



Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft
Luft / Monitoring

Langjährige Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing



Zürich, 22. Dezember 2021

J. Sintermann
G.-M. Alt
M. Götsch
F. Baum
V. Delb

www.zh.ch/luft

Monitoring-Bericht Nr. 1, v1.4
Zürich, 22. Dezember 2021

Kanton Zürich / Baudirektion / Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

Zusammenfassung

Der motorisierte Strassenverkehr stösst im Kanton Zürich mehr als die Hälfte der gesamten Emissionen von Stickoxiden (NO_x) aus. An städtischen und stark verkehrsexponierten Standorten wird der Jahresmittelgrenzwert für die Belastung mit Stickstoffdioxid (NO_2) noch deutlich überschritten. Die Belastung sinkt nicht so schnell wie erwartet. Während die Grenzwerte für Fahrzeugemissionen beim Typenprüfverfahren über die Jahre verschärft wurden, zeigen langjährige Messungen im realen Fahrbetrieb, dass die zulässigen Emissionen der jeweiligen Dieselfahrzeuge zwischen Ende der 1990er Jahre bis vor kurzer Zeit im Durchschnitt um ein Vielfaches überschritten wurden. Dafür ist der sogenannte Diesel-Abgasskandal verantwortlich: Ohne Manipulationen und legale Tricks bei der Diesel-Abgasreinigung würde der Strassenverkehr heute bis 50% weniger Stickoxide ausstossen. Die Schadstoffbelastung mit NO_2 an verkehrsnahen Standorten wäre massgeblich reduziert. Die Diskrepanz zwischen realen Emissionen und Emissionsgrenzwerten bei der Typenzulassung verzögert daher die Einhaltung der Immissions-Grenzwerte, weshalb die Bevölkerung in städtisch geprägten, stark verkehrsexponierten Wohngebieten mindestens fünf Jahre länger übermässigen NO_2 -Belastungen ausgesetzt worden ist. Die aktuellen Messungen zeigen, dass dank angepasster Gesetzgebung und Kontrollverfahren Dieselfahrzeuge der neusten Euro 6d Abgasnorm im Durchschnitt nun erstmals auch auf der Strasse die festgelegten Emissionsgrenzwerte für NO_x einhalten.

Die Erkenntnis, dass die Emissionen auf dem Prüfstand nicht den effektiven Emissionen entsprechen, ist auch der Emissionsüberwachung im realen Fahrbetrieb zu verdanken. Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) misst seit über 20 Jahren im Kanton Zürich mit dem RSD-System (Remote Sensing Detector) berührungsfrei am Strassenrand Abgase der vorbeifahrenden Fahrzeuge. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Planung und den Vollzug sowie die Wirkungskontrolle von Luftreinhalte-Massnahmen. Sie fliessen auch in eine gesamteuropäische Datenbank (CONOX remote sensing database) ein und werden für die realistische Ermittlung der Fahrzeugemissionen im Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) verwendet. Zudem sind sie eine Grundlage für wissenschaftliche Studien, die sich spezifischen Fragen widmen, wie dem Anteil hochemittierender Fahrzeuge am gesamten Fahrzeugbestand oder dem Einfluss der Fahrzeugalterung auf die Emissionen.

Die Resultate der Messungen seit 2002 zeigen im Detail, dass bei den benzinbetriebenen Fahrzeugen die Abnahme der realen NO_x -Emissionen dem generellen Verlauf der Abgasnorm-Verschärfungen entspricht. Hingegen gibt es bei den dieselbetriebenen Personen- und Lieferwagen folgende Erkenntnisse:

- Dieselfahrzeuge emittieren je nach Abgaskategorie zwischen Euro 2 und Euro 6b rund 5- bis 20-mal mehr NO_x als Benzinfahrzeuge; für Euro 6c und vor allem Euro 6d sind die Unterschiede zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen viel weniger stark ausgeprägt.
- Der Verlauf der gemessenen realen NO_x -Emissionen war bis etwa 2014 gegenläufig

zum Verlauf der Abgasnorm-Verschärfungen. Die Emissionen haben seit Anfang der 90er Jahre (Abgasnorm Euro 1) bis 2000 (Abgasnorm Euro 3) stark zugenommen. Danach stagnierten sie auf hohem Niveau bis 2014 (Abgasnorm Euro 5). Dies bedeutet, dass Dieselfahrzeuge mit der Abgasnorm Euro 4 und 5 (rund die Hälfte der aktuellen Diesel-PW Fahrzeugflotte) mehr NO_x ausstossen als alte Fahrzeuge mit Abgasnorm Euro 1.

- Diesel-Personenwagen der Abgasnorm Euro 6b (Inbetriebnahme September 2015 bis September 2018) sind im Durchschnitt sauberer als Euro 5 Fahrzeuge. Sie stossen zwar halb so viel NO_x aus wie Euro 5 Fahrzeuge, aber fünfmal so viel, wie aufgrund der Abgasnorm zu erwarten wäre und weisen somit im Mittel nur leicht niedrigere NO_x-Emissionen auf als die Diesel-Personenwagen zu Beginn der 90er-Jahre. Das liegt daran, dass für Euro 6b zwar rund die Hälfte der gemessenen Fahrzeuge auch unter realen Fahrbedingungen ähnlich viel NO_x ausstossen, wie bei der Typenzulassung vorgegeben, der Rest allerdings weiterhin bei Weitem zu viel.
- Die Messungen von Diesel-Personen- und Lieferwagen der Abgasnormen Euro 6c und der neuesten Abgasnorm 6d zeigen eine substantielle Verminderung der realen NO_x-Emissionen auf. Die NO_x-Emissionen bewegen sich im realen Fahrbetrieb im Durchschnitt aller Euro 6d Dieselfahrzeuge im Bereich des vorgegebenen Grenzwertes. Erstmals seit mehr als zwanzig Jahren stossen somit neue Diesel-Personen- und Lieferwagen auch im realen Fahrbetrieb nicht mehr NO_x aus, als gesetzlich vorgeschrieben.
- Die Hypothek der im realen Fahrbetrieb erhöhten Emissionen von Dieselfahrzeugen der Abgasnormen Euro 2 bis Euro 6b besteht noch für Jahre, weil diese Fahrzeuge als Teil in der Fahrzeugflotte weiterhin im Strassenverkehr unterwegs sind. Ihr Anteil nimmt nun mit der Zeit langsam ab, während die Abgasnorm Euro 6d die Flotte weiter durchdringt. Die mittlere NO_x-Emission aller gemessenen Diesel- und Benzinfahrzeuge hatte in den Jahren 2014/2015 ihren Höchststand. Aufgrund der Verbesserungen der neuesten Fahrzeuge beginnt sie nun langsam zu sinken und bewegt sich gegenwärtig ungefähr auf dem Niveau von 2008 bis 2011. Diese Abnahme wird sich in den nächsten Jahren weiter fortsetzen und durch den zunehmenden Anteil an Elektrofahrzeugen in der Fahrzeugflotte beschleunigen.

Die EU hat seit September 2017 schrittweise Verbesserungen bei den Prüfverfahren von neuen Modellen bzw. Fahrzeugen eingeführt, die auch für die Zulassung in der Schweiz gelten. Dabei wurde der veraltete Fahrzyklus durch einen neuen, realistischeren Zyklus ersetzt. Seit der Abgasnorm Euro 6d-TEMP erfolgt eine zusätzliche Prüfmessung im realen Strassenverkehr durch einen Real-Drive-Emissions-Test. Dabei darf die reale NO_x-Emission um den Faktor 2.1 (bis 2021) bis 1.43 (seit 2021) von den Grenzwerten abweichen. In der Europäischen Union ist eine zukünftige Abgasnorm Euro 7 in Vorbereitung, voraussichtlich mit weiteren Grenzwertverschärfungen und der Berücksichtigung von Kaltstart-Emissionen. Die Vergangenheit hat gezeigt: nur eine konsequente Kontrolle führt zu wirklichen Verbesserungen und ist daher weiterhin wichtig. Mit zukünftigen RSD-Messungen kann überprüft werden, ob die Verbesserungen auch längerfristig Bestand haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Zielsetzung	1
2	Bedeutung von Typenprüfung und Emissionen im realen Fahrbetrieb	2
3	Methodik: Emissionen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing	4
3.1	Remote Sensing	4
3.2	Standorte	5
3.3	Der Datensatz und seine Auswertung	6
4	Stickoxid-Emissionen im realen Fahrbetrieb	8
4.1	Flotten-Emissionen nach Fahrzeug- und Treibstoffart	8
4.2	Emissionsentwicklung nach Fahrzeugjahr und Abgasnorm	10
4.3	Vergleich von Fahrzeug-Marken	17
4.4	Einfluss von Lufttemperatur und Motorlast	19
5	Auswirkungen auf die Luftqualität im Kanton Zürich	23
5.1	Emissionen	23
5.2	Immissionen	24
5.3	Fazit	25
6	Ausblick	26
7	Anhang	27
7.1	Fahrzeugflotte im Kanton Zürich	27
7.2	Testzyklen und Fahrbedingungen	30
7.3	Methodik	32
7.3.1	Berechnung von Schadstoffkonzentration im unverdünnten Abgas	32
7.3.2	Berechnung von NO _x -Emissionen	32
7.3.3	Standorte	33
7.3.4	Auswertung der Resultate	33
7.3.5	RSD Messungen im Vergleich	35
7.3.6	Abschätzung der Auswirkungen von Dieselfahrzeug-Emissionen auf die Luftqualität	37
7.3.6.1	Vorgehen	37
7.3.6.2	Resultate NO _x -Emissionen	39
7.3.6.3	Resultate NO _x - und NO ₂ -Immissionen	40
7.4	Struktur des Datensatzes	42
7.5	Bedingungen während der Messungen	45
7.6	Gesamtauswertung RSD Datensatz	47
7.6.1	Schadstoff-Anteile im unverdünnten Abgas	47
7.6.1.1	Stickstoffmonoxid	47
7.6.1.2	Stickstoffdioxid	48

7.6.1.3	Kohlenmonoxid	49
7.6.1.4	Kohlenwasserstoffe	50
7.6.1.5	Opazität	51
7.6.1.6	Ammoniak	52
7.6.2	Detailauswertung Stickoxide	53
7.6.2.1	Stickoxid-Emissionen	53
7.6.2.2	Oxidationsgrad von Stickoxiden aus Dieselfahrzeugen . . .	76

Literatur		77
------------------	--	-----------

1 Motivation und Zielsetzung

Der motorisierte Strassenverkehr ist eine wichtige Quelle von Luftschadstoffen.¹⁻⁸ Er stellt im Kanton Zürich durch die Verbrennung von Benzin und Diesel insbesondere für den Ausstoss von Stickoxiden ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) den wichtigsten Sektor dar (4850 Tonnen NO_x pro Jahr).⁹ Mit seinem Beitrag zur Luftverschmutzung ist der Verkehr eine der Ursachen für Herz-Kreislauf- sowie Atemwegs-Erkrankungen und Lungenkrebs.¹⁰⁻¹⁴ Neben Gesundheitsfolgen verursacht diese Luftverschmutzung weitere Umweltprobleme, zum Beispiel indem sie zu übermässigen Stickstoffeinträgen in empfindliche Ökosysteme beiträgt [¹⁰„sutton_european_2011“];¹⁵].¹⁶

Deshalb wird die Regulierung verkehrsbezogener Schadstoff-Emissionen laufend verschärft und dem Stand der Technik angepasst.¹⁷ Um die Emissionsgrenzwerte zu kontrollieren, werden neue Fahrzeugtypen bei der Typenzulassung unter Laborbedingungen auf einem Rollenprüfstand getestet und, seit der Abgasnorm Euro 6d, auch im realen Fahrbetrieb. Im Zuge des sogenannten “Dieselskandals” wurde allerdings deutlich, dass Manipulationen des Abgasreinigungssystems von Dieselfahrzeugen durch die Motorensteuerungssoftware vorgenommen wurden, die vor allem bei Fahrzeugen der Abgasnormen Euro 4 und Euro 5 zu einem erhöhten NO_x -Ausstoss im realen Fahrbetrieb führen.¹⁸⁻²¹ Die vergangenen Entwicklungen zeigen, dass eine Charakterisierung der Emissionen im realen Fahrbetrieb auf der Strasse notwendig ist, um Fehlentwicklungen zu identifizieren und eine realistische Grundlage für die Beschreibung der Emissionen zu gewährleisten.²²

Um den Schadstoffausstoss aus dem Strassenverkehr im realen Fahrbetrieb zu bestimmen, führt das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) seit dem Jahr 2000 jährlich Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mit einem “Remote Sensing Detector” (RSD) durch. Die Ergebnisse gehen in eine realistischere Beschreibung der Fahrzeugemissionen im Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) ein,²³ leisten einen wichtigen Beitrag zu einer gesamteuropäischen Datenbank von RSD Messungen (CONOX/ERMES Remote Sensing database,^{22,24-27} siehe zudem CARES Projekt für eine Sammlung an pan-europäische Remote Sensing Messungen) und fliessen in wissenschaftliche Studien ein, die sich spezifischen Fragen widmen, wie der zeitlichen Entwicklung von realen Emissionen oder dem Einfluss der Fahrzeugalterung auf die Emissionen.²⁸⁻³¹ Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Planung und den Vollzug von Luftreinhalte-Massnahmen.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Messreihe des AWEL und deren Methodik. Die wichtigsten Erkenntnisse werden mit dem Fokus auf NO_x in einen fachlichen Kontext gesetzt. Dieser Bericht stellt die Erweiterung einer Reihe bereits veröffentlichter Berichte über frühere RSD Messungen des AWEL³²⁻³⁵ dar. Im Folgenden wird zunächst auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen zum Schadstoffausstoss eingegangen, die Methodik der RSD Messungen thematisiert und im Hauptteil die Resultate der Zürcher NO_x RSD-Messungen beleuchtet sowie die Auswirkungen der realen NO_x -Emissionen auf die Luftqualität untersucht. Im Anhang sind methodische Details und weitere Auswertungen dokumentiert.

2 Bedeutung von Typenprüfung 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 "Neue Europäische Fahrzyklus" (engl.: NEDC) Testzyklus durch den realistischeren "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle" (WLTC)^{36,37} abgelöst. Eine Übersicht zu den Geschwindigkeits- und Motorlast-Profilen verschiedener Testzyklen findet sich im Anhang, Abbildung 24. 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 einhalten.³⁸ Für neue Fahrzeuge gilt die Euro 6d-Abgasnorm mit RDE Test erst seit Ende 2019 (im sogenannten RDE Test, mit einem mobilen Abgasmessgerät - Portable Emission Measurement System, kurz PEMS - gemessen). Dabei darf die reale NO_x -Emission um den Faktor 2.1 (bis 2021) bis 1.43 (ab 2021) von den Grenzwerten abweichen. Eine neue **Abgasnorm Euro 7 ist in Planung**. Die verschiedenen Abgasnormen, Testzyklen und Emissionsgrenzwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bei den Prüfstandsmessungen 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 abgebildet.^{26,38,39} 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 auswirken.^{27,40-43} 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 zum Markt zugelassenen 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 abweichen.^{18,44} Aufgrund der Verschärfung der Emissionsgrenzwerte über die Jahre sollte auch im realen Fahrbetrieb eine vergleichbare Entwicklung zu beobachten sein.

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.dieselnet.com und Europäische Kommission).

