen Fahrbetrieb	7
4.	Methodik: Emissionen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing	8
4.1.	Remote Sensing	8
4.2.	Standorte	10
4.2.1.	<i>Basel Feldbergstrasse</i>	10
4.2.2.	<i>Basel Wettsteinstrasse</i>	11
4.2.3.	<i>Basel Zürcherstrasse</i>	12
4.3.	Der Datensatz und seine Auswertung	13
5.	Stickoxid-Emissionen im realen Fahrbetrieb	15
5.1.	Flotten-Emissionen nach Fahrzeug- und Treibstoffart	15
5.2.	Emissionen nach Fahrzeugjahr- und Abgasnorm	16
5.3.	Herkunft der gemessenen Fahrzeuge (CH / D / F)	20
5.4.	Vergleich von Fahrzeug-Marken	21
5.5.	Einfluss der Lufttemperatur	24
5.6.	Einfluss der Motorlast	26
6.	Fazit.....	27
7.	Ausblick	27
8.	Anhang	28
8.1.	Datensatz Basel Feldbergstrasse	28
8.2.	Berechnung von NO _x Emissionen	29
8.3.	Zusammenfassung NO _x Emissionen	30
9.	Literatur	31

1.2. Zusammenfassung

Der motorisierte Strassenverkehr stösst im Kanton Basel-Stadt und Basel-Landschaft rund 60 % der gesamten Stickoxid-(NO_x)-Emissionen¹ aus. An städtischen und stark verkehrsexponierten Standorten wird der Jahresmittelgrenzwert für die Belastung mit Stickstoffdioxid (NO₂) weiterhin deutlich überschritten. Während die Grenzwerte der Fahrzeugemissionen über die Jahre verschärft wurden, zeigen Messungen im realen Fahrbetrieb, dass die zulässigen Emissionen um ein Vielfaches überschritten werden.

Dafür ist der Diesel-Abgasskandal verantwortlich: Ohne Abgasmanipulation bei den Dieselfahrzeugen würde der Strassenverkehr deutlich weniger Stickoxide ausstossen. Die Schadstoffbelastung an verkehrsnahen Standorten würde massgeblich reduziert. Der Diesel-Abgasskandal verzögert die Einhaltung der Grenzwerte, weshalb die Bevölkerung in städtisch geprägten und verkehrsexponierten Wohngebieten mindestens fünf Jahre länger übermässigen NO₂-Belastungen ausgesetzt ist.

Die Erkenntnis, dass die Emissionen auf dem Prüfstand nicht den effektiven Emissionen entsprechen, ist der Emissionsüberwachung im realen Fahrbetrieb zu verdanken, welche zum Beispiel durch das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich² seit bald 20 Jahren durchgeführt wird.

Die durch die Messungen gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Planung und den Vollzug von Luftreinhalte-Massnahmen.

Sie fliessen auch in eine gesamteuropäische Datenbank (ERMES Remote Sensing Database) ein und werden für die realistische Ermittlung der Fahrzeugemissionen im Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) verwendet³⁻⁵.

Zudem können die Messungen eine Grundlage für wissenschaftliche Studien bilden, welche sich dem Anteil hochemittierender Fahrzeuge am gesamten Fahrzeugbestand oder dem Einfluss der Fahrzeugalterung auf die Emissionen widmen.

Die Resultate der Messungen 2018 in Basel sowie den bisherigen Messungen des AWEL² zeigen, dass bei den benzinbetriebenen Fahrzeugen die Abnahme der NO_x-Emissionen dem generellen Verlauf der Abgasnorm-Verschärfungen entspricht. Hingegen gibt es bei den dieselpetriebenen Personen- und Lieferwagen folgende Erkenntnisse:

- Dieselfahrzeuge emittieren je nach Abgaskategorie zwischen Euro 2 und Euro 6b rund fünf bis zehnmal mehr NO_x als Benzinfahrzeuge.
- Zwischen 2000 und 2015 verlaufen die tatsächlichen NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen gegenläufig zu den Verschärfungen der Abgasnorm. Dies bedeutet, dass neuere Fahrzeuge mit Abgasnorm Euro 4 und 5 (das heisst rund 60% der aktuellen Diesel-Fahrzeugflotte BS/BL) mehr NO_x ausstossen als alte Fahrzeuge mit Abgasnorm Euro 2 und 3.
- Diesel-Personenwagen der Abgasnorm Euro 6b (Inbetriebnahme 1. September 2015) sind im Durchschnitt sauberer als Euro 5 Fahrzeuge. Sie stossen zwar halb so viel NO_x aus wie Euro 5 Fahrzeuge, aber weiterhin fünfmal so viel, wie aufgrund der Abgasnorm zu erwarten wäre.
- Die neuesten Diesel-Personenwagen weisen somit im Mittel nur leicht niedrigere NO_x-Emissionen auf als zu Beginn der 90er-Jahre.
- Die Messungen der neuesten Diesel-Personenwagen der Abgasnormen Euro 6c zeigen erstmals eine substantielle Verminderung der realen NO_x-Emissionen auf. Die NO_x-Emissionen bewegen sich im realen Fahrbetrieb für diese Abgasnormen im Bereich des vorgegebenen Grenzwertes der Typenprüfung. Die Stichprobe ist allerdings noch klein und die Resultate sollten durch weitere Messungen validiert werden.

Die EU führt nun schrittweise Verbesserungen bei den Prüfverfahren zur Typengenehmigung von neuen Personenwagen ein, die auch für die Zulassung in der Schweiz gelten. Im Herbst 2017 wurde der veraltete Fahrzyklus nach NEDC (New European Driving Cycle) durch den realistischeren WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle) ersetzt, der das moderne, reale Fahrverhalten auf dem Prüfstand besser abbildet. In den kommenden Jahren folgt eine zusätzliche Prüfmessung im realen Strassenverkehr mit einem Real-Drive-Emissions-Test (ab Abgasnorm Euro 6d-TEMP). 2019 soll der heute gültige NO_x-Grenzwert im realen Strassenverkehr noch um den Faktor 2.1, ab 2021 um den Faktor 1.3 überschritten werden dürfen. Seit kurzem sind Personenwagen mit der Abgasnorm Euro 6d-TEMP auf dem Markt erhältlich.

Mit allenfalls weiteren RSD-Messungen in der Stadt Basel in den nächsten Jahren kann überprüft werden, ob die erwarteten und versprochenen Verbesserungen auch auf der Strasse eintreten werden.

2. Zielsetzung

Der motorisierte Strassenverkehr ist eine wichtige Quelle von Luftschadstoffen. Er stellt im Kanton Basel-Stadt durch die Verbrennung von Benzin und Diesel insbesondere für den Ausstoss von Stickoxiden ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) den wichtigsten Emissionssektor dar (1700 Tonnen NO_x pro Jahr¹). Mit seinem Beitrag zur Luftverschmutzung ist der Verkehr eine der Ursachen für Herz-Kreislauf- sowie Atemwegs-Erkrankungen und Lungenkrebs⁶. Neben Gesundheitsfolgen verursacht die Luftverschmutzung weitere Umweltprobleme, zum Beispiel indem sie zu übermässigen Stickstoffeinträgen in empfindliche Ökosysteme beiträgt⁷. Deshalb wird die Regulierung verkehrsbezogener Schadstoff-Emissionen laufend verschärft und dem Stand der Technik angepasst⁸. Um die Emissionsgrenzwerte zu kontrollieren, werden neue Fahrzeugtypen bei der Typenzulassung unter Laborbedingungen auf einem Rollenprüfstand getestet. Im Zuge des sogenannten "Dieselskandals" wurde allerdings deutlich, dass Manipulationen des Abgasreinigungssystems von Dieselfahrzeugen durch die Motorensteuerungssoftware vorgenommen wurden, die zu einem erhöhten NO_x -Ausstoss im realen Fahrbetrieb führen⁹. Die vergangenen Entwicklungen zeigen, dass eine Charakterisierung der Emissionen im praktischen Fahrbetrieb auf der Strasse notwendig ist, um Fehlentwicklungen zu identifizieren und eine realistische Grundlage für die Beschreibung der Emissionen zu gewährleisten¹⁰.

Um den Schadstoffausstoss aus dem Strassenverkehr im realen Fahrbetrieb zu bestimmen, führte das LHA Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mit einem "Remote Sensing Detector" (RSD) durch. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Planung und den Vollzug von Luftreinhalte-Massnahmen.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Messreihe des LHA und deren Methodik. Er orientiert sich stark an dem AWEL-Bericht zu den langjährigen RSD-Messungen in Zürich². Die wichtigsten Erkenntnisse werden mit dem Fokus auf NO_x in einen fachlichen Kontext gesetzt.

3. Bedeutung von Typenprüfungen und Emissionen im realen Fahrbetrieb

Ein neuer Fahrzeugtyp muss bei der Marktzulassung ein Typenprüfungsverfahren erfolgreich durchlaufen haben. In der Schweiz sind in der Regel Fahrzeugtypen zulässig, welche die Zulassung zum Markt in der Europäischen Union erhalten haben.

Bei der Typenprüfung dürfen die Grenzwerte zum Schadstoffausstoss nicht überschritten werden. Diese Abgasvorschriften wurden in den letzten Jahrzehnten laufend verschärft. Im September 2017 wurde zudem der langjährige "New European Driving Cycle" (NEDC) Testzyklus durch den realistischeren "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle" (WLTC)¹¹ abgelöst.

Bis 2017 wurden die Emissionen unter Laborbedingungen auf dem Rollenprüfstand geprüft, seit September 2017 müssen neue Fahrzeugtypen zusätzlich die Abgasvorschriften auch unter definierten Bedingungen im realen Fahrbetrieb einhalten¹². Für neue Fahrzeuge gilt die Euro 6d-Abgasnorm mit RDE-Test (Real Driving Emissions) erst ab Ende 2019 (im sogenannten RDE Test, mit einem mobilen Abgasmessgerät - Portable Emission Measurement System, kurz PEMS - gemessen). Dabei dürfen die Emissionen im realen Strassenverkehr um den Faktor 2.1 (bis 2021) bis 1.43 (ab 2021) von den Grenzwerten abweichen. Die verschiedenen Abgasnormen, Testzyklen und Emissionsgrenzwerte sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Bei den Prüfstandmessungen werden bestimmte Fahrsituationen auf eine standardisierte, vereinfachte Art durch die Testzyklen nachgestellt. Zwar werden die Prüfbedingungen so vergleichbar, allerdings wird nicht das gesamte relevante Spektrum an realen Fahrbedingungen abgebildet¹³. Im täglichen Strassenverkehr hingegen trifft man ein Spektrum an verschiedenen Umständen an, die sich auf die Motorlast und damit auf den Treibstoffverbrauch und Schadstoffausstoss der Fahrzeuge auswirken¹⁴. Massgebliche Faktoren sind zum Beispiel das Fahrzeuggewicht, die Steigung der Strasse, Geschwindigkeit, Verkehrsfluss und Fahrweise. Unter der Bezeichnung "reale Emissionen" werden im vorliegenden Bericht die Schadstoff-Emissionen aus dem Auspuff zusammengefasst, welche im realen Fahrbetrieb in unterschiedlichen Fahrsituationen tatsächlich anfallen.

Es ist wichtig sich zu vergegenwärtigen, dass alle Fahrzeugtypen die Grenzwerte bei der Typenprüfung eingehalten haben, ihre Emissionen auf der Strasse aber auch von den Grenzwerten abweichen können, weil diese bis September 2017 nur für Laborbedingungen auf dem Rollenprüfstand definiert waren. Allerdings sollten, dem Grundgedanken des Gesetzgebers zufolge, die realen Emissionen im Durchschnitt nicht substantiell von den Grenzwert-Vorgaben abweichen¹⁵. Aufgrund der Verschärfung der Emissionsgrenzwerte über die Jahre sollte auch im realen Fahrbetrieb eine vergleichbare Entwicklung zu beobachten sein.

Abgasnorm	gilt für bzw. seit		Prüfverfahren	RDE CF	g/km					#/km
	neue Fahrzeugtypen	neue Fahrzeuge			CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
Benzin:										
Euro 1	Jul 1992	Jan 1993	NEDC	-	2.72	-	0.97	-	-	-
Euro 2	Jan 1996	Jan 1997	NEDC	-	2.20	-	0.5	-	-	-
Euro 3	Jan 2000	Jan 2001	NEDC	-	2.30	0.2	-	0.15	-	-
Euro 4	Jan 2005	Jan 2006	NEDC	-	1.00	0.1	-	0.08	-	-
Euro 5a	Sep 2009	Jan 2011	NEDC	-	1.00	0.1	-	0.06	0.005	-
Euro 6b	Sep 2014	Sep 2015	NEDC	-	1.00	0.1	-	0.06	0.005	6e+12
Euro 6c	Sep 2017	Sep 2018	WLTC	-	1.00	0.1	-	0.06	0.0045	6e+11
Euro 6d-TEMP	Sep 2017	Sep 2019	WLTC + RDE (PEMS)	2.1	1.00	0.1	-	0.06	0.0045	6e+11
Euro 6d	Jan 2020	Jan 2021	WLTC + RDE (PEMS)	1.43	1.00	0.1	-	0.06	0.0045	6e+11
Diesel:										
Euro 1	Jul 1992	Jan 1993	NEDC	-	2.72	-	0.97	-	0.14	-
Euro 2, PFI	Jan 1996	Jan 1997	NEDC	-	1.00	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, GDI	Jan 1996	Jan 1997	NEDC	-	1.00	-	0.9	-	0.1	-
Euro 3	Jan 2000	Jan 2001	NEDC	-	0.64	-	0.56	0.5	0.05	-
Euro 4	Jan 2005	Jan 2006	NEDC	-	0.50	-	0.3	0.25	0.025	-
Euro 5a	Sep 2009	Jan 2011	NEDC	-	0.50	-	0.23	0.18	0.005	-
Euro 5b	Sep 2011	Jan 2013	NEDC	-	0.50	-	0.23	0.18	0.0045	6e+11
Euro 6b	Sep 2014	Sep 2015	NEDC	-	0.50	-	0.17	0.08	0.0045	6e+11
Euro 6c	Sep 2017	Sep 2018	WLTC	-	0.50	-	0.17	0.08	0.0045	6e+11
Euro 6d-TEMP	Sep 2017	Sep 2019	WLTC + RDE (PEMS)	2.1	0.50	-	0.17	0.08	0.0045	6e+11
Euro 6d	Jan 2020	Jan 2021	WLTC + RDE (PEMS)	1.43	0.50	-	0.17	0.08	0.0045	6e+11

RDE CF = 1.43 gilt für NOx, für PN gilt RDE CF = 1.5

PN Grenzwert gilt bei Benzinfahrzeugen nur für Direkteinspritzer

Tabelle 1: Übersicht über EU Emissionsstandards und ihre Prüfverfahren (RDE CF = Real Driving Emissionen Conformity Factor; mit diesem Faktor dürfen die Emissionsgrenzwerte für die RDE Prüfung multipliziert werden) (Quelle: www.dieseln.net.com und Europäische Kommission).

4. Methodik: Emissionen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing

4.1. Remote Sensing

Emissionen im realen Fahrbetrieb¹⁶ können mit einer Technik namens "Remote Sensing"¹⁷ gemessen werden. Das RSD Messsystem erfasst dabei berührungsfrei die Schadstoffkonzentrationen im Abgas vorbeifahrender Fahrzeuge¹⁸ (**Abbildung 1**). Bei einer Messung durchqueren die Fahrzeuge eine Lichtschranke, welche durch Ultraviolett- und Infrarotquellen erzeugt wird. Durch Absorption des Lichtes von verschiedenen Wellenlängen wird mit einem Spektrometer die Schadstoffkonzentration ermittelt. Das RSD Messsystem ist also fest vor Ort und wartet auf die Emissionen vorbeifahrender Fahrzeuge, um unter den am Ort der Messung vorherrschenden Bedingungen in einer Momentaufnahme die realen Emissionen zu bestimmen. Um statistisch aussagekräftige Resultate zu erhalten, werden viele Fahrzeuge gemessen und zu Gruppen zusammengefasst¹⁹. So kann man also die Emissionen vieler verschiedener Fahrzeuge an ausgewählten Orten charakterisieren.

Im vorliegenden Bericht werden hauptsächlich Ergebnisse zu NO_x-Emissionen präsentiert. NO_x-Emissionen bestehen aus direkt ausgestossenem NO und NO₂.

Mit dem RSD System kann NO₂ erst ab dem Messjahr 2016 direkt gemessen werden. Die Ergebnisse der RSD Messungen werden in diesem Bericht an einigen Stellen den Emissionsgrenzwerten der Typenprüfung gegenübergestellt. Da der Grenzwert unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Treibstoffverbrauches in eine für die RSD Messungen vergleichbare Grösse (in g/kg Treibstoff) umgerechnet wird (siehe Anhang 8.2), erfolgt der Vergleich indirekt.

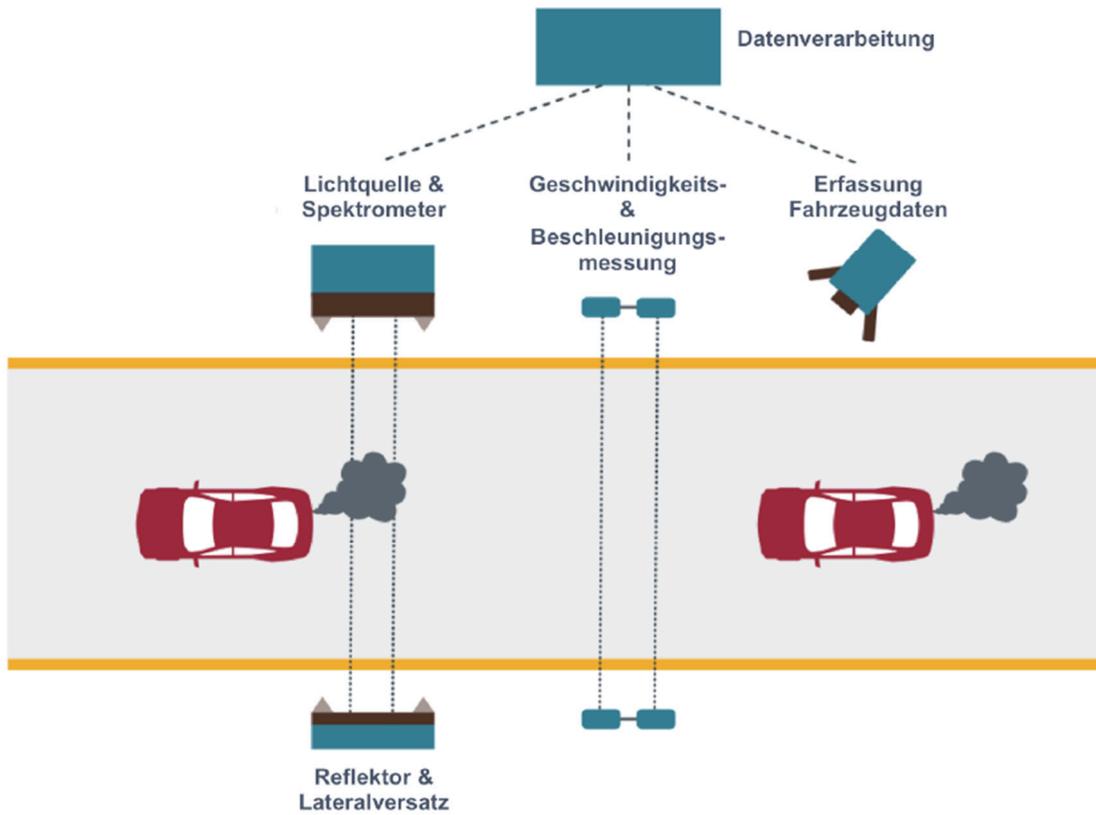
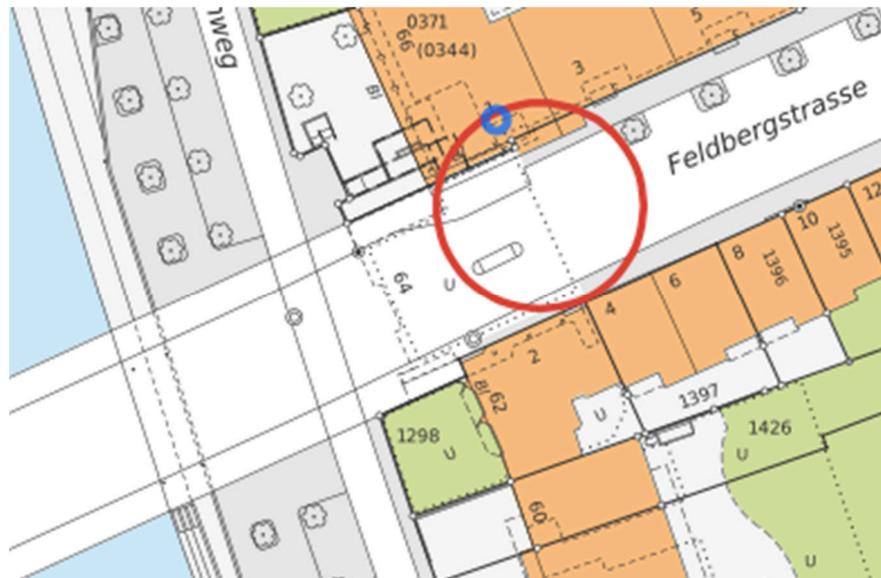


Abbildung 1: Messaufbau des RSD Systems (Quelle: Borken-Kleefeld und Dallmann, 2018).