Abgasnorm	gilt für bzw. seit		Prüfverfahren	RDE CF	g/km					#/km
	neue Fahrzeugtypen	neue Fahrzeuge			CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	
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

3 Methodik: Emissionen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing

3.1 Remote Sensing

Emissionen im realen Fahrbetrieb⁴⁰ können mit einer Technik namens "Remote Sensing"⁴⁵ gemessen werden. Das RSD Messsystem erfasst dabei berührungsfrei die Schadstoffkonzentrationen im Abgas vorbeifahrender Fahrzeuge²² (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 zusammengefasst.²² So kann man die Emissionen vieler verschiedener Fahrzeuge an ausgewählten Orten über eine Bandbreite an Fahrbedingungen charakterisieren.

Im vorliegenden Bericht werden hauptsächlich Ergebnisse zu NO_x -Emissionen präsentiert. NO_x -Emissionen bestehen aus direkt ausgestossenem NO und NO_2 . Da mit dem RSD System NO_2 erst ab dem Messjahr 2016 direkt gemessen werden konnte, beruhen im Folgenden die Angaben zur NO_x Emission auf dem gemessenen NO und einem, aufgrund von Literaturangaben angenommenen NO_2 Anteil (siehe Anhang). Dies erlaubt die Nutzung aller Messungen seit dem Jahr 2002. Wie die seit 2016 durchgeführten direkten Messungen von NO_x inklusive NO_2 zeigen, korrelieren die in HBEFA⁴⁸ aufgeführten Anteile des primären NO_2 sehr gut mit den effektiv gemessenen Werten. Der Vergleich der gerechneten mit den gemessenen NO_x -Emissionen ist im Anhang ersichtlich.

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), erfolgt der Vergleich indirekt. In einer separaten Analyse⁴² wurde jedoch gezeigt, dass die RSD Messungen auch treibstoffverbrauchs-gewichtet (mit der Einheit g/km) ähnliche Ergebnisse zeigen, wie in der hier angegebenen Einheit g/kg Treibstoff.

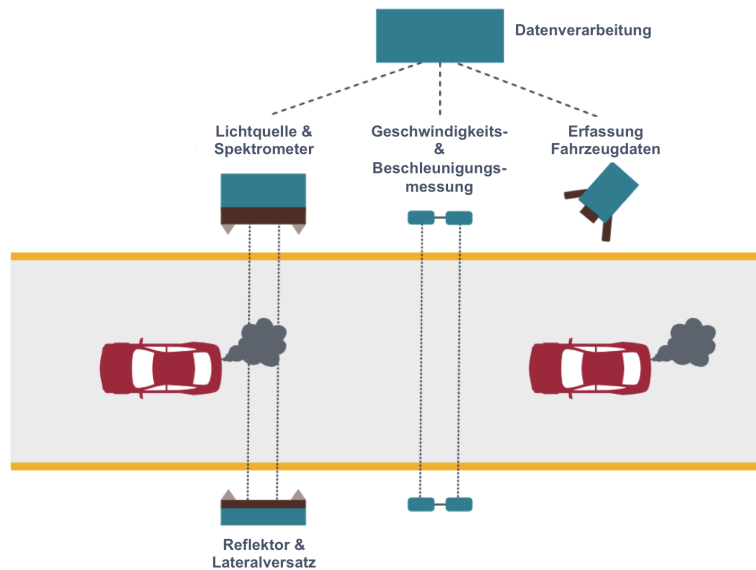


Abbildung 1: Messaufbau des RSD Systems (Quelle: Borken-Kleefeld und Dallmann, 2018).

3.2 Standorte

Die langjährigen Remote Sensing Abgasmessungen finden seit dem Jahr 2000 am gleichen Standort in Gockhausen statt (Abbildung 2a). Der Messort befindet sich zwischen Dübendorf und Zürich. Es handelt sich dabei um eine typische Pendleroute mit hohen Verkehrsspitzen am Morgen. Seit dem Jahr 2016 wird zusätzlich an einem weiteren Standort in der Gemeinde Regensdorf gemessen (Abbildung 2b). Dieser befindet sich zwischen Regensdorf und Dielsdorf an der Verbindungsstrasse vom Furttal ins Wehntal. Der Verkehr fliesst dort den Tag über gleichmässig, mit einer geringen Zunahme gegen Abend. Tabelle 2 listet Kennzahlen der beiden Standorte auf. Bei verschiedenen Gelegenheiten wurde in manchen Jahren an weiteren Standorten eine geringe Anzahl an zusätzlichen Messungen gemacht (siehe Anhang, Tabelle 3). In den Jahren 2019 und 2020 konnte aufgrund von Bautätigkeit an der Strasse in Gockhausen ausschliesslich am Standort in Regensdorf gemessen werden.

Um RSD Messungen durchzuführen, müssen am Standort bestimmte Rahmenbedingungen vorliegen. Dies betrifft vor allem die Platzierung des Messsystems und den Verkehrsfluss. Die wichtigsten Anforderungen an eine RSD Messstelle, welche beide Standorte erfüllen, sind:

- richtungstrennte Fahrbahn
- leicht ansteigende Fahrbahn um wenig Fahrbedingungen mit Leerlauf zu erfassen
- ausreichend Platz für das optische Messgerät, den Spiegel und das Geschwindigkeitsmessgerät
- keine zu hohen Randsteine (falls die Geräte nicht auf der Fahrbahn platziert werden können)

- Platz für das Infrastruktur-Fahrzeug
- möglichst keine unmittelbare Abzweigung / Kreuzung
- flüssiger Verkehr
- ausreichend Verkehr
- Stromanschluss



Abbildung 2: Übersicht über die beiden massgeblichen Messstandorte im Kanton Zürich.

3.3 Der Datensatz und seine Auswertung

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse jährlicher Messkampagnen seit dem Jahr 2002 präsentiert. Die Messungen ergeben einen über die Jahre gewachsenen Datensatz (siehe auch Anhang, Tabelle 4), der eine detaillierte Charakterisierung der Emissionen im realen Fahrbetrieb sowie ihres Verlaufes erlaubt. Wenn nicht anders ausgewiesen, werden im Folgenden Auswertungen über den gesamten Datensatz präsentiert. Abbildung 3 zeigt die Anzahl an Messwerten von Personen- und Lieferwagen unterteilt nach Abgasnorm, welche für diese Auswertung zur Verfügung stehen. Weitere Details in Bezug zu Qualitätsselektion, Auswertung und Struktur des RSD Datensatzes finden sich im Anhang. Die technischen Fahrzeugdaten^a vorbeifahrender Fahrzeuge werden anonymisiert den Messwerten zugewiesen. Die Auswertung der Schadstoffe der gemessenen Fahrzeuge erfolgt auf Ebe-

Tabelle 2: Messstandorte (DWV = durchschnittlicher Werktagsverkehr in Anzahl Fahrzeuge pro Tag, QS = Qualitätsselektion).

Bezeichnung	x	y	signalisierte Geschw.	Neigung	DWV	Verkehrsfluss	Kommentar	Anzahl Messwerte nach QS
Gockhausen	2687688	1248870	60 km/h	9.4%	10000	locker, unregelmässig	jährlich, ausser 2019/2020 (Baustelle)	326111
Regensdorf	2677495	1256365	60 km/h	4.4%	10000	locker, unregelmässig	ab 2016	114308

^a Quelle: Bundesamt für Strassen ASTRA (ab 2018) und Strassenverkehrsamt Kanton Zürich (vor 2018)

ne von Fahrzeugtyp, Abgasnorm, Treibstoff, Fahrzeugjahr^a und Hersteller beziehungsweise Marke.

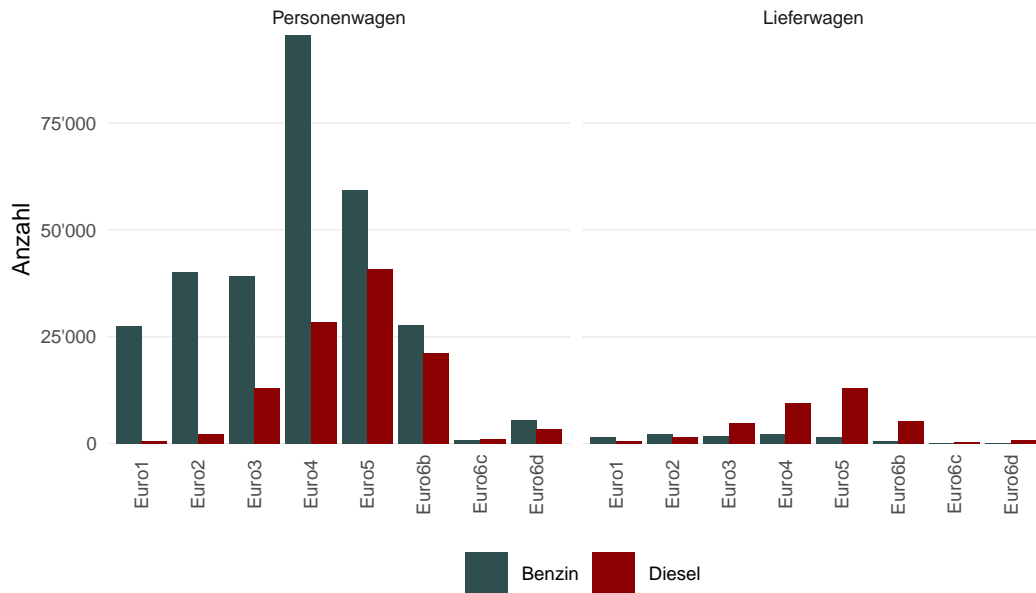


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Messwerten von Personen- und Lieferwagen nach der Qualitätsselektion.

^a Wenn Angaben vorhanden, wurde das Modelljahr verwendet, ansonsten das Jahr der Inbetriebnahme

4 Stickoxid-Emissionen im realen Fahrbetrieb

4.1 Flotten-Emissionen nach Fahrzeug- und Treibstoffart

Dieselfahrzeuge stossen deutlich mehr NO_x aus, als Benzinfahrzeuge, bei denen bereits seit langem Katalysatoren zur Abgasreinigung eingesetzt werden. Moderne Dieselfahrzeuge verwenden daher Abgasreinigungssysteme, um den NO_x -Ausstoss zu begrenzen. Dies geschieht zum Beispiel, indem Reduktionsmittel wie 'adBlue' (wässrige Harnstofflösung) in das Abgasreinigungssystem eingespeist werden.³⁸ Die langjährigen Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb zeigen auf, dass über alle Fahrzeuge betrachtet, welche in den jeweiligen Messjahren vermessen wurden, seit 2002 bis zum Jahr 2014 mit steigender Tendenz NO_x ausgestossen wurde (Abbildung 4). Dies ist auf zwei Entwicklungen zurückzuführen. Während die mittleren Emissionen der Benzinfahrzeuge über die Jahre sanken, verblieben die mittleren Emissionen aller Dieselfahrzeuge auf einem stetig hohen Niveau. Zudem ist der Anteil der Diesel-Personenwagen an der Fahrzeugflotte in den letzten zwei Jahrzehnten von 3% auf rund 30% gestiegen. Heute ist also im Kanton Zürich rund jeder dritte zugelassene Personenwagen ein Dieselfahrzeug. Lieferwagen sind fast gänzlich dieselbetrieben (siehe auch Abbildung 22, Anhang). Seit dem Jahr 2017 sinkt der Anteil an neu zugelassenen Diesel-Personenwagen wieder (dies gilt auch für die gesamte Schweiz)⁴⁹ - möglicherweise eine direkte Folge von sinkendem Vertrauen in Dieselfahrzeuge. Nichtsdestotrotz, aufgrund des über die Jahre gestiegenen Anteils an Dieselfahrzeugen hat die mittlere Emission der gesamten gemessenen Flotte über die jeweiligen RSD Messkampagnen seit 2002 zugenommen (Abbildung 4). Ihr Höchststand wurde erst im Jahr 2014 erreicht. Seit dem Messjahr 2016 sinkt die mittlere NO_x -Emission der Dieselfahrzeuge aufgrund der stärker aufkommenden, saubereren Euro 6 Fahrzeuge markant und dementsprechend verringert sich mittlerweile auch die NO_x -Emission der gesamten gemessenen Fahrzeugflotte langsam. Trotz dieser erfreulichen Entwicklung lag die durchschnittliche Flottenemission aufgrund des nur langsam sinkenden Altbestandes an Euro 4 und Euro 5 Dieselfahrzeugen noch leicht über dem Niveau von Anfang der 2000er Jahre, als mit vorliegender Messreihe begonnen wurde. Diese Resultate lassen sich hinsichtlich der gesamten, im Kanton Zürich registrierten Fahrzeugflotte verallgemeinern, da der Ausschnitt über die gemessene Fahrzeugflotte die Struktur der Gesamflotte im Kanton gut widerspiegelt (siehe Anhang, Abbildung 23).

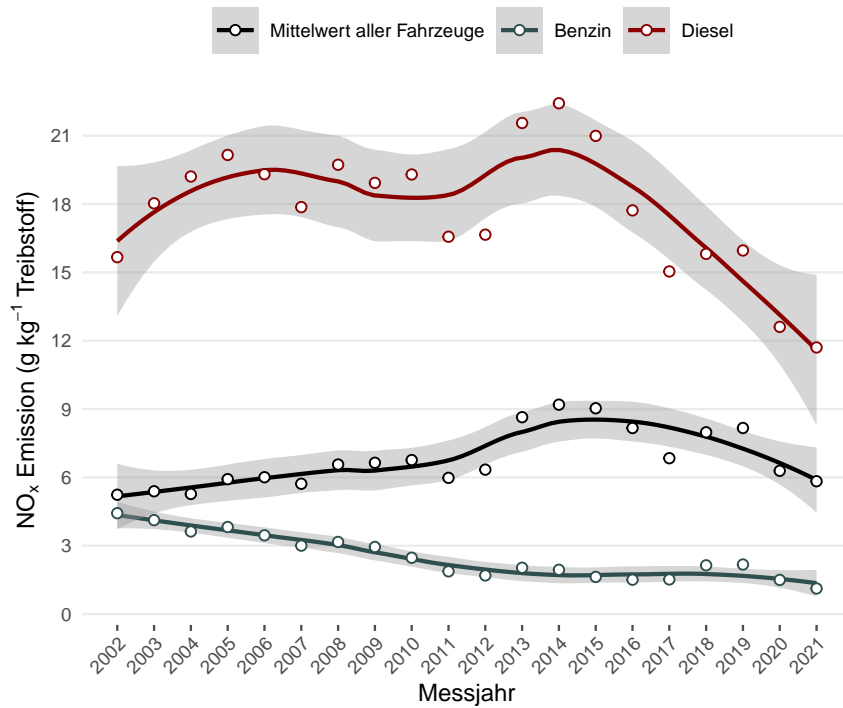


Abbildung 4: Mittlere NO_x Emission aller erfassten Personen- und Lieferwagen pro Messjahr. Kleinere Schwankungen der Mittelwerte von Jahr zu Jahr können eine Folge sich zwischen den Jahren ändernder (erfassten) Flottenzusammensetzung, Fahrbedingungen (wenn an Standorten mit anderen Motorlast-Anforderungen, gemessen wurde) sowie systematischen Messunsicherheiten zwischen verschiedenen Messgeräten sein. Der grau schattierte Bereich zeigt den Vertrauensbereich (98-Prozent Vertrauensintervall) der eingezeichneten Trendlinien an.