4.2. Standorte

Für die Messung wurden im Gebiet der Stadt Basel verschiedene Standorte auf ihre Tauglichkeit überprüft. Die Rahmenbedingungen betreffend Platzierung Messsystem, der Verkehrsdichte, richtungstrennte Fahrbahnen und entsprechende Steigung der Fahrbahn haben drei Standorte erfüllt.

4.2.1. Basel Feldbergstrasse



(Quelle: Geoportail BS)



(Quelle LHA)

4.2.2. Basel Wettsteinstrasse



4.2.3. Basel Zürcherstrasse



(Quelle: Geoportal BS)



(Quelle LHA)

4.3. Der Datensatz und seine Auswertung

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Messkampagne 2018 in Basel präsentiert. Die **Tabelle 2** zeigt eine Zusammenfassung der gemessenen Fahrzeuge bzw. der verwendeten Datensätze. Die Verknüpfung und Auswertung der real gemessenen Schadstoffdaten mit den vom Bundesamt für Strasse ASTRA erhaltenen anonymisierten Fahrzeugdaten erfolgte durch das AWEL des Kantons Zürich.

Der Datensatz nach der Qualitätsselektion wurde nach folgenden Kriterien selektiert:

- Abgasnorm ab Euro1
- Fahrzeuge Schweiz und Fürstentum Liechtenstein
- ausschliesslich Personen und Lieferwagen
- ausschliesslich Benzin- und Dieselfahrzeuge
- Qualitätsflags aller Schadstoffe einer Messung mussten gültig sein
- Geschwindigkeit (in km/h) 5 bis <60
- Beschleunigung (in km/h/s) -2 bis <4
- Vehicle Specific Power (in kW/t) 1 bis <35

Kategorien		Datensätze Anzahl	Datensätze %
Daten	Datensätze vor QS	75'900	100
	Datensätze für Auswertung	26'564	35
Abgasnormen	Euro 1	280	1.1
	Euro 2	767	2.9
	Euro 3	1'674	6.3
	Euro 4	6'132	23.1
	Euro 5a	3'114	11.7
	Euro 5b	6'650	25.0
	Euro 6b	7'848	29.5
	Euro 6c	248	0.9
	Euro 6d	33	0.1
Treibstoffart	Benzin	14'100	53.1
	Diesel	12'464	46.9
Fahrzeugart	Personenwagen	20'931	78.8
	Lieferwagen	5'633	21.2
Personenwagen	Benzin	13'041	62.3
	Diesel	7'890	37.7
Lieferwagen	Benzin	1'059	18.8
	Diesel	4'574	81.2

Tabelle 2: Zusammenfassung der gemessenen Fahrzeuge nach Fahrzeugart, Treibstoff und Abgasnorm.

Eine detailliertere Zusammenfassung für den Standort Basel Feldbergstrasse ist im Anhang unter Punkt 8.1 dargestellt. Diese Daten dienen als Input in das Interreg V Atmo-VISION Projekt „Ursachenanalyse der Luftbelastung an der Feldbergstrasse Basel, Wirkungsuntersuchung T30 und Umweltzone“.

Die nachfolgenden **Abbildungen 1 und 2** zeigen die Häufigkeitsverteilung der Personen- und Lieferwagen und die Verteilung der Benzin- und Dieselfahrzeuge.

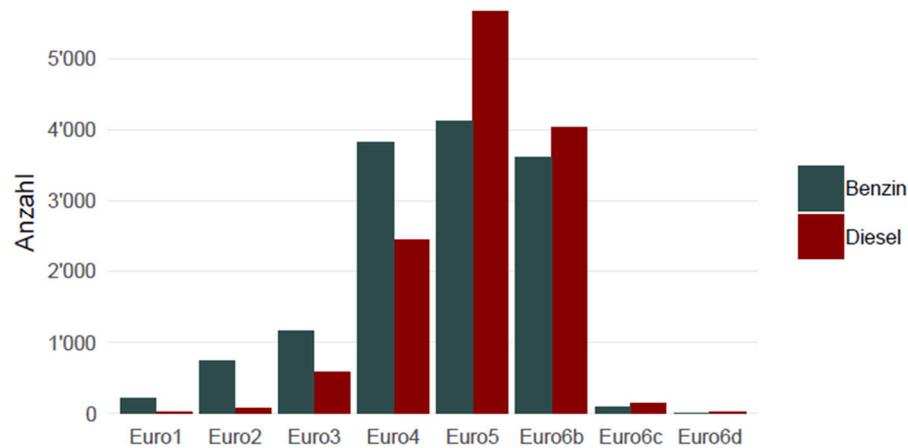


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Messwerten von Personen- und Lieferwagen nach der Qualitätsselektion.

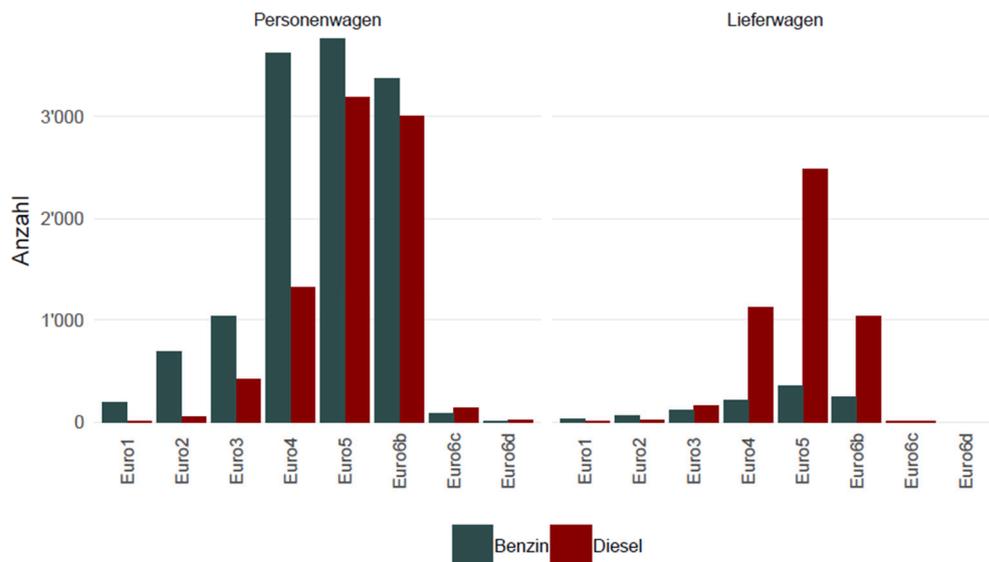


Abbildung 2: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Messwerten nach der Qualitätsselektion, Personen- und Lieferwagen getrennt betrachtet.

5. Stickoxid-Emissionen im realen Fahrbetrieb

5.1. Flotten-Emissionen nach Fahrzeug- und Treibstoffart

Die **Abbildung 3** fasst die NO_x-Emissionen aller Personen- und Lieferwagen der RSD Messkampagne zusammen und bildet so die mittlere Emission der gemessenen Fahrzeugflotte ab.

Dabei entspricht die Zahl im Zentrum der mittleren NO_x-Emission in g/kg Treibstoff. Rund die Hälfte aller Fahrzeuge (innerer Kreis, bläuliche Farbtöne) sind benzinbetriebene Fahrzeuge, der Rest wird mit Diesel betrieben (innerer Kreis, rot/orange Farbtöne). Lieferwagen machen einen Anteil von weniger als etwa 20% aus und sind hauptsächlich dieselbetriebene Fahrzeuge.

Die Verbrennung von Diesel in Dieselfahrzeugen produziert deutlich mehr NO_x als dies bei Benzinfahrzeugen mit Katalysator der Fall ist. Moderne Dieselfahrzeuge müssen deshalb Abgasreinigungs-Systeme verwenden um den NO_x-Ausstoss zu regulieren. Dies geschieht zum Beispiel indem Reduktionsmittel wie adBlue (Harnstoff) in das Abgasreinigungssystem eingespeist werden¹². Trotz der Abgasreinigung tragen die hohen NO_x-Emissionen der Dieselfahrzeuge im realen Fahrbetrieb überproportional stark zu den Gesamtemissionen der Fahrzeugflotte bei (**Abbildung 3**, äusserer Ring).

Am stärksten wirkt sich dies beim Beitrag der Diesel-Lieferwagen aus. Dieselfahrzeuge leisten somit einen grossen Beitrag zur verkehrsbezogenen Luftbelastung durch NO_x und ihrer negativen Auswirkung^{20,21,22}. Rund 38 % der gemessenen Personenwagen sind Dieselfahrzeuge. Die Lieferwagen sind mit rund 81 % grösstenteils dieselbetrieben.



Abbildung 3: Mittlere NO_x-Emission (Zahl im Zentrum, in g/kg Treibstoff; NO₂-Anteil aus HBEFA) aller gemessenen Personen- und Lieferwagen im aktuellen Messjahr sowie die Verteilung der Anzahl gemessener Benzin- und Dieselfahrzeuge (innerer Ring) und ihr relativer Beitrag zur mittleren NO_x-Emission (äusserer Ring).

5.2. Emissionen nach Fahrzeugjahr- und Abgasnorm

Die **Abbildungen 4 und 5** zeigen die mittleren realen NO_x -Emissionen nach Treibstoff und Fahrzeugjahr. Die Emissionen werden nach Personen- und Lieferwagen, sowie nach Diesel- und Benzinfahrzeugen differenziert betrachtet. Als weitere Grösse ist zudem der Emissionsgrenzwert aus der Typenzulassung mit seiner Verschärfung über die Zeit in den Abbildungen eingetragen.

Abbildung 4 zeigt verschiedene Entwicklungen:

Zum einen stossen Dieselfahrzeuge grundsätzlich mehr NO_x aus als Benzinfahrzeuge. Die Emissionen der Benzinfahrzeuge folgen über die Jahre den Vorgaben der Grenzwerte auch im realen Fahrbetrieb. Zum anderen blieben die realen NO_x -Emissionen dieselbetriebener Liefer- und Personenwagen trotz der verschärfenden Grenzwertentwicklung anhaltend hoch. Die NO_x -Emissionen der Diesel-Personenwagen stagnierten zwischen der Mitte der 90-er Jahre und 2012. Seit 2013 sinken die Emissionen. Erst die Dieselfahrzeuge der neusten Generation zeigen im Durchschnitt eine starke Abnahme.

Diesel-Lieferwagen haben bis zum Jahr 2015 noch deutlich mehr NO_x im realen Fahrbetrieb emittiert als Diesel-Personenwagen. Ihre Emissionen erreichen 2014 ihren Höchststand. Erst seit 2016 kommt es auch bei den Diesel-Lieferwagen zu einer deutlichen Verbesserung.