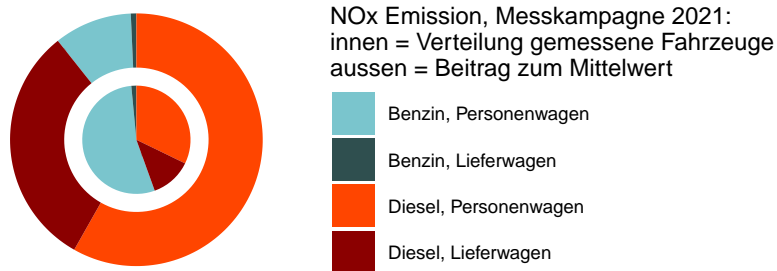


Abbildung 5: Zusammensetzung der mittleren NO_x Emission aller gemessenen Personen- und Lieferwagen im aktuellsten Messjahr mit der Verteilung der Anzahl gemessener Benzin- und Dieselfahrzeuge (innen) und ihrem relativen Beitrag zur mittleren NO_x Emission (ausen); die Daten in dieser Abbildung entsprechen dem jüngsten 'Mittelwert aller Fahrzeuge' in der vorherigen Abbildung.

Abbildung 5 fasst die NO_x-Emissionen aller Personen- und Lieferwagen der aktuellen RSD Messkampagne zusammen (die Daten entsprechen dem jüngsten 'Mittelwert aller Fahrzeuge' in Abbildung 4) und bildet so die mittlere Emission der gemessenen Fahrzeugflotte ab. Ungefähr 60% aller gemessenen Fahrzeuge sind benzinbetrieben (innerer Kreis, bläulicher

Farbton), den Rest stellen Dieselfahrzeuge dar (innerer Kreis, roter Farbton). Lieferwagen machen einen Anteil von ca. 20% aus und sind fast ausschliesslich Dieselfahrzeuge (vergleiche Anhang zur Struktur und Entwicklung der Zürcher Fahrzeugflotte). Trotz der Abgasreinigung, die in dem überwiegenden Teil der Dieselfahrzeuge verbaut ist, stossen diese im realen Fahrbetrieb durchschnittlich weiterhin deutlich mehr NO_x aus, als Benzinfahrzeuge. Somit tragen die hohen NO_x -Emissionen der Dieselfahrzeuge überproportional stark zu den Gesamtemissionen der vermessenen Fahrzeugflotte bei (Abbildung 5, äusserer Ring). Am stärksten wirkt sich dies bei dem Beitrag der Diesel-Lieferwagen aus. Dieselfahrzeuge leisten somit einen grossen Beitrag zur verkehrsbezogenen Luftbelastung durch NO_x und ihrer negativen Auswirkung.^{50–52}

4.2 Emissionsentwicklung nach Fahrzeugjahr und Abgasnorm

Vorbemerkung: Im Folgenden geben Balkendiagramme mit Fehlerbalken den arithmetischen Mittelwert \pm Standardfehler an. Box-and-Whisker-Plots stellen die 5% bis 95% Perzentile (Whiskers), die 25% bis 75% Perzentile (Box) und den Median (Strich) sowie den arithmetischen Mittelwert (Punkt) dar; Ausreisser werden nicht dargestellt.

Abbildung 6 zeigt die mittleren realen NO_x -Emissionen nach Fahrzeugjahr, Abbildung 7 diejenigen nach verschiedenen Abgasnormen. 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 der Abbildung eingetragen^a. Abbildung 6 zeigt verschiedene Entwicklungen: Zum einen stossen Dieselfahrzeuge 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 Mitte der 90er-Jahre und 2012. Seit 2013 sinken die Emissionen. Erst die Dieselfahrzeuge seit ca. 2015 zeigen im Durchschnitt eine deutliche Abnahme. Trotzdem wiesen Diesel-Personenwagen, die zwischen 2015 und 2017 produziert wurden, im Mittel nur leicht niedrigere NO_x -Emissionen auf, als zu Beginn der 90er-Jahre. Diesel-Lieferwagen haben bis zum Jahr 2015 noch deutlich mehr NO_x im realen Fahrbetrieb emittiert als Diesel-Personenwagen. Ihre Emissionen erreichten 2014 ihren Höchststand. Erst seit 2016 kommt es auch bei den Diesel-Lieferwagen zu einer klaren Verbesserung. Diesel-Personenwagen der Generation ab dem Jahr 2018 weisen erstmalig seit Mitte der 90er Jahre auch unter realen Fahrbedingungen ähnliche NO_x -Emissionen auf, wie per Typenzulassungs-Grenzwert definiert. Diesel-

^a Bei den Lieferwagen sind die Abgasgrenzwerte zudem nach Fahrzeuggewicht in folgende Untergruppen unterteilt: Gruppe I (N1-I): Bezugsmasse $\leq 1'305$ kg, Gruppe II (N1-II): $1'305$ kg < Bezugsmasse $\leq 1'760$ kg, Gruppe III (N1-III): Bezugsmasse > $1'760$ kg. In der Abbildung ist bei den Lieferwagen der Grenzwert für die Kategorie N1-I dargestellt. Die Grenzwerte pro Abgasnorm, Treibstoff, Fahrzeugkategorie und allfälliger weiterer Unterscheidungen sind z. B. in "Entwicklung der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich der Abgasemissionen von Motorfahrzeugen und Maschinen" (BAFU, 2019, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/entwicklung_der_schweizerischengesetzgebungim_bereichderabgasemis.pdf.download.pdf/entwicklung_der_schweizerischengesetzgebungimbereichderabgasemis.pdf) im Detail aufgeführt.

Lieferwagen mit Erstzulassung im Jahr 2019 haben nun nachgezogen und sind bei den realen NO_x -Emissionen im Mittel gleichauf mit den Diesel-Personenwagen. Damit halten generell neue Dieselfahrzeuge ab dem Fahrzeugjahr 2019 erstmals seit Mitte der 90er Jahre die NO_x -Emissionsgrenzwerte der Typenzulassung auch auf der Strasse ein.

Sowohl für Benzin- als auch für Dieselfahrzeuge spiegeln sich die oben beschriebenen Trends auch in der Gruppierung nach Abgasnorm (Abbildung 7). Die Emissionen der dieseltreibenden 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 verdoppeln sie sich beinahe. 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 näherten sich die gemessenen NO_x -Emissionen dem Grenzwert der Typenzulassung, wobei dieser im realen Fahrbetrieb im Schnitt immer noch um den Faktor fünf überschritten wurde. Die Messungen der aktuellsten Abgasnormen (Euro 6c und Euro 6d) zeigen nun erstmals, dass die Grenzwerte der Typenzulassung auch im realen Fahrbetrieb eingehalten werden können. Eine wichtige Erklärung für diesen Sachverhalt ist sicherlich, dass mit dem WLTC Fahrzyklus und der RDE Prüfung der Emissionen unter realen Fahrbedingungen sowie der grossen öffentlichen Aufmerksamkeit durch Bekanntwerden des Dieselskandals die Kontrolle der Regulierung zum Schadstoffausstoss deutlich stringenter geworden ist. Diese stringenteren Kontrollen sind ab der Abgasnorm Euro 6c implementiert (siehe Tabelle 1).

Abbildung 8 fasst die Emissionen im realen Fahrbetrieb als Mittelwerte über die Abgasnorm-Hauptkategorien schematisch zusammen. Die vorliegenden RSD Messungen verdeutlichen: Über mehr als 20 Jahre, 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 lagen auf der Strasse um Faktoren höher als bei der Typenzulassung auf dem Rollenprüfstand. Dies wird durch weitere, internationale Remote Sensing^{24,27,44} sowie PEMS Messungen bestätigt. Die Diskrepanz zwischen nominellen NO_x -Emissionen und der Realität wurde auch durch NO_x -Emissionsmessungen über ganzen Städten belegt.^{1,53} In der Realität hinkt auch die Belastung mit NO_2 entlang viel befahrener Strassen der Entwicklung der Emissionsbeschränkungen für den Strassenverkehr hinterher.^{38,54} Bevor der sogenannte Dieselskandal publik wurde, musste davon ausgegangen werden, dass der unrealistische NEDC Testzyklus die Hauptursache für die beobachtete Diskrepanz (Abbildung 7) zwischen den realen Emissionen und den Prüfstandsmessungen war.¹⁷ Zum Beispiel beträgt die Durchschnitts-Geschwindigkeit während dem NEDC Test nur 33 Kilometer pro Stunde und das Fahrzeug läuft rund ein Viertel der Zeit im Leerlauf.⁵⁵ 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.^{17,18,56,57} 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.

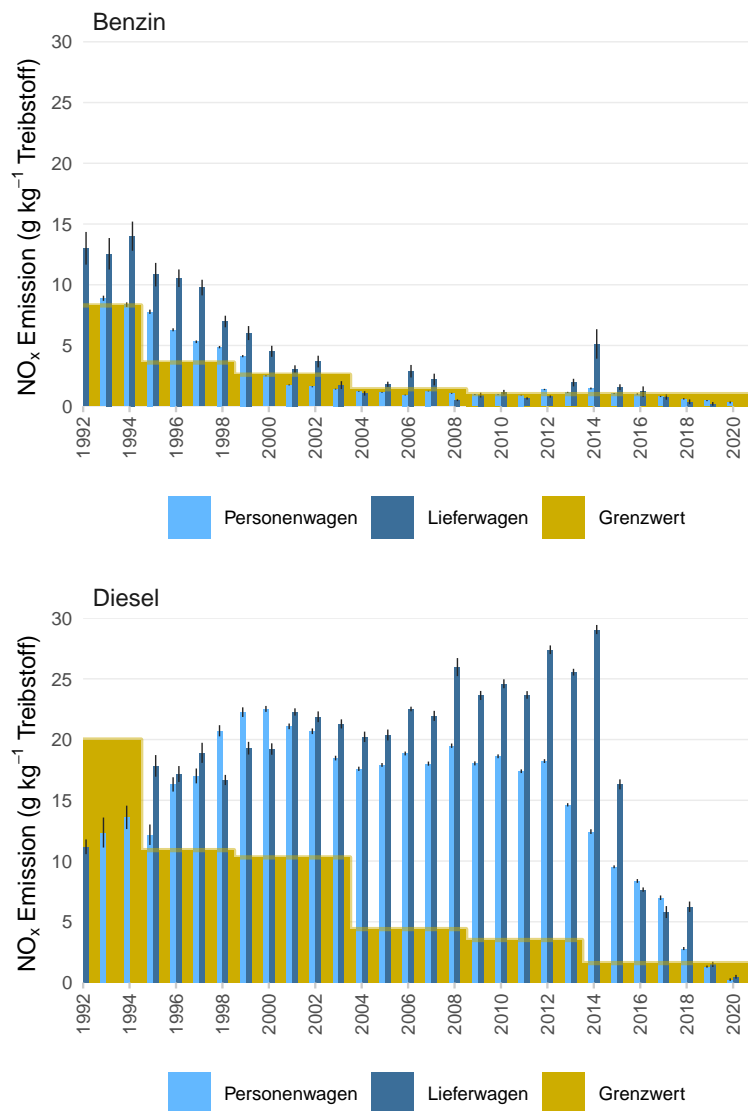


Abbildung 6: Mittlere NO_x Emissionen nach Fahrzeugjahr, Treibstoff und Fahrzeugkategorie.

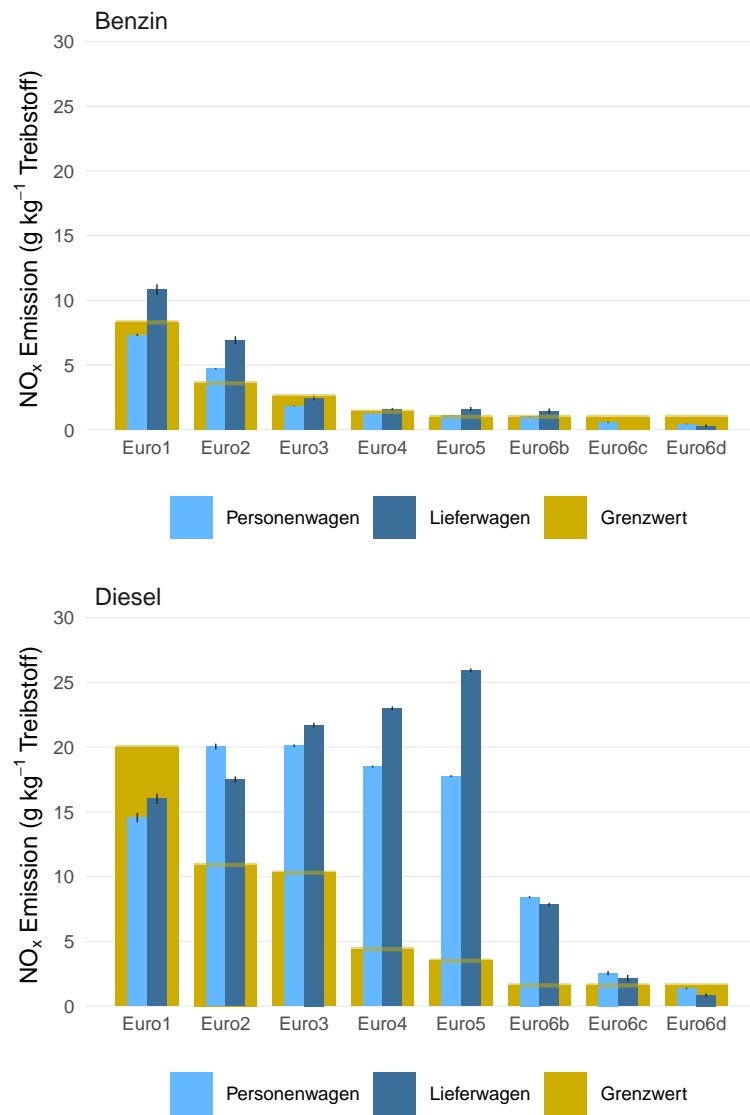


Abbildung 7: Mittlere NO_x Emissionen nach Abgasnorm, Treibstoff und Fahrzeugkategorie.