Sowohl für Benzin- als auch für Dieselfahrzeuge spiegeln sich die oben beschriebenen Trends auch in der Gruppierung nach Abgasnorm (**Abbildung 5**). Die Emissionen der dieselbetriebenen Fahrzeuge nehmen im realen Fahrbetrieb seit der Einführung der Abgasnorm Euro 1 zu Beginn der 90er-Jahre bis hin zu Fahrzeugen der Abgasnorm Euro 5 trotz mehrfacher Verschärfung der Grenzwerte nicht ab. Im Falle der Lieferwagen nehmen sie überproportional zu.

Erst mit der Einführung der aktuellen Abgasnorm Euro 6 ist nun ein Trendbruch zu erkennen. Bei den Dieselfahrzeugen liegen die aus den RSD Messungen ermittelten durchschnittlichen NO_x -Emissionen bei den Personen- und den Lieferwagen um Faktoren über dem vorgeschriebenen Grenzwert für die Typenzulassung. Mit der Einführung der Abgasnorm Euro 6b nähern sich die gemessenen NO_x -Emissionen dem Grenzwert der Typenzulassung, wobei dieser im realen Fahrbetrieb im Schnitt für alle Euro 6 Fahrzeuge immer noch um den Faktor fünf überschritten wird. Die Messungen der aktuellsten Abgasnormen (Euro 6c und Euro 6d-TEMP^a) zeigen nun erstmals, dass die Grenzwerte der Typenzulassung auch im realen Fahrbetrieb eingehalten werden können.

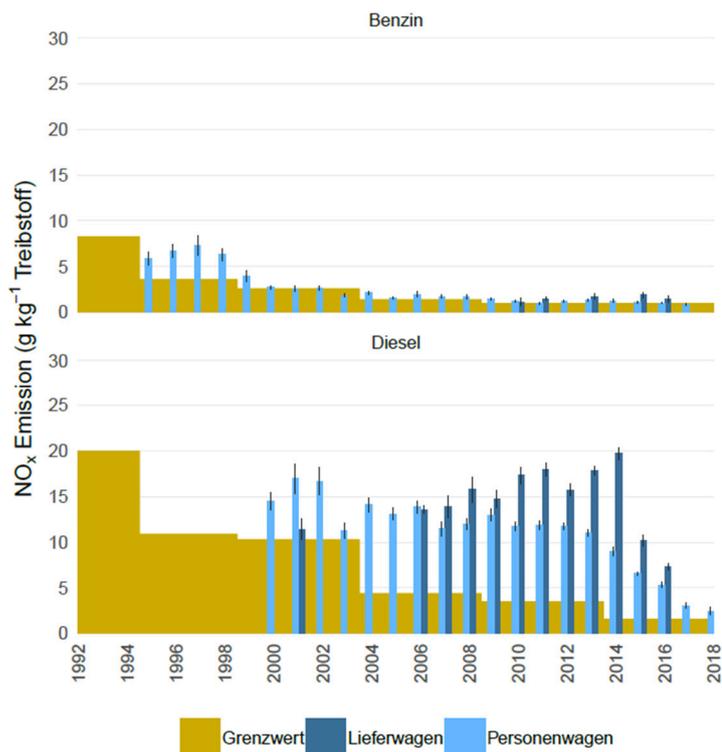


Abbildung 4: Mittlere reale NO_x-Emission (NO₂-Anteil HBEFA) nach Treibstoff, Fahrzeugkategorie und Fahrzeugjahr.

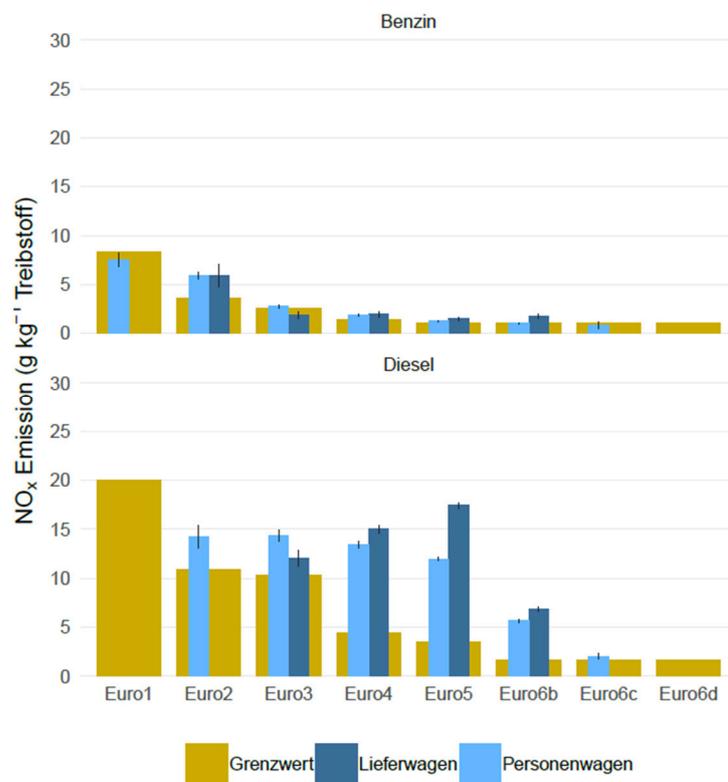


Abbildung 5: Mittlere reale NO_x-Emission (NO₂-Anteil HBEFA) nach Treibstoff, Fahrzeugkategorie und Abgasnorm.

Die **Abbildung 6** fasst die NO_x-Emissionen der diesel- und benzinbetriebenen Personen- und Lieferwagen im realen Fahrbetrieb als Mittelwerte schematisch zusammen.

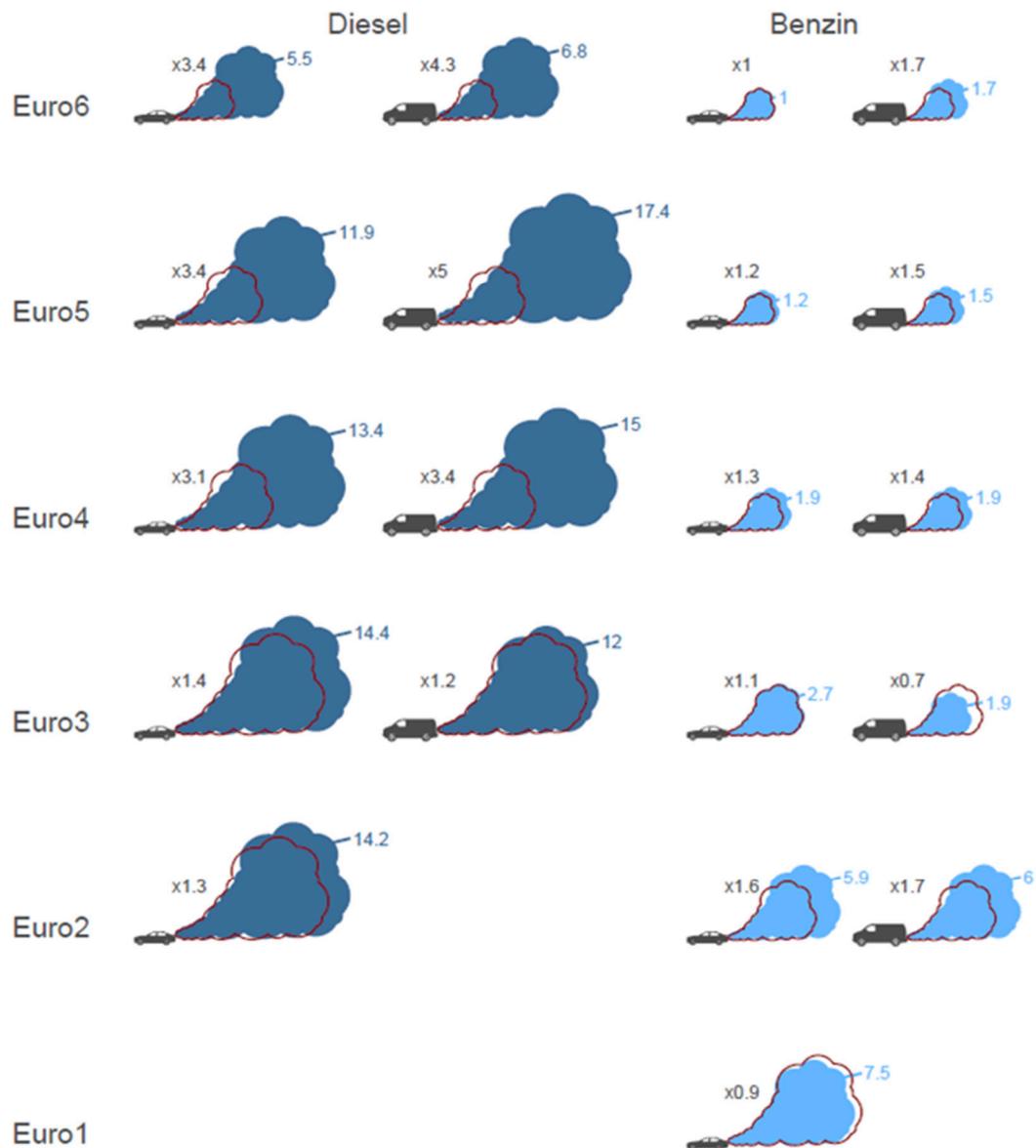


Abbildung 6: Mittlere NO_x-Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) in g/kg Treibstoff als schematische Übersicht; ausgefüllte Abgaswolken symbolisieren den mittels Remote Sensing gemessenen NO_x-Ausstoss auf der Strasse, offene rote Symbole markieren die Grenzwerte aus der Typenzulassung (umgerechnet in g/kg Treibstoff); farbige Zahlen = NO_x-Emission (g/kg Treibstoff), graue Zahlen über Fahrzeug = NO_x Faktor (Emission : Grenzwert).

Der in der Abbildung 6 dargestellte Sachverhalt wird auch in der Tabelle 5 im Anhang 8.3 zusammengefasst.

Die vorliegenden RSD Messungen verdeutlichen:

Bis zur Einführung der Euro 6 Abgasnorm gibt es im Gegensatz zur Verschärfung der Emissionsgrenzwerte keine nennenswerte abnehmende Entwicklung der NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen im realen Fahrbetrieb. Die Emissionen liegen auf der Strasse um Faktoren höher als bei der Typenzulassung auf dem Rollenprüfstand. Das wird auch durch weitere, nationale und internationale Remote Sensing Messungen bestätigt^{9,23}.

Auch in der Realität hinkt die Belastung mit NO₂ entlang viel befahrener Strassen der Entwicklung der Emissionsbeschränkungen für den Strassenverkehr hinterher^{12,24}. Bevor der sogenannte Dieselskandal publik wurde, musste davon ausgegangen werden, dass der unrealistische NEDC Testzyklus die Hauptursache für die beobachtete Diskrepanz (Abbildungen 4 und 5) zwischen den realen Emissionen und den Prüfstandmessungen war⁵. Zum Beispiel beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit während dem NEDC Test nur 33 Kilometer pro Stunde und das Fahrzeug läuft rund ein Viertel der Zeit im Leerlauf²⁴.

Im Zuge des Dieselskandals wurde allerdings klar, dass die Unterschiede zwischen realen Emissionen und dem Prüfstand in vielen Fällen nicht allein durch unterschiedliche Fahrbedingungen zu erklären sind, sondern auch durch illegale Abschaltvorrichtungen und legale Tricks hervorgerufen wurden^{5,26,27}. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass in der Vergangenheit sowohl die unrealistischen Fahrbedingungen des NEDC Testzyklus als auch ineffiziente Abgasreinigungssysteme die Erklärung für die mit dem RSD beobachteten erhöhten NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen im realen Fahrbetrieb sind.

5.3. Herkunft der gemessenen Fahrzeuge (CH / D / F)

Die **Tabelle 3** zeigt, aus welchen Ländern die gemessenen Fahrzeuge stammen. Über alle drei Standorte betrachtet liegt der Anteil der Fahrzeuge aus der Schweiz bei rund 84.5 %, aus Deutschland bei rund 11 % und aus Frankreich bei rund 4.5 %.

Betrachtet man die drei Standorte getrennt, so zeigen sich insbesondere bei den Fahrzeugen aus Deutschland und Frankreich Unterschiede: Der Anteil der Fahrzeuge aus Deutschland liegt je nach Standort im Bereich von 9.1 bis 12.9 % während der Anteil der französischen Fahrzeuge im Bereich von 3.0 bis 6.0 % liegt.

Eine Auswertung der gemessenen Fahrzeuge nach Abgasnormen war nur für die Fahrzeuge aus der Schweiz und dem Fürstentum Liechtenstein möglich.

Standorte	Herkunft	Fahrzeuge Anzahl	Fahrzeuge %
Alle Standorte	Summe	101'038	100
	CH	85'403	84.5
	D	11'100	11.0
	F	4'535	4.5
Feldbergstrasse	Summe	28'531	100
	CH	23'845	83.6
	D	3'688	12.9
	F	998	3.5
Wettsteinstrasse	Summe	26'964	100
	CH	23'713	87.9
	D	2'446	9.1
	F	805	3.0
Zürcherstrasse	Summe	45'543	100
	CH	37'845	83.1
	D	4'966	10.9
	F	2'732	6.0

Tabelle 3: Summen und Anteile in Prozent der nach Herkunft bestimmter Fahrzeuge (Personen- und Lieferwagen) an den einzelnen Messstandorten.

5.4. Vergleich von Fahrzeug-Marken

Die realen NO_x-Emissionen der gemessenen Diesel-Personenwagen nach Fahrzeugmarke sind in der **Abbildung 7**, diejenigen von Diesel-Lieferwagen in der **Abbildung 8** aufgeführt.

Bei den dieselbetriebenen Personenwagen zeigt sich, dass bei den Abgasnormen Euro 4 und 5 unabhängig von der Fahrzeugmarke substantielle Überschreitungen des NO_x-Grenzwertes die Regel sind. Bei den Euro 5 Fahrzeugen liegen die durchschnittlichen NO_x-Emissionen hoch-emittierender Marken im Bereich von 30 g/kg Treibstoff, die Emissionen der saubersten Marken knapp unter 10 g/kg Treibstoff, was aber immer noch rund dem Doppelten des Grenzwertes entspricht.

Auch bei den Euro 6b Fahrzeugen sind punktuell sehr hohe Emissionen auffällig. Dabei wurde bei gewissen Marken gegenüber den Euro 5 Fahrzeugen keinerlei Verbesserung erreicht. In der Regel ist jedoch eine Abnahme der NO_x-Emissionen ersichtlich. Die durchschnittlichen Emissionen vereinzelter Marken befinden sich auch im realen Fahrbetrieb erstmals im Bereich des Grenzwertes der Typenzulassung. Es zeigt sich also, dass innerhalb Euro 6b die Schere zwischen den einzelnen Marken grösser wird. Für Euro 6c liegen noch nicht genug Messdaten vor, um eine entsprechende statistische Analyse vorzunehmen.

In **Abbildung 7** wurden die Marken entlang ihres Medians über alle dargestellten Abgasnormen sortiert. Tendenziell zeigt sich, dass sich die durchschnittlichen Emissionen der verschiedenen Marken in allen Abgasnormen ähnlich verhalten: Marken, die bei Euro 4 eine höhere Emission vorweisen, bestätigen dies auch bei Euro 5 und in der Tendenz ebenfalls bei Euro 6b. Marken mit Emissionen am niedrigeren Ende des Spektrums zeigen dies ebenfalls über mehrere Abgasnormen hinweg. Allerdings wird dieser Trend ab Euro 6b aufgeweicht und die durchschnittlichen Emissionen der Marken verhalten sich heterogener. Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass die Datenbasis bei der Auswertung über Euro 6 Fahrzeuge zum Teil klein ist, so dass bisher nicht alle Marken charakterisiert werden konnten. Die Ergebnisse können also Hinweise auf das Emissionsverhalten verschiedener Marken liefern, sollen aber mitnichten als eine umfassende Charakterisierung der Emissionen einzelner Marken dienen. Trotz dieser Einschränkung sind die Resultate plausibel: Die grobe Reihenfolge des Emissionsverhaltens der Marken in **Abbildung 7** spiegelt sich auch in anderen Untersuchungen wieder, zum Beispiel in der Auswertung der gesammelten europäischen Remote Sensing Daten^{9,28} oder aus PEMS Messungen²⁹.

Bei den Diesel-Lieferwagen (**Abbildung 8**) sind die NO_x-Emissionen über alle Marken für die Abgasnormen Euro 4 und 5 deutlich überschritten. Für Euro 6 liegen noch zu wenig Messungen vor, um einen Vergleich auf Stufe Marke vorzunehmen. Über alle Marken gemittelt ist jedoch auch bei den Lieferwagen eine starke Abnahme ersichtlich (**Abbildung 8**).

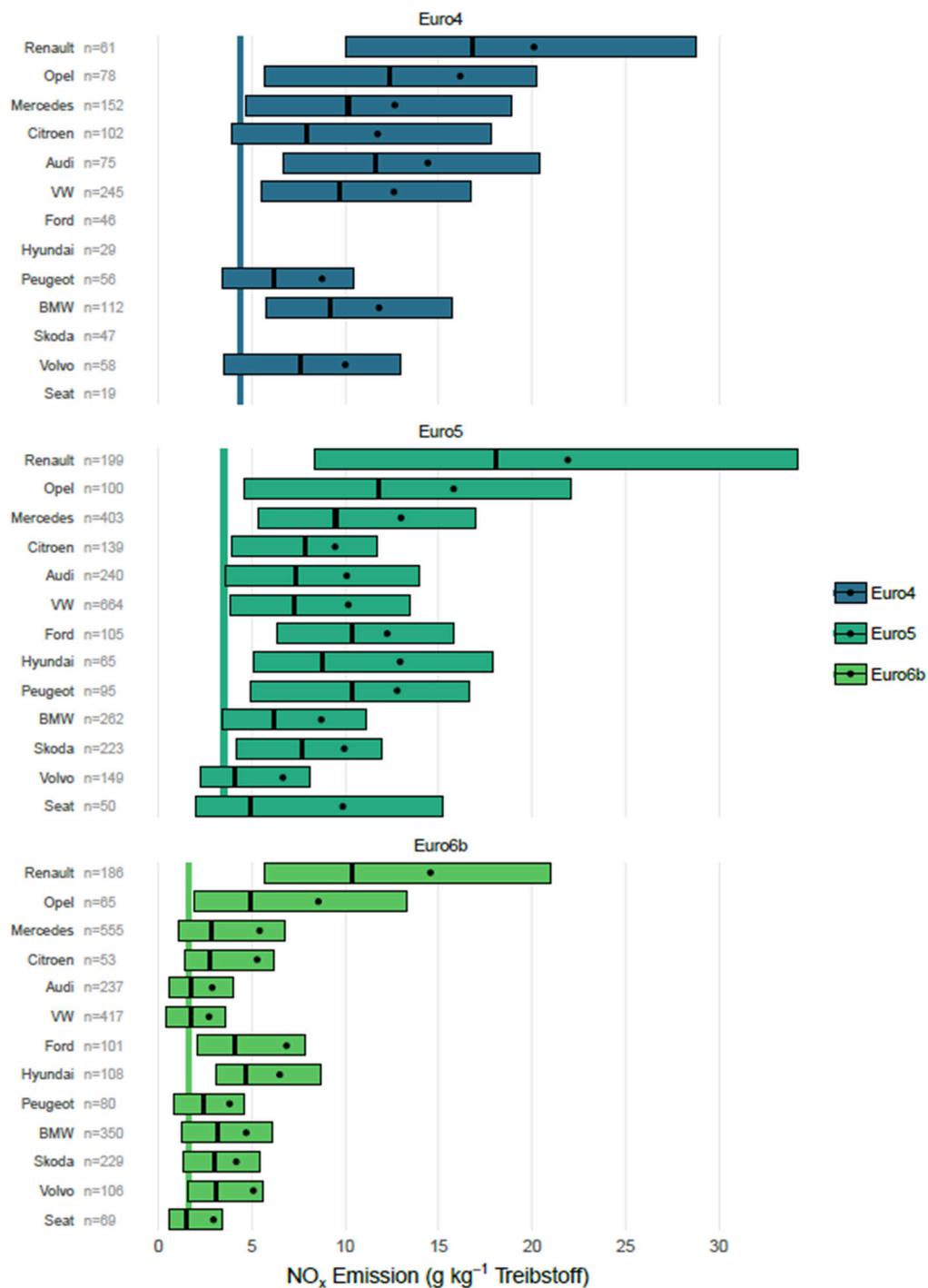


Abbildung 7: NO_x-Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Personen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm (n > 49 und VSP < 20 kW/t); farbige durchgezogene vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert; Box = 25 – 75 Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro 5a Und Euro 5b sind zu Euro 5 zusammengefasst.