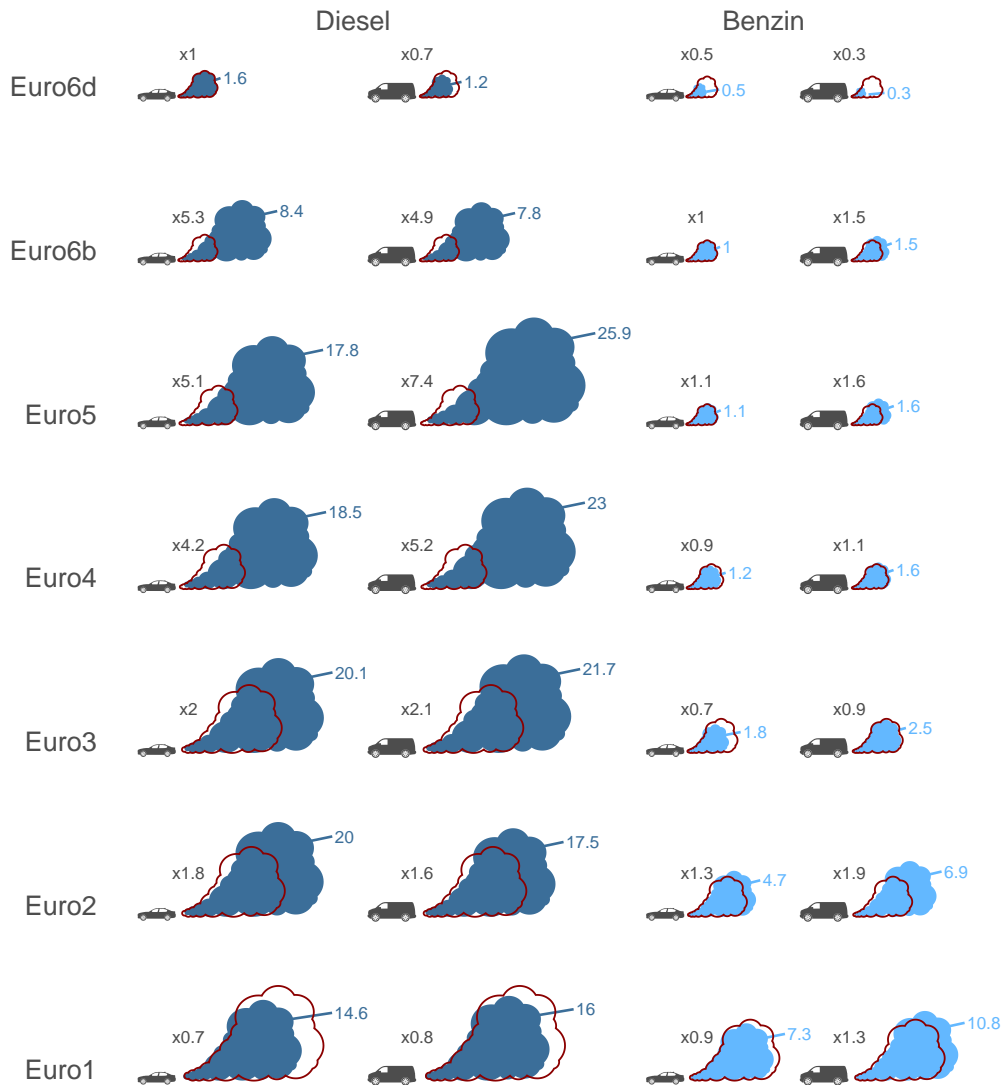


Abbildung 8: Reale NO_x Emission als schematische Übersicht; ausgefüllte Abgaswolken symbolisieren die mittlere NO_x Emission auf der Strasse, offene rote Symbole zeigen die Grenzwerte aus der Typenzulassung an (umgerechnet in g/kg Treibstoff); farbige Zahlen = reale NO_x Emission (g/kg Treibstoff), graue Zahlen über Fahrzeug = reale Emissionen NO_x Faktor (Emission : Grenzwert); die Unterkategorien in der Abgasnorm Euro 5 wurden hier jeweils in Euro 5 zusammengefasst; Darstellung frei nach ICCT.

Abbildung 9 verdeutlicht die Spannweite an Messwerten für Dieselfahrzeuge der einzelnen Abgasnormen. Ein Teil dieser Variation ist darauf zurückzuführen, dass die Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Messung beispielsweise unterschiedlich schnell fahren und beschleunigen. Dies bewirkt eine Variation der Motorlast und damit der Emission (vergleiche Abschnitt 4.4 und Anhang). Die Unterschiede mitteln sich über eine hohe Anzahl an Messungen grösstenteils heraus. Bei den Fahrzeugen der Abgasnorm Euro 6b vergrösserte sich allerdings die Spanne zwischen den durchschnittlichen realen NO_x -Emissionen (Abbildung 9): Während bei Fahrzeugen der Abgasnorm Euro 5 und älter der Median und Mittelwert näher beieinanderliegen, ist der Mittelwert bei den Euro 6b Fahrzeugen mehr als doppelt so hoch wie der Median. Dieser liegt für Euro 6b deutlich näher am Grenzwert als der Mittelwert. Das bedeutet, dass rund die Hälfte aller Messungen vergleichsweise niedrige reale NO_x -Emissionen aufweisen, während der erhöhte Mittelwert bei den Euro 6b Fahrzeugen auf eine zunehmende Bedeutung einiger hoch-emittierender Fahrzeuggruppen (sogenannte "High Emitters") hinweist. Abbildung 10 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Es wird deutlich, dass im Gegensatz zu Euro 5, wo fast alle Dieselfahrzeuge zum hohen NO_x Ausstoss beitragen, bei Euro 6b rund 50% der Messwerte sauber sind und der Rest der Euro 6b-er Dieselfahrzeuge fast den gesamten Ausstoss an NO_x der Euro 6 Dieselfahrzeuge ausmacht. Solche High-Emitter der Abgasnorm Euro 6b sind daher auch relevant für den Gesamtausstoss an NO_x .^{58,59} Die Messungen der Diesel-Personenwagen der Abgasnorm Euro 6c sowie Euro 6d-TEMP und Euro 6d (beide in Euro 6d zusammengefasst) zeigen erstmals eine substantielle Verminderung der realen NO_x -Emissionen über fast alle Fahrbedingungen und Fahrzeuge auf. Die NO_x -Emissionen bewegen sich für diese Abgasnormen im Bereich des vorgegebenen Grenzwertes. Der Anteil dieser Fahrzeuge an der aktuellen Fahrzeugflotte im Kanton Zürich ist jedoch noch klein (vergleiche Anhang, Abb. 23. Mit voranschreitender Marktdurchdringung von Euro 6d Fahrzeugen ist jedoch mit einer schrittweisen Verbesserung der durchschnittlichen Flotten NO_x -Emissionen zu rechnen, wie sie nun erstmals seit rund 25 Jahren in vorliegender Messreihe beobachtet wird (vergleiche Abbildung 4).

Die RSD Messungen zeigen also, dass es bei der Euro 6b Abgasnorm zu deutlichen Verbesserungen bei den NO_x -Emissionen von Dieselfahrzeugen gekommen ist, dass Euro 6b aber im Umkehrschluss noch keine Garantie für niedrige Emissionen bedeutet hat und es weiterhin die Möglichkeit für das Wirken von Abschaltvorrichtungen der Abgasreinigung gab.^{39,47,56,60–63} Erst durch die RDE Tests ab der Abgasnorm Euro 6d-TEMP bzw. 6d (für neue Fahrzeuge seit September 2019 gültig) sowie durch eine Kontrolle der Emissionen bereits zugelassener Fahrzeuge im praktischen Fahrbetrieb wurde der Spielraum für zu hohe reale Emissionen in den meisten Fahrsituationen geschlossen und die entsprechenden Fahrzeuge stossen im Schnitt in der Realität ähnlich viel NO_x aus, wie bei der Typenzulassung gefordert. Mittel- und längerfristig ist das Abgasverhalten von Euro 6d Fahrzeugen jedoch zwangsläufig noch nicht bekannt und muss daher weiterhin kontrolliert werden. Im folgenden Abschnitt wird der Aspekt der High-Emitter auf der Ebene verschiedener Fahrzeug-Marken betrachtet.

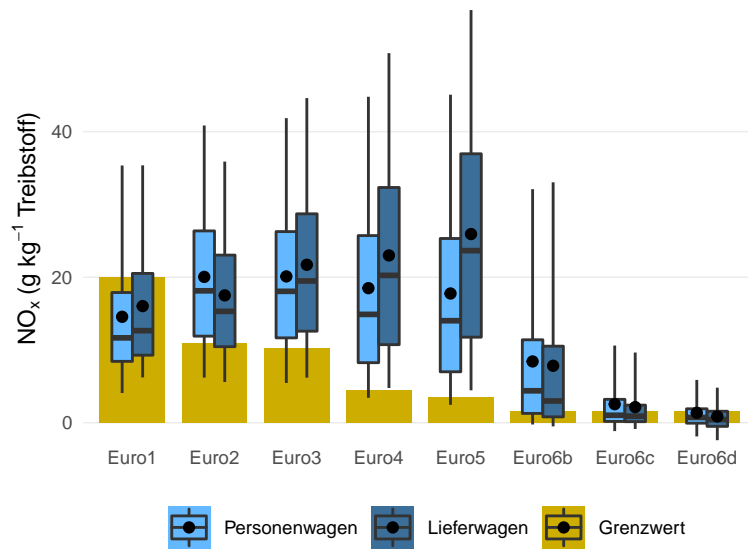


Abbildung 9: Spannweite der realen NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen; die Boxplots zeigen die Spanne der Emissionen als 5 bis 95 Prozent- (vertikaler Strich) und 25 bis 75 Prozent-Perzentil (Box) sowie den Median (horizontaler Strich) und Mittelwert (Punkt).

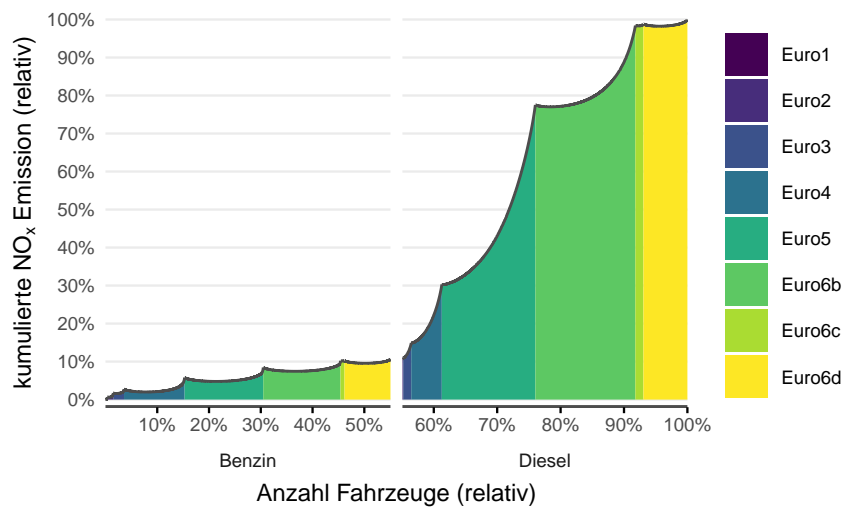


Abbildung 10: Kumulierte NO_x Emissionen aller in der aktuellsten Messkampagne vermessenen Fahrzeuge mit Vehicle Specific Power < 20 kW/t. Starke Anstiege der kumulierten Emissionen weisen auf einen vergleichsweise hohen Einfluss dieser Werte auf die Gesamtemissionen hin; die Abgasnormen Euro 6d-TEMP und Euro 6d wurden zu Euro 6d zusammengefasst

4.3 Vergleich von Fahrzeug-Marken

Die realen NO_x -Emissionen der Diesel-Personenwagen nach Fahrzeugmarke sind in der Abbildung 11, diejenigen von Diesel-Lieferwagen in der Abbildung 12 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 höchst-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 Dieselfahrzeugen 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 klare 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 wurde (siehe auch Abbildung 9 und Anhang). Die Messwerte der Abgasnormen Euro 6c und Euro 6d (hier: Euro 6d-TEMP + Euro 6d) zeigen für die Fälle, bei denen ausreichend Messwerte vorhanden sind, dass nun mit diesen Abgasnormen im Mittel alle Marken den NO_x Emissionsgrenzwert der Typenzulassung auch im im realen Fahrbetrieb einhalten können.

In Abbildung 11 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 etwas heterogener. Bei Euro 6c und Euro 6d kommt es durchweg zu niedrigeren Emissionen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Datenbasis bei der Auswertung von Euro 6 Fahrzeugen kleiner ist, als bei Euro 4 und Euro 5. Die Ergebnisse können somit 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 11 spiegelt sich auch in anderen Untersuchungen wieder, zum Beispiel in der Auswertung der gesammelten europäischen Remote Sensing Daten^{24,26,27,64} oder aus PEMS Messungen.^{26,47}

Bei den Diesel Lieferwagen (Abbildung 12) sind die NO_x -Emissionen über alle Marken für die Abgasnormen Euro 4 und 5 deutlich überschritten. Für Euro 6 liegen weniger Messungen als für Euro 4 und Euro 5 vor, in der Tendenz ist aber für die meisten Marken mit einer genügend grossen Stichprobe auch bei den Lieferwagen eine starke Abnahme ersichtlich (Abbildung 12).

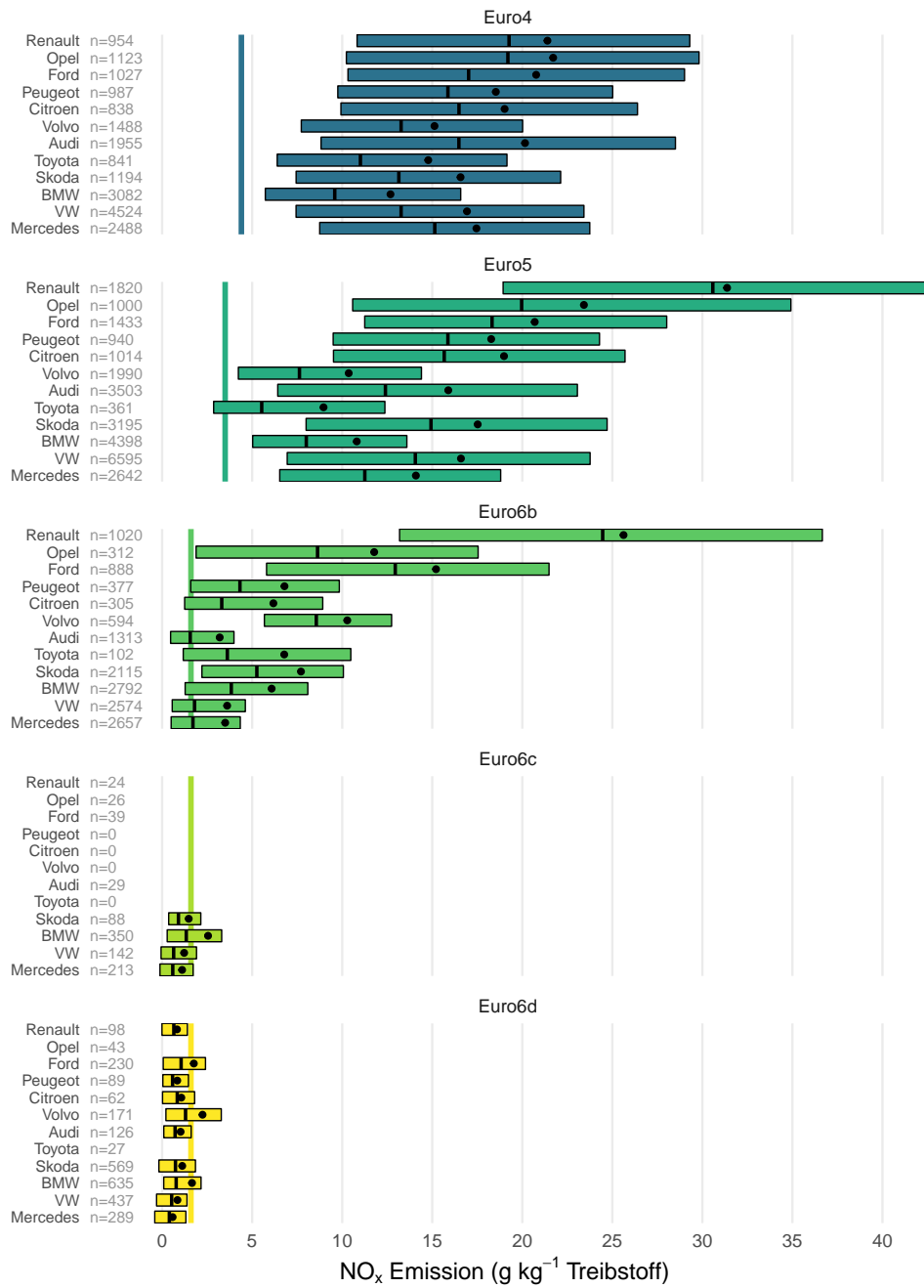


Abbildung 11: Reale NO_x-Emissionen von Personenwagen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm (n > 49 und VSP < 20 kW/t); farbige durchgezogene vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert der Typenzulassung; Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst .

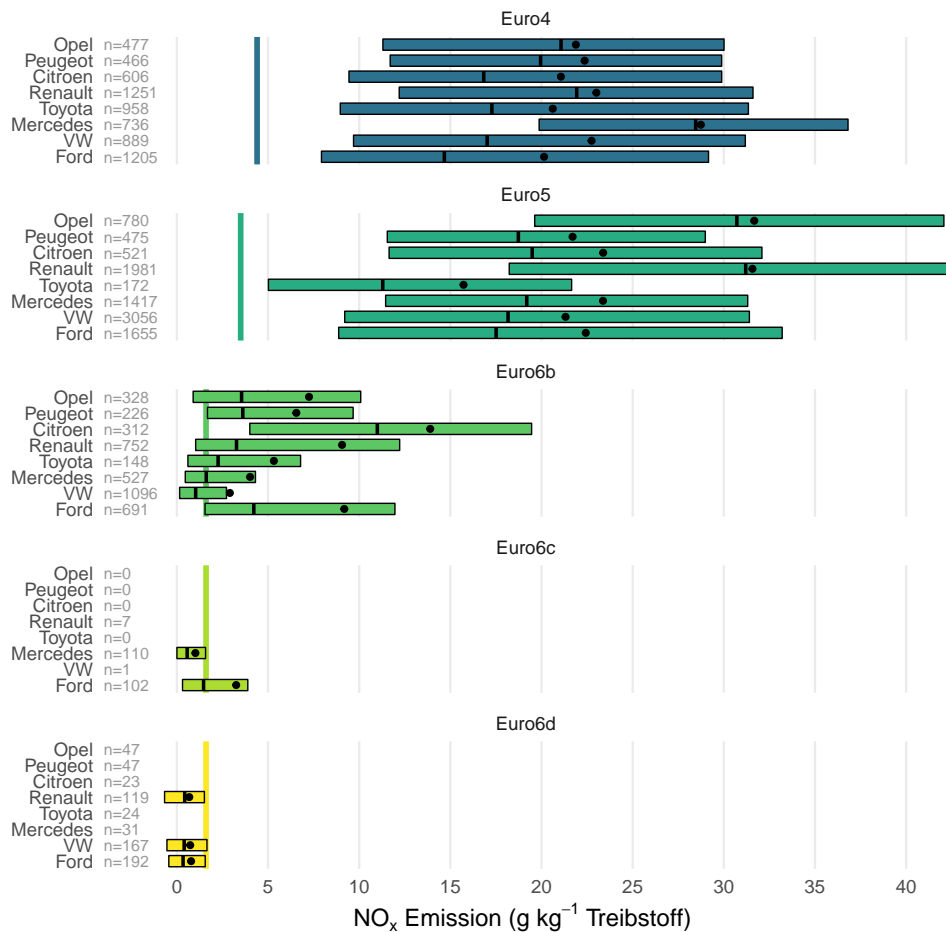


Abbildung 12: Reale NO_x -Emissionen von Lieferwagen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm ($n > 49$ und $\text{VSP} < 20 \text{ kW/t}$); farbige durchgezogene vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert der Typenzulassung; Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst.

4.4 Einfluss von Lufttemperatur und Motorlast

Die Zürcher RSD Messungen decken ein breites Lufttemperaturfenster von circa 10 bis 35 °C ab (Abbildung 13). Dies erlaubt Auswertungen über den Einfluss der Lufttemperatur auf die realen NO_x -Emissionen. Es ist ersichtlich (Abbildung 14), dass die Höhe der NO_x -Emissionen von Euro 4 und Euro 5 Fahrzeugen von der vorherrschenden Lufttemperatur beeinflusst wird. Sowohl im Bereich tiefer ($< 15 \text{ °C}$) und höherer ($> 25 \text{ °C}$) Temperaturen nehmen die NO_x -Emissionen zu. Das Minimum ist im Temperaturbereich von 18 bis 22 °C angesiedelt. Bei Euro 6 Fahrzeugen ist dieses Muster weniger stark ausgeprägt. Allerdings zeigt eine Studie, dass der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die NO_x -Emissionen auch bei bestimmten Euro 6b Fahrzeugen auftreten kann, vor allem bei sehr kühlen Temperaturen.⁶³ Eine Ursache für diesen Umstand kann unter anderem das sogenannte Thermofenster sein. Dabei wird die Abgasreinigung abhängig von der Aussentemperatur gesteuert. Grund da-

für sind Kohlenwasserstoffe und Russ im Abgas. Wenn die unverbrannten Rückstände in den kalten Rohrleitungen bei sehr kühlen Lufttemperaturen kondensieren, kann dies zur Beschädigung und zu Ausfällen von abgasführenden Bauteilen beitragen. Jedoch haben die Hersteller die Abgasrückführung nicht nur bei Extremtemperaturen, sondern selbst bei mitteleuropäischen Durchschnittstemperaturen reduziert. Das Ergebnis sind vermeintlich saubere Diesel, die in der Realität viel mehr Abgase ausstossen, als im engen, optimierten Temperaturfenster.⁶⁵ Insbesondere die neuesten Dieselfahrzeuge (Euro 6d) scheinen nur noch eine geringe Temperaturabhängigkeit aufzuweisen.

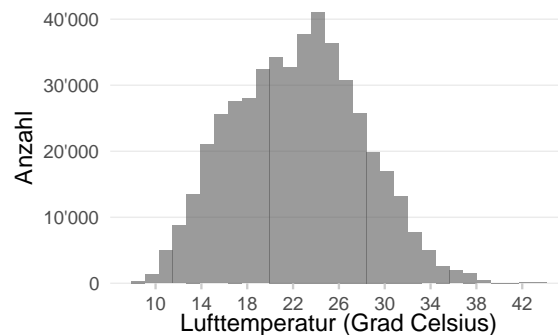


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur während der Messungen.

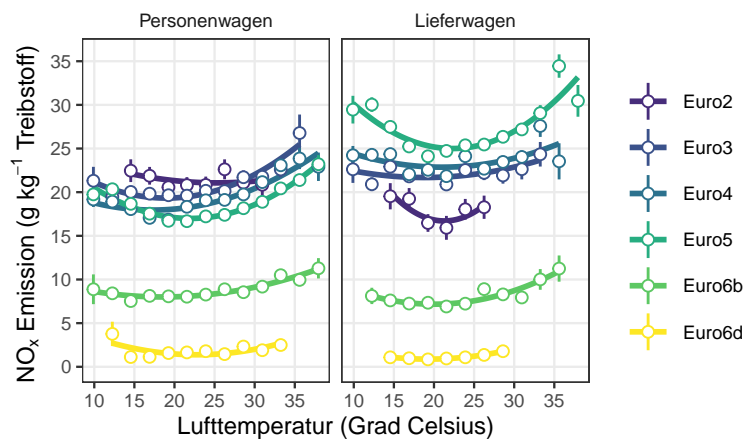


Abbildung 14: Mittlere reale NO_x -Emissionen von Diesel-Fahrzeugen nach Lufttemperatur und Abgasnorm; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst; Euro6d-TEMP und Euro6d sind aus Darstellungsgründen in Euro6d zusammengefasst, weil sie ähnliche Emissionsmuster aufweisen.

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 können.²² Betrachtet man die Verteilung der

fahrzeugspezifischen Motorlast (engl.: “Vehicle Specific Power” VSP,⁶⁶ in kW/t; Abbildung 15)^a, 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 16). Mit steigender Motorlast nehmen auch die mittleren NO_x-Emissionen zu. Dieser Trend ist für alle Euro Abgasnormen älter als Euro 6d ähnlich. Für Diesel-Fahrzeuge der Abgasnorm Euro 6d ist eine Nivellierung der mittleren Emissionen nach unten ersichtlich; sowohl Median als auch Mittelwert liegen dabei im Bereich des Emissionsgrenzwertes der Typenzulassung. Dabei ist auch die Abhängigkeit der NO_x Emissionen von der fahrzeugspezifischen Motorlast gesunken.

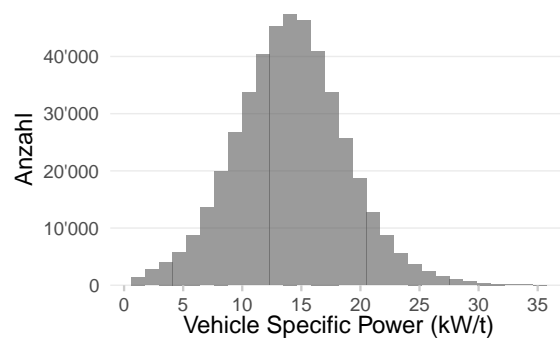


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Messungen vor der Qualitätsselektion, strukturiert nach Vehicle Specific Power.

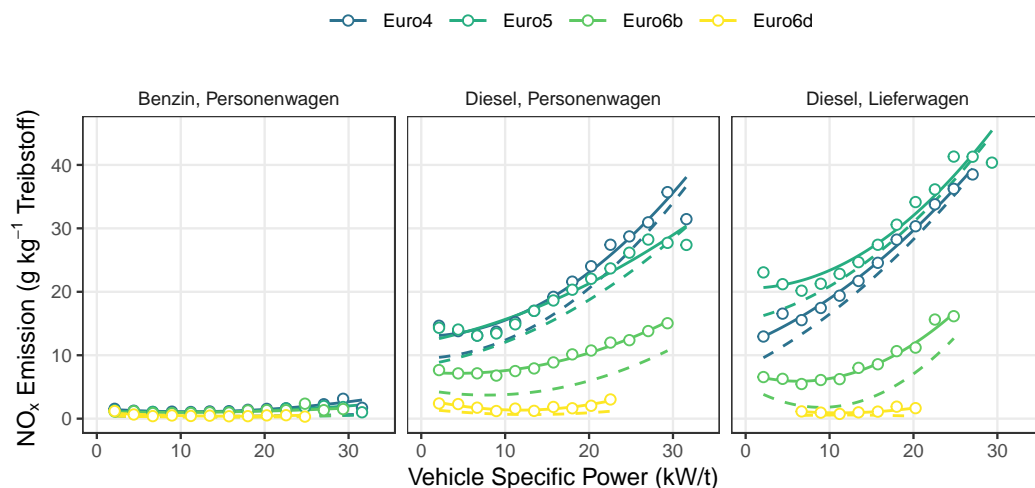


Abbildung 16: NO_x-Emissionen strukturiert nach Vehicle Specific Power, Treibstoff, Fahrzeugtyp und Abgasnorm; die Normen Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst; Euro6d-TEMP und Euro6d sind aus Darstellungsgründen in Euro6d zusammengefasst, weil sie ähnliche Emissionsmuster aufweisen; Kreise und durchgezogene Linien stellen Mittelwerte dar, gestrichelte Linien den Median.

^a Die Auswertung nach Motorlast erleichtert zum Beispiel auch den Vergleich mit anderen Messmethoden wie PEMS. Bei einer genügenden Anzahl Messungen kann ein breites Feld an verschiedenen Motorlasten abgedeckt und miteinander verglichen werden.⁶⁴ RSD und PEMS Messungen zeigen über eine Bandbreite an Bedingungen ähnliche Ergebnisse (siehe Anhang).

Wie die Remote Sensing Messungen also aufzeigen, funktioniert die NO_x -Abgasreinigung in Dieselfahrzeugen in vielen Fällen in einem bestimmten Bereich an Lufttemperaturen sowie bei geringer Motorlast optimal. Abbildung 17 zeigt die mittleren Emissionen in Abhängigkeit dieser beiden Einflussfaktoren zusammen mit der typischen Bandbreite an Bedingungen während der Typenprüfung. Es wird deutlich, dass sowohl für Euro 4 als auch Euro 5 Fahrzeuge die Emissionen auf die Testbedingungen optimiert sind. Ausserhalb dieser Testbedingungen emittieren diese Fahrzeuge im Durchschnitt deutlich mehr NO_x . Dies ist vor allem für Fahrzeuge bis einschliesslich der Abgasnormen Euro 4 und Euro 5 der Fall (und abgeschwächt noch bei Euro 6b), die mit dem NEDC Fahrzyklus überprüft wurden. Seit September 2018 gilt für neue Fahrzeuge die Abgasnorm Euro 6c, bei welcher der NEDC Fahrzyklus durch den etwas realistischeren WLTC Zyklus abgelöst wurde (siehe auch Tabelle 1). Ab der Norm Euro 6d (für neue Fahrzeuge seit September 2019) wird der WLTC durch das RDE-Verfahren ergänzt, in welchem innerhalb definierter Fahrbedingungen die Emissionen zusätzlich auch auf der Strasse im realen Fahrbetrieb überprüft werden. Diese neue, kombinierte Prüfstrategie scheint, soweit momentan zu beurteilen, zu funktionieren: Euro 6d Dieselfahrzeuge weisen weniger Abhängigkeit der NO_x -Emissionen von Lufttemperatur und fahrzeugspezifischer Motorlast auf. Zukünftige Remote Sensing Messungen werden zeigen, ob dieses Verfahren sicherstellt, dass Dieselfahrzeuge auf Dauer in allen relevanten Fahrbedingungen nur so viel NO_x ausstossen, wie bei der Typenprüfung erlaubt.

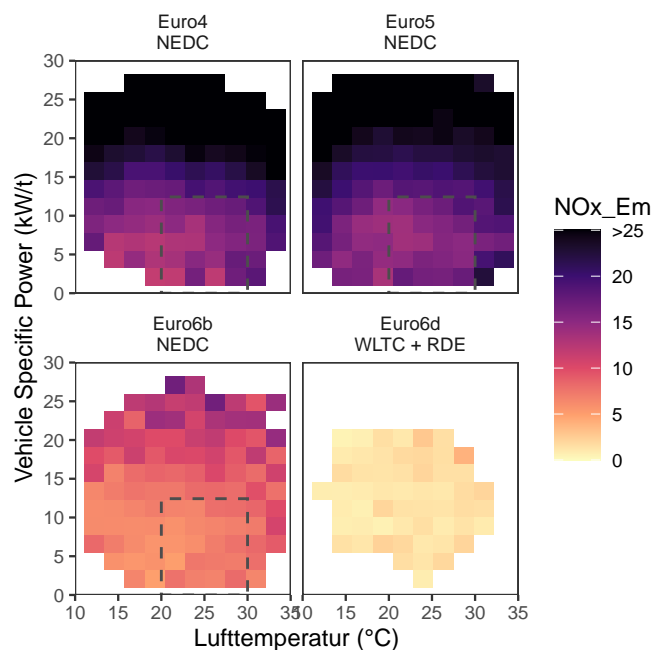


Abbildung 17: Mittlere NO_x Emissionen (in g/kg Treibstoff) von Dieselfahrzeugen nach Abgasnorm (und Testzyklus) in Abhängigkeit von Vehicle Specific Power (VSP) und Lufttemperatur; die gestrichelte Box zeigt horizontal die Bandbreite an Temperaturen, die während der Typenprüfung erlaubt sind, sowie in ihrer vertikalen Ausdehnung das 95-Prozent-Perzentil der VSP-Werte in den jeweiligen Testverfahren; Euro6d-TEMP und Euro6d sind aus Darstellungsgründen in Euro6d zusammengefasst, weil sie ähnliche Emissionsmuster aufweisen.