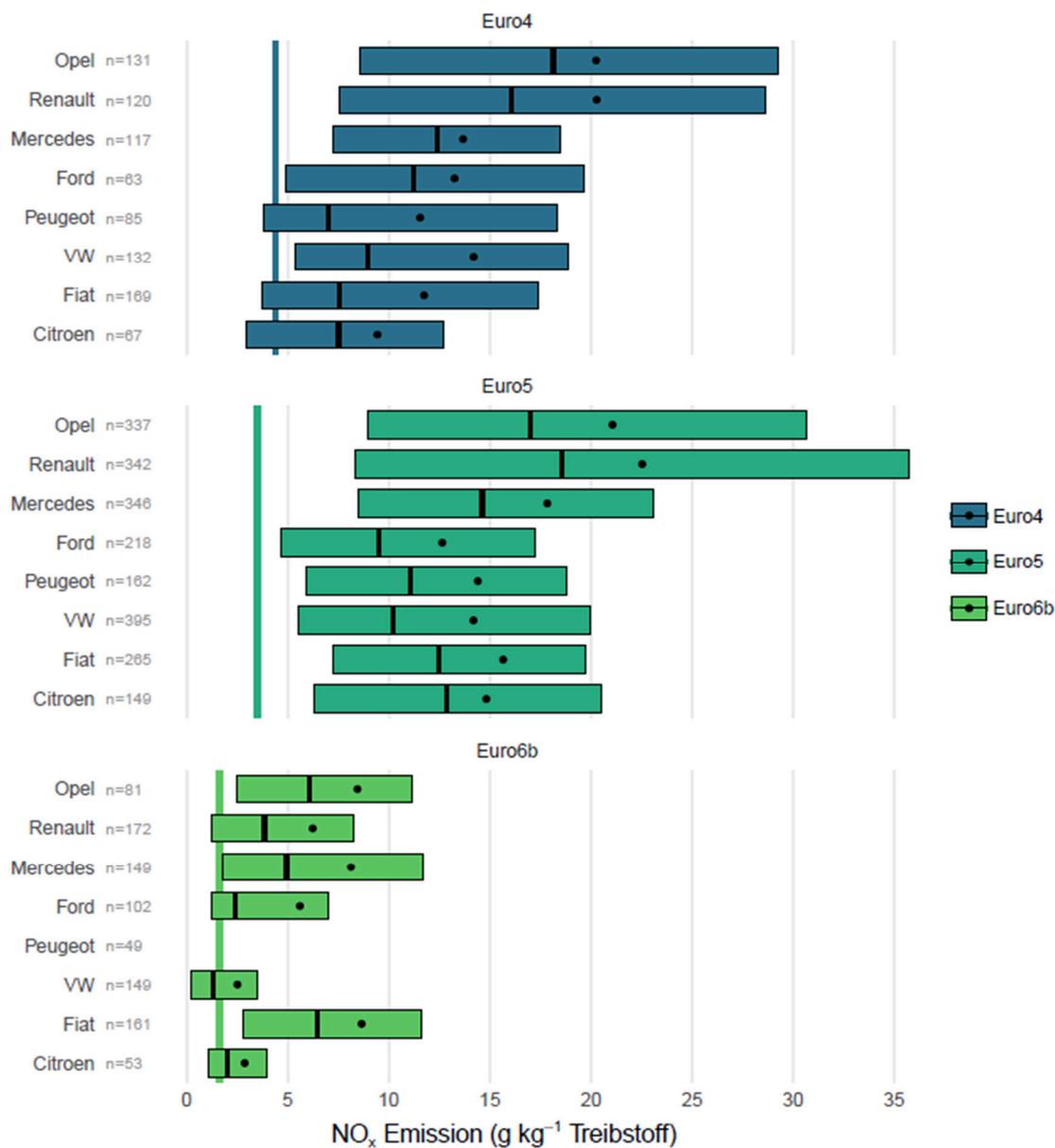


Abbildung 8: NO_x-Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Lieferwagen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm (n > 49 und VSP < 20 kW/t); farbige durchgezogene vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert; Box = 25 – 75 Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro 5a Und Euro 5b sind zu Euro 5 zusammengefasst.

5.5. Einfluss der Lufttemperatur

Die RSD Messungen decken ein breites Lufttemperaturfenster von circa 15 bis 38 °C ab (**Abbildung 10**). Dies erlaubt Auswertungen über den Einfluss der Temperatur auf die realen NO_x-Emissionen. Es ist ersichtlich (**Abbildung 11**), dass die Höhe der NO_x-Emissionen von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird. Sowohl im Bereich tiefer (15 °C) und hoher (> 30 °C) Temperaturen nehmen die NO_x-Emissionen zu. Das Minimum ist im Temperaturbereich von 18 bis 22 °C angesiedelt.

Wie eine aktuelle Studie zeigt, ist der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die NO_x-Emissionen auch bei Euro 6 Fahrzeugen gross, vor allem bei sehr kühlen Temperaturen³⁰. Eine Ursache für diesen Umstand kann das sogenannte Thermofenster sein. Dabei wird die Abgasreinigung abhängig von der Aussentemperatur gesteuert. Grund dafür sind Kohlenwasserstoffe und Russ im Abgas. Wenn die unverbrannten Rückstände in den kalten Rohrleitungen bei sehr kühlen Lufttemperaturen kondensieren, setzen sie den abgasführenden Bauteilen zu. Jedoch reduzieren die Hersteller die Abgasrückführung nicht nur bei Extremtemperaturen, sondern selbst bei mitteleuropäischen Durchschnittstemperaturen. Das Ergebnis sind vermeintlich saubere Diesel, die in der Realität viel mehr Abgase ausstossen³¹.

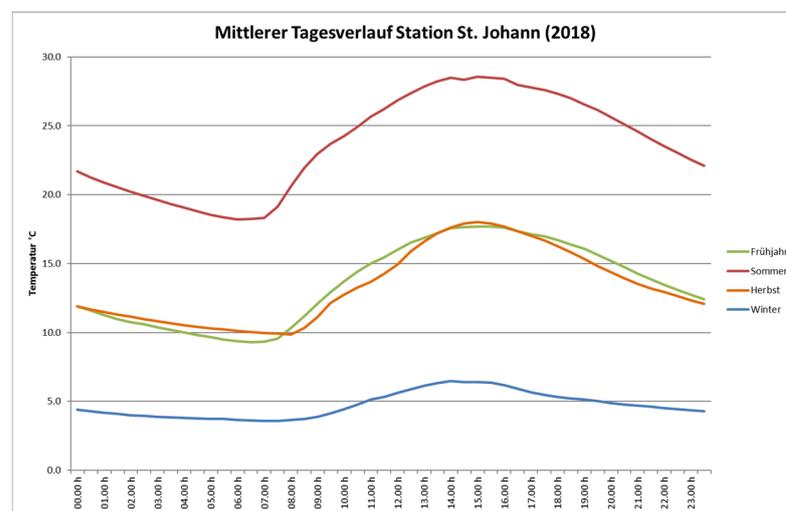


Abbildung 9: Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur in Raum Basel Station St. Johann.

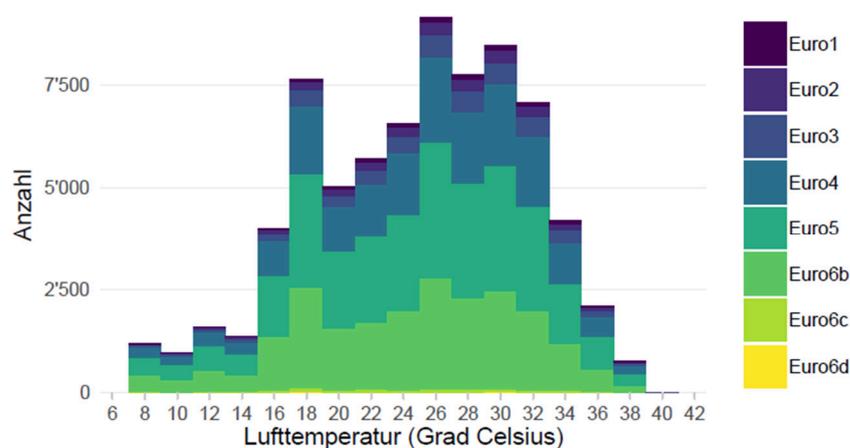


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur während der Messungen, strukturiert nach Abgasnorm

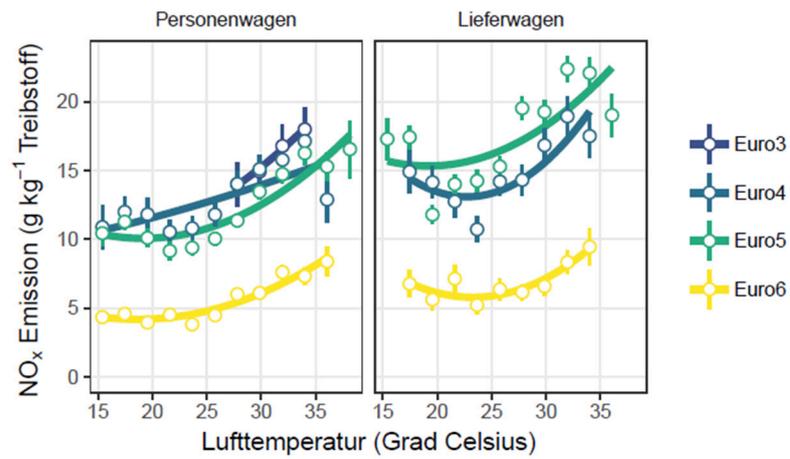


Abbildung 11: Mittlere NO_x-Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Dieselfahrzeugen nach Lufttemperatur und Abgasnorm; Euro 5a und Euro 5b sind zu Euro 5 zusammengefasst.

5.6. Einfluss der Motorlast

Da RSD Messungen an wenige Standorte gebunden sind, reflektieren die Ergebnisse immer die typischen Fahrbedingungen an diesen Orten. Allerdings ergibt sich über die Vielzahl an Messungen und das unterschiedliche Fahrverhalten an einem Ort ein breites Spektrum an Fahrbedingungen, die untersucht werden können⁷. Betrachtet man die Verteilung der fahrzeugspezifischen Motorlast (engl.: "Vehicle Specific Power" VSP³², in kW/t; **Abbildung 12**), so wird deutlich, dass die vorliegenden RSD Messungen eine Bandbreite an Fahrzuständen abbilden.

Dies erlaubt eine Charakterisierung der anfallenden NO_x-Emissionen in Abhängigkeit von der Motorlast (**Abbildung 13**). Mit steigender Motorlast nehmen auch die mittleren NO_x-Emissionen zu. Dieser Trend ist für alle Euro Abgasnormen ähnlich. Für Diesel-Fahrzeuge der Abgasnorm Euro 6 ist eine Nivellierung der mittleren Emissionen nach unten ersichtlich.

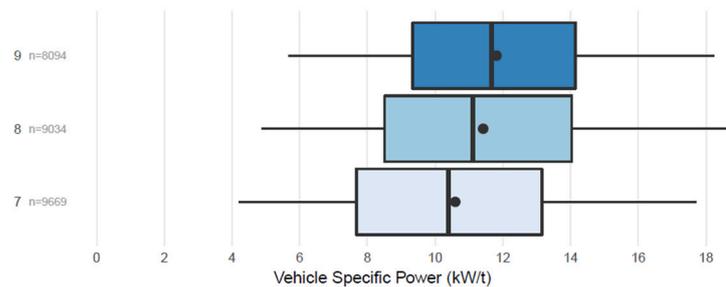


Abbildung 12: Verteilung der Vehicle Specific Power an den Standorten (7: Feldbergstrasse, 8: Wettsteinstrasse, 9: Zürcherstrasse, Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Punkt = Mittelwert).