5 Auswirkungen auf die Luftqualität im Kanton Zürich

Die Grenzwerte der Fahrzeugemissionen wurden über Jahre immer weiter verschärft, um die Luftqualität langfristig zu verbessern. Wie die Messungen der Emissionen im realen Fahrbetrieb jedoch zeigen, wurden die zulässigen NO_x-Emissionen der Typenzulassung bei vielen Dieselfahrzeugen der Abgasnormen Euro 4, Euro 5 sowie teils Euro 6b im realen Fahrbetrieb um ein Vielfaches überschritten (siehe Kapitel 4.2). Gründe sind die Manipulationen bei Dieselfahrzeugen und die Tricks der Fahrzeughersteller zur Umgehung der Abgasnormen. Die Auswirkungen des Abgasskandals auf die Luftqualität im Kanton Zürich wurden mit zwei Szenarien abgeschätzt, welche annehmen, dass:

- alle im Kanton Zürich verkehrenden Fahrzeuge mit den Abgasnormen Euro 5 und Euro 6 die "beste verfügbare Technik" erhielten ("**beste verfügbare Technologie**", **BAT**),
- oder sogar alle im Kanton Zürich verkehrenden Fahrzeuge die Grenzwerte Euro 1 bis Euro 6 auch im realen Fahrbetrieb einhalten würden ("**Einhaltung der Grenzwerte**", **GW**).

Die beiden Szenarien geben also an, wie sich die Emissionen entwickelt hätten, wenn, wenn auf der Strasse nur noch NO_x gemäss den realen Emissionen (Stand 2018) von Euro 6d für Personenwagen und Euro 6b für Lieferwagen ausstossen würden (**BAT**), bzw. alle Fahrzeuge die Grenzwerte für Euro 1 bis Euro 6 auch im realen Fahrbetrieb eingehalten hätten (**GW**). Beide Szenarien unterscheiden sich im Ergebnis nicht massgeblich voneinander.

5.1 Emissionen

Hätten die Hersteller von Personen- und Lieferwagen keine Manipulationen der Abgasreinigung vorgenommen, wären im Kanton Zürich im Jahr 2015 etwa ein Drittel weniger Stickoxide bezogen auf den Gesamtverkehr (Diesel und Benzin; Personen- und Lieferwagen, schwere Motorwagen, Motorräder) ausgestossen worden. Vom Dieselskandal waren am stärksten Euro 5 Personen- und Lieferwagen betroffen. Da im Zuge der Flottenerneuerung die Emissionen dieser Fahrzeugklasse anteilig an denen der Gesamtflotte steigt, erhöhen sich die Auswirkungen des Abgasskandals zwischen den Jahren 2020 bis 2025 weiter. Die Berechnungen zeigen, dass ohne Manipulationen der Abgasreinigung in diesem Zeitraum etwa 50 Prozent weniger Stickoxide ausgestossen würden.

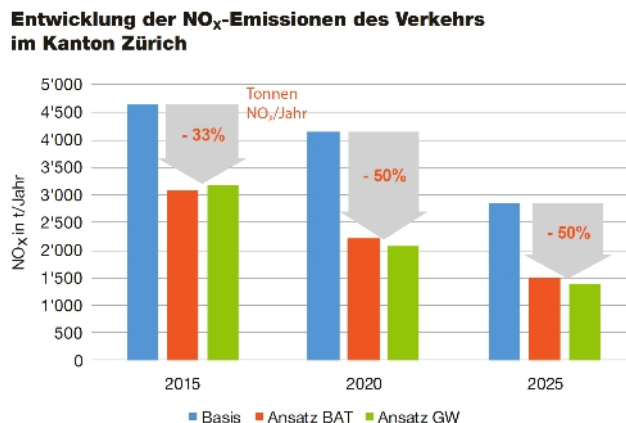


Abbildung 18: Prognose der NO_x-Emissionen nach drei Szenarien: Ausrüstung der Fahrzeuge Stand 2018 (Basis), Reduktion gemäss bester verfügbarer Technologie (BAT) oder konsequenter Einhaltung der Grenzwerte (GW).

5.2 Immissionen

Grenzwertüberschreitungen der NO₂ Belastung können die Gesundheit beeinträchtigen. Um zu untersuchen, wie eine Reduktion der Gesamtemissionen des Verkehrs die Belastungssituation der Bevölkerung verbessert hätte, wurden an beispielhaften Standorten Immissionsbetrachtungen für den Leitschadstoff NO₂^a vorgenommen. Folgende drei Standorte wurden betrachtet:

- Zürich Stampfenbachstrasse: städtisch, Wohnnutzung, mittlere Verkehrsbelastung (Hauptverkehrsstrasse)
- Zürich Rosengartenstrasse: städtisch, Wohnnutzung, starke Verkehrsbelastung
- Effretikon, Im Langhag: ländlich, starke Verkehrsbelastung (Autobahnnähe)

Die untenstehende Abbildung vergleicht die NO₂-Immissionen im Jahr 2015 mit denjenigen die gemäss dem Ansatz «beste verfügbare Technologie» (BAT) zu erwarten wären und illustriert den entsprechenden Jahresmittelgrenzwert. Je nach Standort wäre die Belastung mit NO₂ zwischen 3 und 10 µg/m³ niedriger. In städtisch geprägten Wohngebieten und Agglomerationen betrüge das Senkungspotenzial rund 3 bis 5 µg/m³, entlang verkehrsexponierten Wohnlagen wären zum Teil deutlich höhere Immissionsreduktionen zu erwarten.

^a Erhöhte NO₂-Werte können eine Reizung der Atemwege hervorrufen, langfristig die Lungenfunktion negativ beeinträchtigen, zu chronischen Herz-Kreislauf-Erkrankungen und vorzeitigem Tod führen.

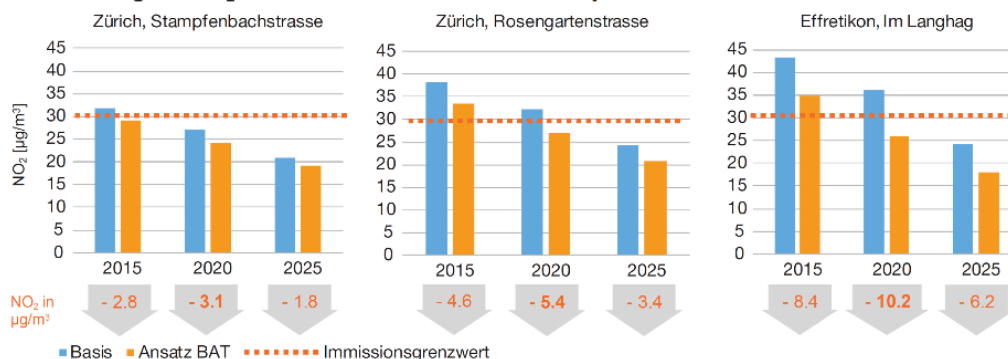
Entwicklung der NO₂-Immissionssituation an drei beispielhaften Standorten im Kanton Zürich

Abbildung 19: Ohne Dieselskandal wäre bereits 2020 an keinem der drei Standorte der Jahresmittelgrenzwert für NO₂ überschritten (Basis - heutige Ausrüstung der Fahrzeuge Stand 2018; BAT: beste verfügbare Technologie).

5.3 Fazit

Die Auswirkungen der zu hohen NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen der der Abgasnormen Euro 4, Euro 5 und teils Euro 6b auf die Luftqualität im Kanton Zürich sind deutlich:

1. Ohne Manipulationen und legale Tricks bei der Abgasreinigung würden rund 50 Prozent weniger NO_x im Strassenverkehr ausgestossen.
2. Die NO₂-Belastung in städtischen Gebieten und entlang von Hauptverkehrsstrassen wäre massgeblich reduziert, je nach Standort um 3 bis 10 µg/m³. In städtisch geprägten Wohngebieten und Agglomerationen hätte das Senkungspotenzial, bezogen auf das Jahr 2020, bei ca. 3 bis 5 µg/m³ gelegen, entlang verkehrsexponierten Wohnlagen sogar noch höher.
3. Die beobachteten Emissionsüberschreitungen von Dieselfahrzeugen bewirken seit 2015 eine Verzögerung bezüglich des Absenkpfeils der NO₂-Belastungen auf fünf bis zehn Jahre.

Viele Grenzwertüberschreitungen liessen sich also vermeiden.⁶⁷⁻⁶⁹ Dies hat Folgen für Umwelt und Gesundheit, zu denen Dieselfahrzeuge überproportional stark beitragen.⁷⁰ Es entsteht dabei auch ein volkswirtschaftlicher Schaden.^{69,71,72} Im Kanton Zürich wurden die Gesundheitskosten aufgrund von erhöhter Sterblichkeit und Spitaleintritten wegen Atemwegserkrankungen, die durch Luftbelastung mit NO₂ bedingt sind, auf circa zwei Milliarden Franken pro Jahr geschätzt (Stand 2015). Der Verkehr verursacht knapp die Hälfte dieser Kosten - der überwiegende Teil wird dabei durch den Strassenverkehr ausgemacht.^{73,74}

6 Ausblick

In der Europäischen Union (an deren Vorgehen sich der Bund orientiert) hat bei der Regulierung von Fahrzeugemissionen ein Umdenken eingesetzt, hin zu verstärkter und realistischerer Kontrolle.¹⁷ 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 und der neuesten Abgasnorm Euro 6d. Die Technik für ausreichend saubere Dieselfahrzeuge existiert^{38,75} und ist mit Euro 6d auf der Strasse angekommen, wie der vorliegende Bericht zeigt. Der weitere Einsatz neuester Abgasreinigungstechnologie und die realistische und konsequente Kontrolle der NO_x Emissionen steht nun an oberster Stelle für die Hersteller und Zulassungsbehörden. In der Europäischen Union ist eine zukünftige Abgasnorm Euro 7 in Vorbereitung, voraussichtlich mit weiteren Grenzwertverschärfungen und u.a. der Berücksichtigung von Kaltstart-Emissionen^a. Daher ist in den kommenden Jahren eine weitergehende Charakterisierung der realen NO_x-Emissionen von Fahrzeugen in der Schweiz und im Kanton Zürich wichtig. Dies stellt sicher, dass diese Emissionen korrekt in Emissionsinventaren berücksichtigt werden und ist wichtig um zu aufzuzeigen, ob die Verbesserungen mit den neuen Abgasnormen sich weiter fortsetzen⁵⁸ und langfristig bestehen bleiben. Die vorliegende Messreihe trägt dazu bei, solche Erkenntnisse über die tatsächlichen Emissionen im realen Fahrbetrieb zu gewinnen sowie ihre zeitliche Entwicklung zu verfolgen. Das AWEL wird sich daher durch die Weiterführung seiner langjährigen Messreihe im Kanton Zürich auch zukünftig für eine saubere und gesunde Luft engagieren.

^a siehe auch <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-European-vehicle-emissions-standards-Euro-7-for-cars-vans-lorries-and-buses>

7 Anhang

7.1 Fahrzeugflotte im Kanton Zürich

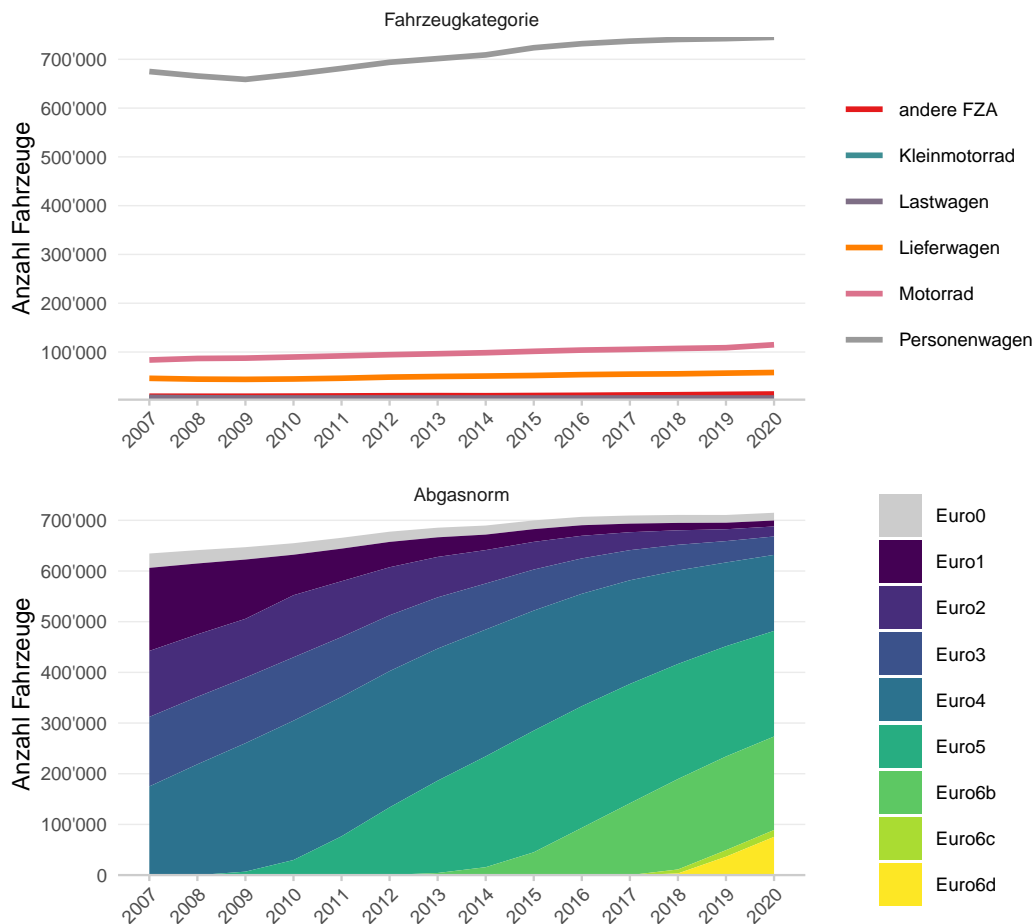


Abbildung 20: Struktur und Entwicklung der Fahrzeugflotte im Kanton Zürich; nach Fahrzeugtyp (FZA = Fahrzeugarten). Anmerkung: Die finalen Daten für das Jahr 2021 liegen zum Abschluss des vorliegenden Berichtes noch nicht vor.

^a Zum Entstehen der hier präsentierten langjährigen Messreihe hat der Einsatz von ehemaligen Mitgliedern der Abteilung Luft massgeblich beigetragen. Namentlich seien Reto Schüpbach, Hansjörg Sommer und Markus Meier erwähnt. Unser Dank geht ebenfalls an Jens Borken-Kleefeld vom International Institute for Applied Systems Analysis, der hochkompetent die wissenschaftliche Analyse der Remote Sensing Ergebnisse voranbringt. Vielen Dank ebenfalls an Thomas Bütler von der Empa für die unkomplizierte Zusammenarbeit in Sachen PEMS Messungen und für den Austausch der Fahrzyklen-Daten sowie für seine fachliche Unterstützung.