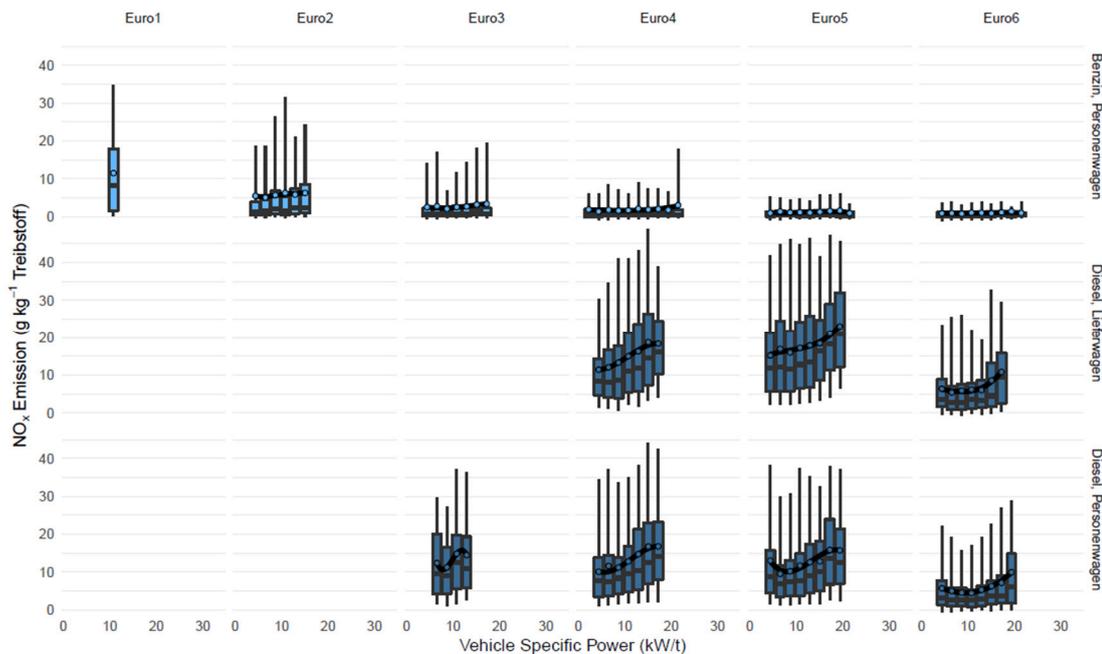


Abbildung 13: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA), strukturiert nach Vehicle Specific Power, Treibstoff, Fahrzeugtyp und Abgasnorm. (Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Punkt = Mittelwert).

6. Fazit

Die Auswirkungen der zu hohen NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen auf die Luftqualität in der Stadt Basel sind deutlich:

- Ohne Abgasmanipulationen an den Dieselfahrzeugen würde deutlich weniger NO_x im Strassenverkehr ausgestossen. Die NO₂-Belastung in städtischen Gebieten und entlang von Hauptverkehrsstrassen könnte heute deutlich tiefer sein.
- Die gegenwärtigen Emissionsüberschreitungen von Dieselfahrzeugen bewirkt eine Verzögerung bezüglich des Absenkpfeils der NO₂-Belastungen um etliche Jahre.

Viele Grenzwertüberschreitungen liessen sich also vermeiden³³⁻³⁵. Dies hat Folgen für Umwelt und Gesundheit, zu denen Dieselfahrzeuge überproportional stark beitragen³⁵. Es entsteht dabei auch ein volkswirtschaftlicher Schaden^{35,37,38}. In den Kantonen Basel-Stadt und Basel-Landschaft werden die Gesundheitskosten aufgrund von erhöhter Sterblichkeit und Spitäleintritten wegen Atemwegserkrankungen, die durch Luftbelastung bedingt sind, auf circa 240 Millionen CHF pro Jahr geschätzt¹.

7. Ausblick

In der Europäischen Union hat bei der Regulierung von Fahrzeugemissionen ein Umdenken eingesetzt, hin zu verstärkter und realistischerer Kontrolle⁴. Am Vorgehen der EU orientiert sich auch der Bund.

Ein wichtiger Schritt war die Ablösung des NEDC durch den WLTC Testzyklus mit Ergänzung von RDE Prüfverfahren im September 2017 bei der Abgasnorm Euro 6d-TEMP.

Zudem werden gegenwärtig in der Europäischen Union im Rahmen des vierten "RDE package" zusätzlich Methoden ausgearbeitet, um die Fahrzeugemissionen der Fahrzeugflotte im realen Fahrbetrieb laufend zu überwachen^a. Die Technik für saubere Dieselfahrzeuge existiert^{34,38}. Deren konsequenter Einsatz und Kontrolle steht nun an oberster Stelle für die Hersteller und Zulassungsbehörden. Daher ist in den kommenden Jahren eine weitergehende Charakterisierung der realen NO_x-Emissionen von Fahrzeugen in der Schweiz wichtig. Dies stellt sicher, dass diese Emissionen korrekt in Emissionsinventaren berücksichtigt werden und ist wichtig, um zu gewährleisten, dass die Verbesserungen mit den neuen Abgasnormen auch auf der Strasse ankommen³⁹. Die vorliegende Messreihe trägt dazu bei, solche Erkenntnisse über die tatsächlichen Emissionen im realen Fahrbetrieb zu gewinnen sowie ihre zeitliche Entwicklung zu verfolgen.

Mit einer Wiederholung der Messkampagne in der Stadt Basel in den nächsten Jahren könnte aufgezeigt werden, ob sich der Trend in der Entwicklung der Abgastechnik bestätigt.¹

^a Im vierten Paket, der Verordnung (EU) 2018/1832 vom 5. November 2018, wurde die Messunsicherheit für RDE-Messungen von NO_x von 0.5 auf 0.43 herabgesetzt und somit der Übereinstimmungsfaktor von 1.5 auf 1.43 reduziert, gültig ab 1. Januar 2020 für neu typgenehmigte Pkw-Modelle (ab 1. Januar 2021 für neu zugelassene Fahrzeuge). Ebenso erfolgte eine Anpassung des Auswerteverfahrens. Darüber hinaus wurden "In-Service-Conformity-Tests (ISC)", also Untersuchungen von bereits im Verkehr befindlichen Fahrzeugen, eingeführt. Diese sind für neu typgenehmigte Pkw-Modelle ab 1. Januar 2019 (ab 1. September 2019 für neu zugelassene Fahrzeuge) verbindlich.

8. Anhang

8.1. Datensatz Basel Feldbergstrasse

Kategorien	Abgas-Norm	Datensätze Anzahl	Prozent %	Mittlere NO _x Emissionen g/kg Treibstoff
Benzin				
Personenwagen		4'371	100	2.51
	Euro 1	67	1.5	8.24
	Euro 2	233	5.3	4.75
	Euro 3	390	8.9	2.24
	Euro 4	1'245	28.5	1.68
	Euro 5a	411	9.4	1.33
	Euro 5b	875	20.0	1.10
	Euro 6b	1'124	25.7	0.86
	Euro 6c	25	0.6	1.93
	Euro 6d	1	0.0	0.46
Lieferwagen		329	100.0	3.32
	Euro 1	9	2.7	9.65
	Euro 2	32	9.7	5.89
	Euro 3	38	11.6	1.07
	Euro 4	72	21.9	2.37
	Euro 5a	32	9.7	1.76
	Euro 5b	78	23.7	1.06
	Euro 6b	68	20.7	1.47
	Euro 6c	-		
	Euro 6d	-		
Diesel				
Personenwagen		2'504	100	9.37
	Euro 1	2	0.1	5.49
	Euro 2	19	0.8	14.36
	Euro 3	190	7.6	15.18
	Euro 4	449	17.9	14.48
	Euro 5a	420	16.8	12.98
	Euro 5b	578	23.1	12.61
	Euro 6b	799	31.9	6.20
	Euro 6c	43	1.7	1.72
	Euro 6d	4	0.2	1.36
Lieferwagen		1'470	100	11.62
	Euro 1	5	0.3	8.18
	Euro 2	7	0.5	19.00
	Euro 3	68	4.6	9.55
	Euro 4	369	25.1	14.89
	Euro 5a	158	10.7	17.39
	Euro 5b	545	37.1	17.04
	Euro 6b	317	21.6	6.51
	Euro 6c	1	0.1	0.43
	Euro 6d	-		

Tabelle 4: Zusammenfassung der gemessenen Fahrzeuge nach Fahrzeugart, Treibstoff und Abgasnorm am Standort Feldbergstrasse.

8.2. Berechnung der NO_x Emissionen

Die Konzentrationsmessung in der Abgaswolke erfolgt für CO₂, CO und HC durch IR-Absorption, für NO, NO₂ und NH₃ durch UV-Absorption. Während der Messungen wird das RSD System mit Hilfe von zertifizierten Gasgemischen mehrmals täglich geprüft und kalibriert. Dies betrifft die Gase CO₂, CO, NO, NO₂, HC (mittels Propan). Nur für CO₂ wird die effektive Konzentration in der Abgaswolke angegeben. Die Konzentration der anderen Schadstoffe wird als Verhältniszahl zur gemessenen CO₂-Konzentration angegeben. Die Konzentrationen der Schadstoffe im unverdünnten Abgas werden dann rechnerisch ermittelt und bezüglich Wasserdampf und Luftüberschuss korrigiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Verbrennung mit einem stöchiometrischen Benzin-Luftgemisch erfolgt. Der Hochrechnungsfaktor wird anhand einer Kohlenstoffbilanz der drei Schadstoffe CO₂, CO und HC im verdünnten Abgas und des bekannten Kohlenstoffanteils bei einer stöchiometrischen Benzinverbrennung ermittelt. Derselbe Hochrechnungsfaktor wird auch für die Berechnung der NO_x-Konzentration im unverdünnten Abgas verwendet. Die Messwerte werden geräteintern nach unterschiedlichen Kriterien auf ihre Plausibilität überprüft und allenfalls automatisch ungültig gesetzt. Insbesondere muss eine ausreichende Anzahl Einzelmessungen mit einer ausreichend hohen Konzentration von CO₂ im verdünnten Abgas vorhanden sein. Solange der Pfad des IR-Strahls des Messgerätes nicht unterbrochen ist, misst das Gerät permanent mit einer Frequenz von 100 Messungen pro Sekunde. Die Messwerte unmittelbar vor dem Unterbruch des IR-Strahls werden als Umgebungskonzentration gespeichert. Nach der Durchfahrt eines Fahrzeugs werden innerhalb eines Intervalls einer halben Sekunde 50 Einzelmessungen durchgeführt. Falls die interne Qualitätssicherung positiv verläuft, wird aus den 50 Einzelmessungen pro Schadstoff ein Mittelwert gebildet. Mit dem aufgrund der Kohlenstoffbilanz ermittelten Hochrechnungsfaktor werden die Konzentrationen im unverdünnten Abgas berechnet und von diesen die gespeicherten Umgebungskonzentrationen der einzelnen Schadstoffe abgezogen⁴⁰.

Die gemessenen NO-Konzentrationen wurden in NO_x (g/kg Treibstoff) unter der Annahme einer vollständigen Verbrennung umgerechnet⁴¹.

$$NO(g/kgTreibstoff) = \frac{30 * Q'' * 860}{(1 + Q + 6Q') * 12}$$

$$\text{mit: } Q = \frac{\%CO}{\%CO_2}, Q' = \frac{\%HC}{\%CO_2} \text{ und } Q'' = \frac{\%NO}{\%CO_2}.$$

NO_x = NO + NO₂ wird aus dem gemessenen NO und unter der Annahme eines Anteils primären NO₂ (p) berechnet:

$$NO_x(g/kgTreibstoff) = NO(g) * \frac{46}{30 * (1 - p)}$$

Währendem der Wert p für Benzinfahrzeuge als stabil angenommen wird, unterscheidet er sich bei den Dieselfahrzeugen je nach Abgasnorm. Die Werte für p stammen aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA⁸).

Die Umrechnung des gesetzlichen Grenzwertes NO_x (g/km) in NO_x (g/kg Treibstoff) ist in Hausberger (2010)⁴² beschrieben.

8.3. Zusammenfassung NO_x Emissionen

Norm		Diesel		Benzin	
		PW	LiW	PW	LiW
Euro 6 (2014)	Faktor Emission über GW	3.4	4.3	1.0	1.7
	Emission in g/kg Treibstoff	5.5	6.8	1.0	1.7
Euro 5 (2009)	Faktor Emission über GW	3.4	11.9	1.2	1.5
	Emission in g/kg Treibstoff	11.9	17.4	1.2	1.5
Euro 4 (2005)	Faktor Emission über GW	3.1	3.4	1.3	1.4
	Emission in g/kg Treibstoff	13.4	15.0	1.9	1.9
Euro 3 (2000)	Faktor Emission über GW	1.4	1.2	1.1	0.7
	Emission in g/kg Treibstoff	14.4	12.0	2.7	1.9
Euro 2 (1996)	Faktor Emission über GW	1.3	-	1.6	1.7
	Emission in g/kg Treibstoff	14.2	-	5.9	6.0
Euro 1 (1992)	Faktor Emission über GW	-	-	0.9	-
	Emission in g/kg Treibstoff	-	-	7.5	-

Tabelle 5: Zusammenfassung der NO_x-Emissionen der diesel- und benzinbetriebenen Personen- und Lieferwagen im realen Fahrbetrieb als Mittelwerte.

9. Literatur

- 1 Luftreinhalteplan 2016 der Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft, LHA, Mai 2017
- 2 Götsch, M., Alt, G.-M., Delb, V. & Sintermann, J. RSD Messungen 2017 – Auswertung und Bericht. 32 (2017).
- 3 Keller, M., Hausberger, S., Matzer, C., Wüthrich, P. & Notter, B. *HBEFA Version 3.3 - Hintergrundbericht*. (INFRAS, 2017).
- 4 Sjödin, A. u. a. *Real-driving emissions from diesel passenger cars measured by remote sensing and as compared with PEMS and chassis dynamometer measurements - Results from Task 2 of the CONOX projec*. (IVL in cooperation with IIASA, University of York, University of Leeds, Kanton Zürich, Opus Remote Sensing Europe, ICCT, Opus Inspection Technical Development Center, Technical University of Graz, 2018).
- 5 Chen, Y. & Borcken-Kleefeld, J. Real-driving emissions from cars and light commercial vehicles – Results from 13 years remote sensing at Zurich/CH. *Atmospheric Environment* 88, 157–164 (2014).
- 6 Felber-Dietrich, D. *Luftverschmutzung und Gesundheit. Übersicht zu den Auswirkungen*. Bundesamt für Umwelt. (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2014).
- 7 Rhim, B. & Achermann, B. *Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE)*. (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2016).
- 8 Hooftman, N., Messagie, M., Van Mierlo, J. & Coosemans, T. A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 86, 1–21 (2018).
- 9 BMVI. *Bericht der Untersuchungskommission „Volkswagen“ - Untersuchungen und verwaltungsrechtliche Maßnahmen zu Volkswagen, Ergebnisse der Felduntersuchung des Kraftfahrt-Bundesamtes zu unzulässigen Abschaltvorrichtungen bei Dieselfahrzeugen und Schlussfolgerungen*. 134 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016).
- 10 Borcken-Kleefeld, J. & Dallmann, T. Remote sensing of motor vehicle exhaust emissions. 40 (ICCT, 2018).
- 11 Tutuianu, M. u. a. Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 40, 61–75 (2015).
- 12 Zimmermeyer, G., Lüers, B. & Holderbaum, B. Der Weg zum sauberen Dieselmotor. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 6, 215–223 (2017).
- 13 ICCT. NOx emissions from heavy-duty and light-duty diesel vehicles in the EU: Comparison of real-world performance and current type-approval requirements. (2016).
- 14 Lee, T., Park, J., Kwon, S., Lee, J. & Kim, J. Variability in operation-based NOx emission factors with different test routes, and its effects on the real-driving emissions of light diesel vehicles. *Science of The Total Environment* 461-462, 377–385 (2013).

- 15 Franco, V., Posada Sánchez, F., German, J. & Mock, P. Real-world exhaust emissions from modern diesel cars. *ICCT communications* 49, 847129–102 (2014).
- 16 Franco, V. *u. a.* Road vehicle emission factors development: A review. *Atmospheric Environment* **70**, 84–97 (2013).
- 17 Bishop, G. A., Starkey, J. R., Ihlenfeldt, A., Williams, W. J. & Stedman, D. H. IR Long- Path Photometry: A Remote Sensing Tool for Automobile Emissions. *Analytical Chemistry* **61**, 671A–677A (1989).
- 18 Borken-Kleefeld, J. & Dallmann, T. Remote sensing of motor vehicle exhaust emissions. 40 (ICCT, 2018).
- 19 Borken-Kleefeld, J. *Guidance note about on-road vehicle emissions remote sensing*. (San Francisco/USA: The International Council on Clean Transportation (ICCT). Available at: <http://theicct.org/road-vehicleemissions-remote-sensing> [Accessed October 13, 2013]
- 20 ICCT. *European vehicle market statistics - Pocketbook 2017/18*. (2017).
- 21 Schmidt, C. W. Beyond a One-Time Scandal: Europe's Ongoing Diesel Pollution Problem. *Environmental Health Perspectives* **124**, A19–A22 (2016).
- 22 Dunmore, R. E. *u. a.* Diesel-related hydrocarbons can dominate gas phase reactive carbon in megacities. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 9983–9996 (2015).
- 23 Jenk, H. The CONOX project: Pooling, sharing and analyzing European remote sensing data. (2017).
- 24 OSTLUFT. *Luftqualität 2016*. (OSTLUFT - Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein, 2017).
- 25 ICCT. Real-Driving Emissions Test Procedure for Exhaust Gas Pollutant Emissions of Cars and Light Commercial Vehicles in Europe. (ICCT, 2017).
- 26 Vojtíšek-Lom, M. *u. a.* On-road and laboratory emissions of NO, NO₂, NH₃, N₂O and CH₄ from late-model EU light utility vehicles: Comparison of diesel and CNG. *Science of The Total Environment* **616-617**, 774–784 (2018).
- 27 Degraeuwe, B. & Weiss, M. Does the New European Driving Cycle (NEDC) really fail to capture the NO_x emissions of diesel cars in Europe? *Environmental Pollution* 222, 234–241 (2017).
- 28 Borken-Kleefeld, J. & andere. Contribution of vehicle remote sensing to in-service/real driving emissions monitoring - CONOX Task 3 report. (IVL in cooperation with IIASA, University of York, University of Leeds, Kanton Zürich, Opus Remote Sensing Europe, ICCT, Opus Inspectio, 2018).
- 29 ICCT. Road tested: Comparative overview of real-world versus type-approval NO_x and CO₂ emissions from diesel cars in Europe International Council on Clean Transportation. (2017).

- 30 Suarez-Bertoa, R. & Astorga, C. Impact of cold temperature on Euro 6 passenger car emissions. *Environmental Pollution* 234, 318–329 (2018).
- 31 Zeitung, S. Der Diesel wird zum teuren Nischenprodukt. *sueddeutsche.de* (2017).
- 32 Jimenez-Palacios, J. L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge* (1998).
- 33 Schneidemesser, E. von, Kuik, F., Mar, K. A. & Butler, T. Potential reductions in ambient NO₂ concentrations from meeting diesel vehicle emissions standards. *Environmental Research Letters* 12, 114025 (2017).
- 34 Anenberg, S. C. u. a. Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets. *Nature* 545, 467 (2017).
- 35 Jonson, J. E. u. a. Impact of excess NO_x emissions from diesel cars on air quality, public health and eutrophication in Europe. *Environmental Research Letters* 12, 094017 (2017).
- 36 Harrison, R. M. & Beddows, D. C. Efficacy of Recent Emissions Controls on Road Vehicles in Europe and Implications for Public Health. *Scientific Reports* 7, 1152 (2017).
- 37 Chossière, G. P. u. a. Public health impacts of excess NO_x emissions from Volkswagen diesel passenger vehicles in Germany. *Environmental Research Letters* 12, 034014 (2017).
- 38 Degraeuwe, B. u. a. Impact of passenger car NO_x emissions on urban NO₂ pollution – Scenario analysis for 8 European cities. *Atmospheric Environment* 171, 330–337 (2017).
- 39 Vaughan, A. R. u. a. Spatially resolved flux measurements of NO_x from London suggest significantly higher emissions than predicted by inventories. *Faraday Discussions* 189, 455–472 (2016).
- 40 Bishop, G. A. & Stedman, D. H. Measuring the Emissions of Passing Cars. *Accounts of Chemical Research* 29, 489–495 (1996).
- 41 Pokharel, S. S., Bishop, G. A. & Stedman, D. H. An on-road motor vehicle emissions inventory for Denver: an efficient alternative to modeling. *Atmospheric Environment* 36, 5177– 5184 (2002).
- 42 Hausberger, S. Fuel Consumption and Emissions of Modern Passenger Cars. 24 (TU Graz, Institute for Internal Combustion Engines; Thermodynamics, 2010).