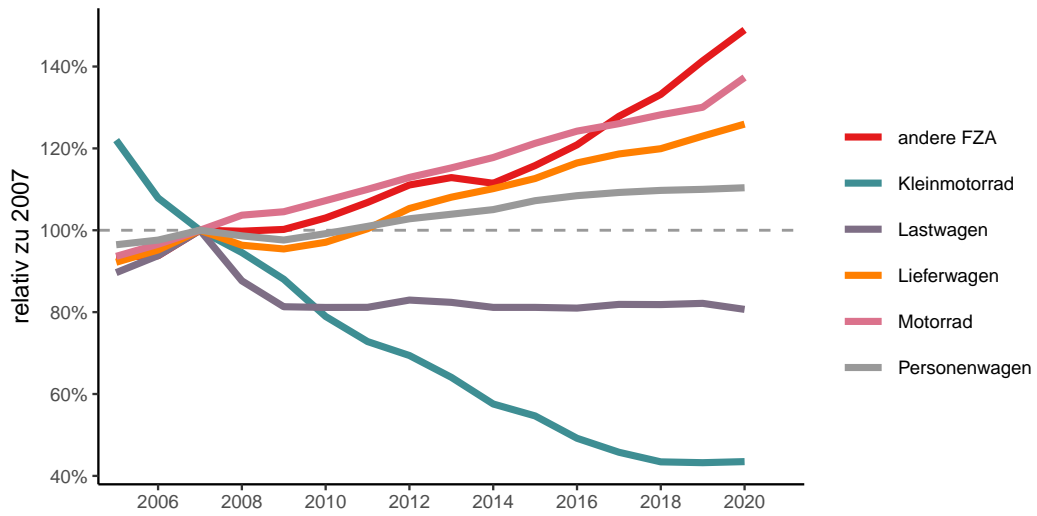


Abbildung 21: Entwicklung der wichtigsten Fahrzeugkategorien der Fahrzeugflotte im Kanton Zürich relativ zum Jahr 2007 (FZA = Fahrzeugarten).).

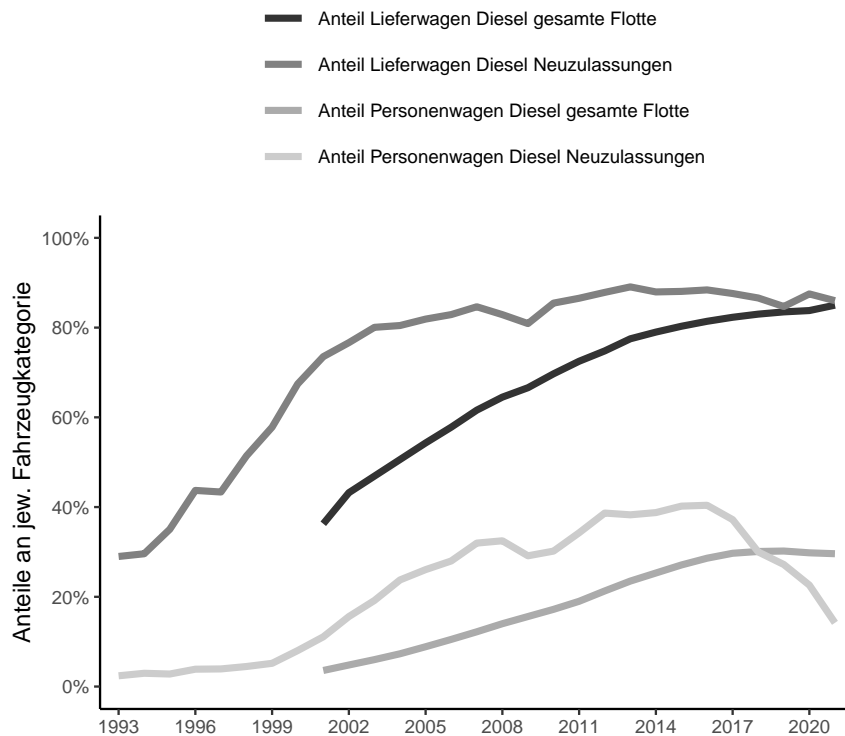


Abbildung 22: Entwicklung des Anteils an Dieselfahrzeugen im Kanton Zürich bei Neuzulassungen in der jew. Fahrzeugkategorie, bzw. am Gesamt-Fahrzeugbestand in der jew. Fahrzeugkategorie.

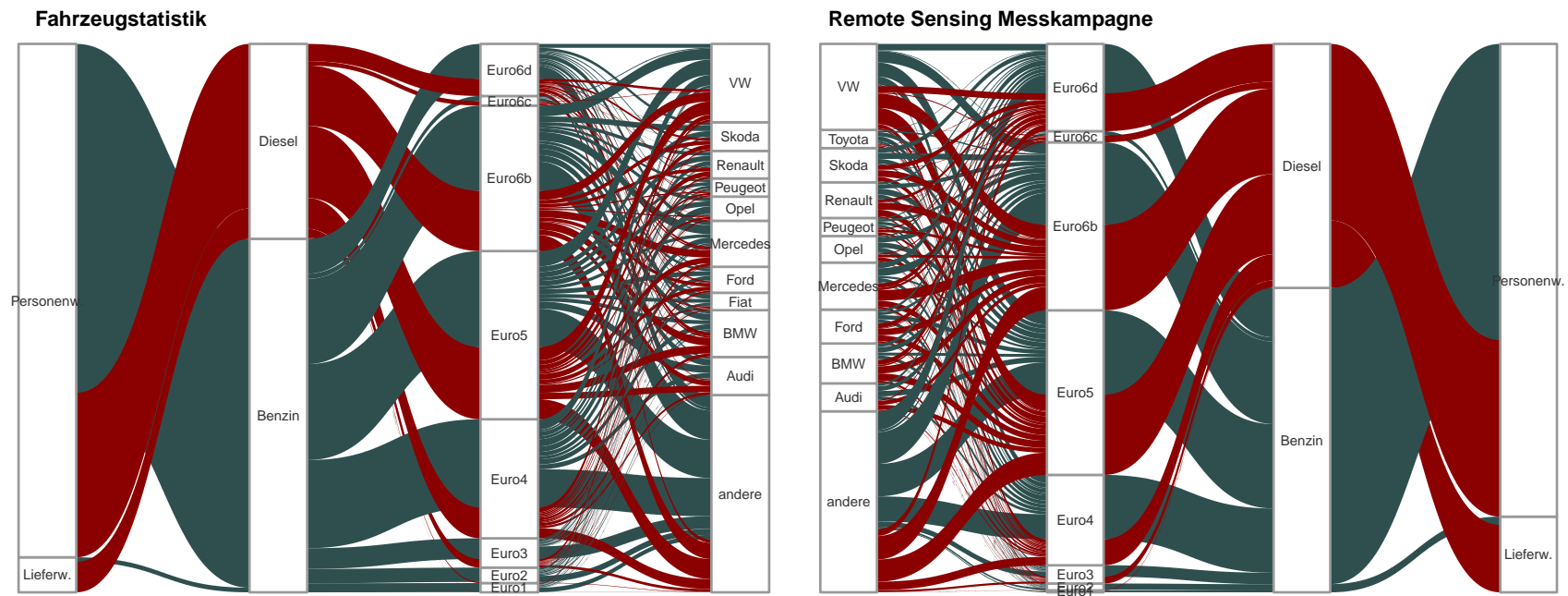


Abbildung 23: Aktuelle Zusammensetzung der Fahrzeugflotte im Kanton Zürich (Fahrzeugstatistik) und Vergleich mit der Zusammensetzung der vermessenen Fahrzeugflotte in der aktuellsten Remote Sensing Messkampagne; Auszug der jeweils 10 häufigsten Marken; PW = Personenwagen, KL = Lieferwagen (angelehnt an ICCT, 2017, S.40).



7.2 Testzyklen und Fahrbedingungen

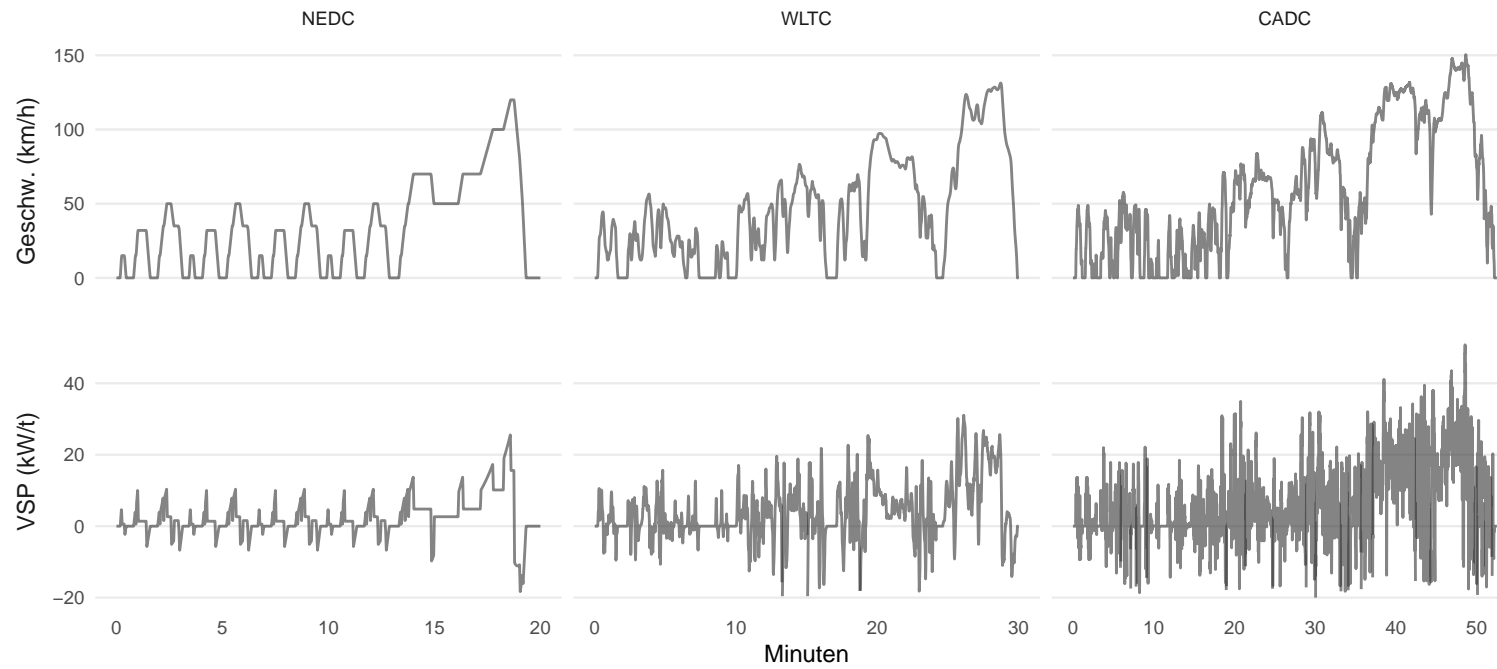


Abbildung 24: Diverse Testzyklen für den Rollenprüfstand.

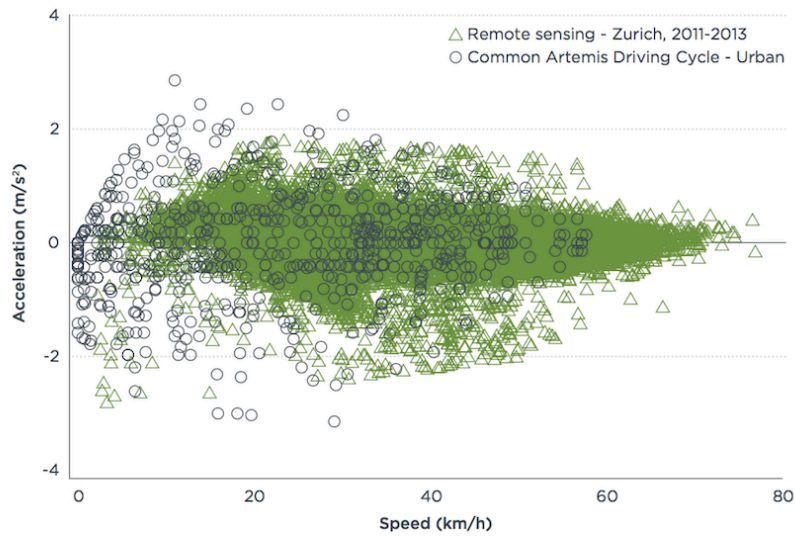


Abbildung 25: Vergleich der Fahrbedingungen der RSD Messungen mit denen für Stadtverkehr aus dem CADC Testzyklus (Quelle: Borken-Kleefeld und Dallmann, 2018).

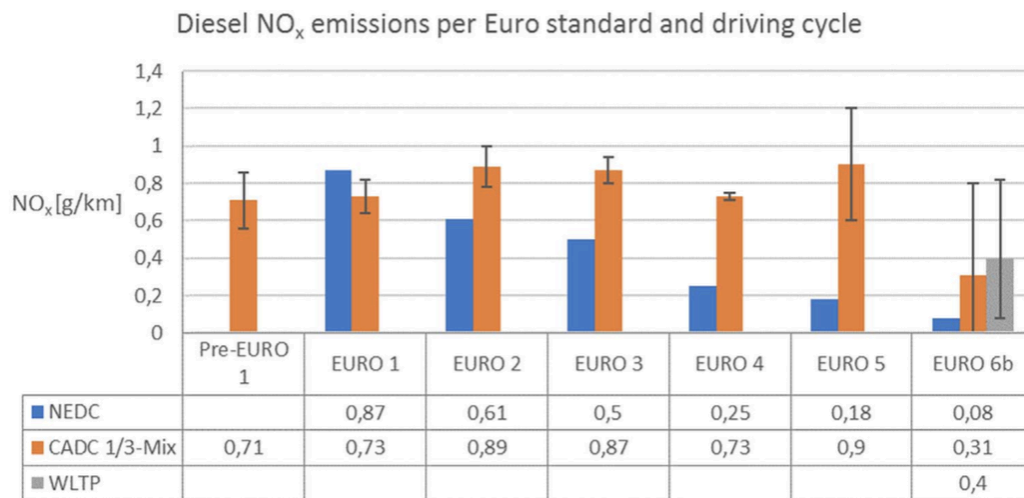


Abbildung 26: NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen verschiedener Euro-Abgasnormen auf dem Rollenprüfstand unter verschiedenen Testzyklen (Quelle: Hoofman et al., 2018).

7.3 Methodik

7.3.1 Berechnung von Schadstoffkonzentration im unverdünnten Abgas

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 Gasmischungen 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 abgezogen.⁷⁶

7.3.2 Berechnung von NO_x-Emissionen

Die gemessenen NO-Konzentrationen wurden in NO_x (g/kg Treibstoff) unter der Annahme einer vollständigen Verbrennung umgerechnet.^{26,77}

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

mit: $Q = \frac{\%CO}{\%CO_2}$, $Q' = \frac{\%HC}{\%CO_2}$ 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:

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

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 (HBEFA).⁴⁸

Die Umrechnung des gesetzlichen Grenzwertes NO_x (g/km) in NO_x (g/kg Treibstoff) ist in Hausberger (2010)⁷⁸ beschrieben.

Das RSD-Messsystem der neusten Generation (RSD 5000) ist erstmals in der Lage auch die NO₂-Konzentrationen zu messen. In Zürich ist dieses Gerät seit dem Messjahr 2016 in Betrieb. Damit können die bislang gerechneten NO_x-Emissionen (siehe vorheriger Abschnitt) mit tatsächlich gemessenen NO_x-Emissionen verglichen werden (siehe Abbildung 51 und 52).

7.3.3 Standorte

Über die Jahre wurden RSD Messungen an verschiedenen Standorten durchgeführt (Tabelle 3). Hauptstandort für alle RSD Messkampagnen ist jedoch der Standort Gockhausen, an welchem der mit Abstand grösste Teil der Daten erhoben wurde. So bleiben die Messungen über die Jahre hinweg vergleichbar.

7.3.4 Auswertung der Resultate

Die technischen Fahrzeugdaten vermessener Fahrzeuge werden anonymisiert den Messwerten zugewiesen und statistisch ausgewertet um das Emissionsverhalten von Fahrzeuggruppen zu charakterisieren.²⁶ Die Zuweisung der technischen Fahrzeugdaten^a zu den Messwerten erfolgt über eine automatisierte Fahrzeugnummernerkennung. Die erfassten Nummern werden einzeln auf Plausibilität geprüft und im Fall von Fehlererkennung korrigiert. Um Fehlzusweisungen zwischen Fahrzeugdaten und RSD Messwerten aufgrund fehlerhafter Nummernerkennung möglichst umfassend auszuschliessen, wurde ab dem Messjahr 2018 ein zusätzlicher Ausreissertest angewendet. Dabei wurden verschiedene, teils multivariate Ausreissertests kombiniert, um eine zuverlässige Erkennung zu gewährleisten:

Tabelle 3: Messstandorte (DWV = durchschnittlicher Werktagsverkehr in Anzahl Fahrzeuge pro Tag, QS = Qualitätsselektion).

Bezeichnung	x	y	signalisierte Geschw.	Neigung	DWV	Verkehrsfluss	Kommentar	Anzahl Messwerte nach QS
Birmensdorf	2676598	1245907	60 km/h	4.4%	10000	stausituationen	nur 2016	2428
Fällanden	2690000	1246420	80 km/h	2.6%	11000	locker, unregelmässig	nur 2003	6694
Gockhausen	2687688	1248870	60 km/h	9.4%	10000	locker, unregelmässig	jährlich, ausser 2019/2020 (Baustelle)	326111
Kloten	2686385	1257578	60 km/h	4.2%	11500	locker, unregelmässig	nur 2002	2605
Regensdorf	2677495	1256365	60 km/h	4.4%	10000	locker, unregelmässig	ab 2016	114308

^a Quelle: bis 2017 Strassenverkehrsamt Kanton Zürich, ab 2018 Bundesamt für Strassen ASTRA

- Median absolute deviation (MAD). Innerhalb der Gruppierung Fahrzeugart-Abgasnorm-Treibstoff: Ein Ausreisser liegt vor, wenn die (positive) Differenz von Messwert (NO-Konzentration) und Median $> 10 * MAD$.
- Robust Mahalanobis distance⁷⁹ (rMD): Innerhalb der Gruppierung Fahrzeugart-Abgasnorm-Treibstoff: Ein Ausreisser liegt vor, wenn die rMD aus den Messwerten der Konzentrationen von CO, NO, NO₂, NH₃, HC sowie VSP > 250 .
- Multivariate Random Forest (MRF). Random Forest Machine Learning⁸⁰ in Form einer multivariaten Regression.⁸¹ Auf der Basis der vorangegangenen, bereits validierten Messkampagnen wurde ein MRF Modell erstellt um für die zu validierende Messkampagne durch die erklärenden Parameter NO, NO₂, CO, NH₃, HC und VSP den Treibstoff, die Abgasnorm sowie die Fahrzeugart vorherzusagen. Weichen die vorhergesagten Fahrzeugdaten von den zugewiesenen ab, so liegt ein Ausreisser vor.

Als Ausreisser erkannte Zuweisungen wurden nochmals auf Korrektheit geprüft, gegebenenfalls berichtigt und weiterhin in die statistische Auswertung mit einbezogen. Nach der Fahrzeugdaten-Zuweisung zu den Messwerten werden alle Informationen, die Rückschlüsse auf Fahrzeughalter zulassen könnten, vollständig gelöscht.

Die Auswertungen wurden mit der Statistiksoftware "R"⁸² vorgenommen. Der Parameter "Vehicle Specific Power" wurde mit dem R-package "pems.utils"⁸³ mit der Methode nach Jiminez-Palacios⁶⁶ unter Berücksichtigung der Strassenneigung am Messtandort (siehe Tabelle 3) berechnet^a.

Der Datensatz wurde vor der Auswertung gemäss folgenden Kriterien qualitätsselektiert:

- Messkampagnen sei dem Jahr 2002
- Abgasnormen ab Euro1
- vor 2018: ausschliesslich Fahrzeuge, die im Kanton Zürich registriert sind; seit 2018: alle schweizer Fahrzeuge, für die Fahrzeugdaten des ASTRA vorliegen
- ausschliesslich Personenwagen und Lieferwagen
- ausschliesslich Benzin- und Dieselfahrzeuge
- nur Fahrzeuge ohne Wechselnummer
- Qualitätsflags aller Schadstoffe einer Messung müssen gültig sein
- $5 < \text{Geschwindigkeit (in km/h)} < 60$
- $-2 < \text{Beschleunigung (in km/h/s)} < 4$
- $1 < \text{Vehicle Specific Power (in kW/t)} < 35$

Für die Auswertung wurden verschiedene Gruppen gebildet, um statistische Kenngrössen zu berechnen. Falls nicht anders angegeben, wurden die Gruppen nur gebildet, wenn die Stichprobenanzahl $n \geq 50$ betrug. In der Regel reichen ca. 100 bis 200 Datenpunkte aus, um mit RSD Messungen den mittleren NO_x Ausstoss mit mindestens 80-prozentiger Genauigkeit zu bestimmen.³¹ Um Entwicklungen frühzeitig (d.h. mit noch wenigen Messwerten) antizipieren zu können (z.B. neueste Abgasnorm, Auswertung auf Hersteller-Ebene), wurde hier relativ niedrig gehalten. Die allermeisten Statistiken im vorliegenden Bericht beinhalten

^a Wenn Angaben zum Leergewicht des Fahrzeuges vorlagen, wurde dieses unter Addition von 150 kg in die VSP-Berechnung mit einbezogen, ansonsten wurde ein Fahrzeuggewicht von 1.5 t angenommen (diese Annahme verfälscht das Ergebnis nicht wesentlich)⁸⁴

jedoch eine weitaus grössere Anzahl an Messwerten als eine Stichprobe von 200, so dass die Genauigkeit der Mittelwerte im vorliegenden Bericht als sehr robust eingeschätzt wird.

7.3.5 RSD Messungen im Vergleich

Remote Sensing⁷⁶ ist eine langjährig erprobte Technologie,⁴⁶ die in verschiedenen Ländern eingesetzt wird. Neben den vorliegenden Messkampagnen im Kanton Zürich³⁵ zum Beispiel auch in den USA,⁸⁵ Grossbritannien,²⁷ Frankreich,⁴³ Spanien²² und Schweden.⁸⁹ Für eine ausführlichere Beschreibung der Technik und Anwendung des RSD siehe Borken-Kleefeld und Dallmann (2018)²² sowie Bernard et al. (2018).²⁶

Remote Sensing Messungen mit dem hier verwendeten RSD Messsystem liefern sehr konsistente Ergebnisse im Vergleich mit verschiedenen anderen Methoden, so zum Beispiel:

- im Vergleich mit PEMS⁹¹ (Abbildung 27 und Abbildung 28),
- im Vergleich zu einem RSD System basierend auf Laser-Lichtquellen,⁹¹
- bei Experimenten mit kontrollierter Gasfreisetzung aus Gas-Standards,⁹¹
- RSD Messkampagnen in verschiedenen Ländern liefern ähnliche Ergebnisse; detaillierter betrachtet sind auch die Ergebnisse aus dem Kanton Zürich vergleichbar mit denen in anderen europäischen Städten^{24,27,42} (Abbildungen 30, 31 und 32).

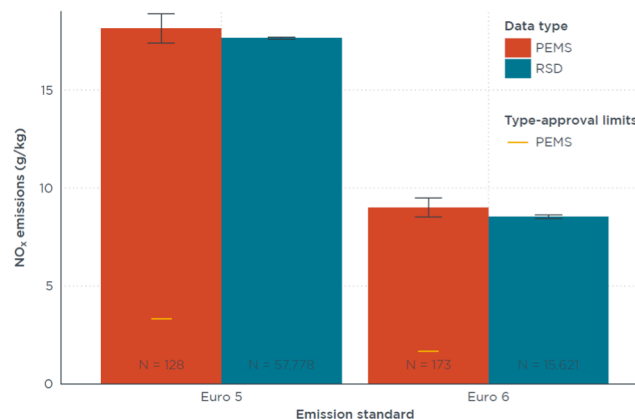


Abbildung 27: Vergleich von RSD Daten mit Daten aus PEMS Messungen (Quelle: Sjödin et al., 2018).

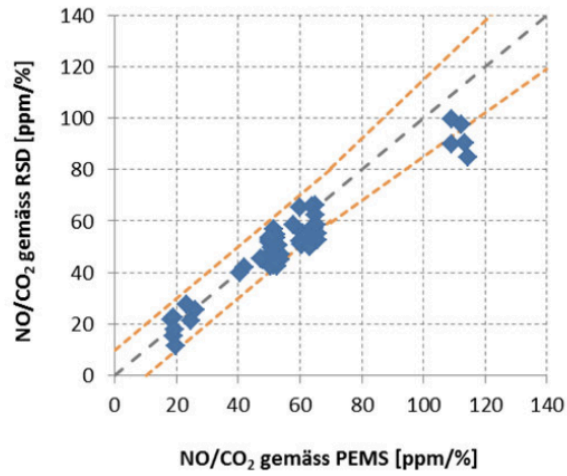


Abbildung 28: Vergleich der Zürcher RSD Daten mit Daten aus PEMS Messungen aus einer Messkampagne im Jahr 2015 (Bütler, 2016).

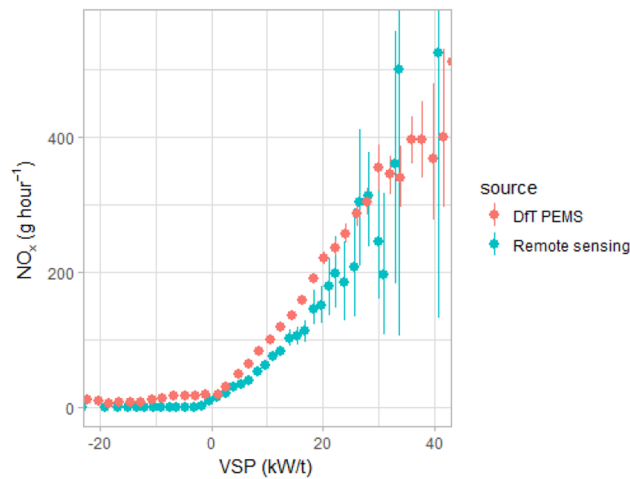


Abbildung 29: Abhängigkeit der NO_x Emission (in g/Stunde) von Dieselfahrzeugen von Vehicle Specific Power, gemessen mit Remote Sensing und mit PEMS (Quelle: Sjödin et al., 2018).

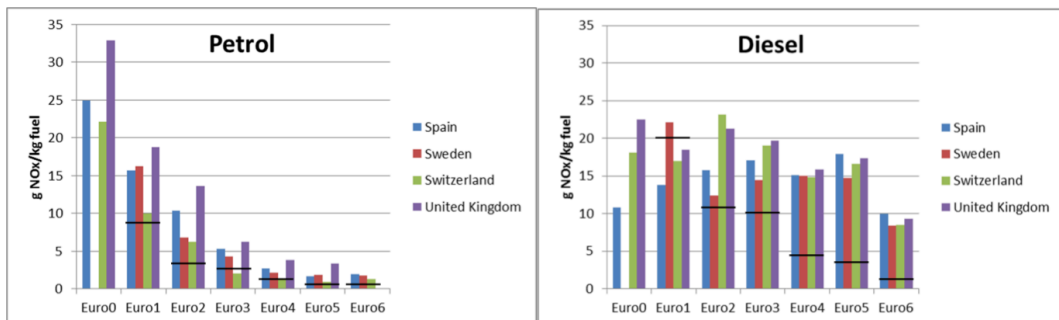


Abbildung 30: Vergleich von RSD Daten aus Messkampagnen in verschiedenen Ländern (Quelle: Sjödin et al., 2018).

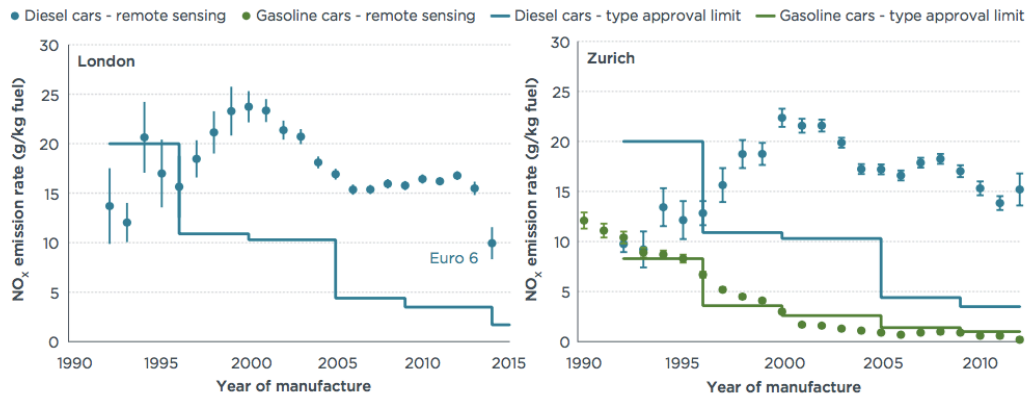


Abbildung 31: Vergleich von RSD NO_x-Emissionen aus Messkampagnen in London und Zürich (Quelle: Borken-Kleefeld und Dallmann, 2018).

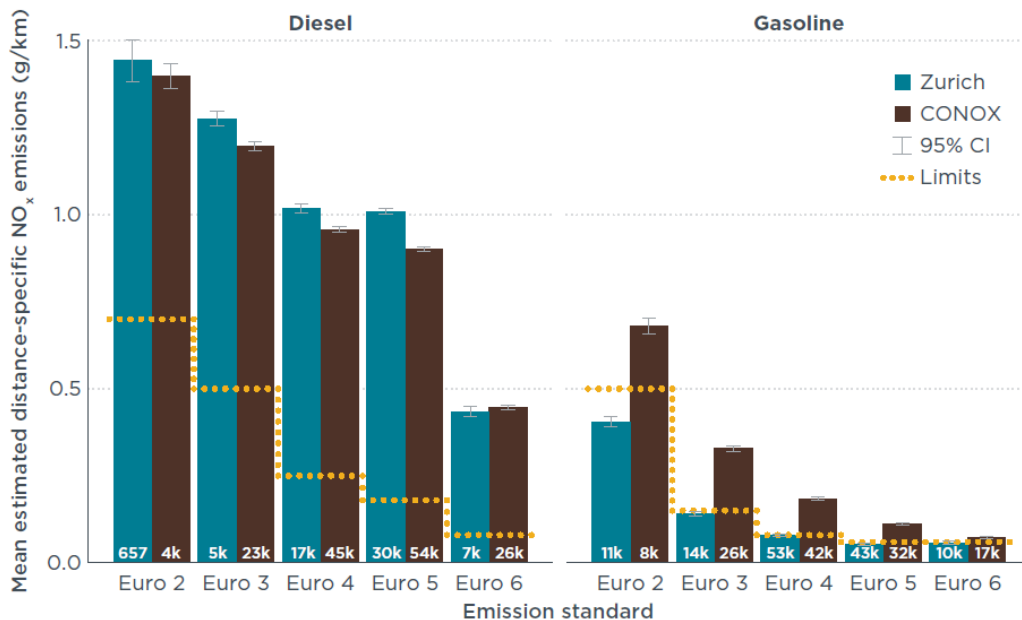


Abbildung 32: Vergleich von RSD NO_x-Emissionen in g/km aus Messkampagnen in Zürich und anderen europäischen Städten (Quelle: Tietge et al. 2019).

7.3.6 Abschätzung der Auswirkungen von Dieselfahrzeug-Emissionen auf die Luftqualität

Das AWEL hat INFRAS beauftragt, eine kurze Abschätzung durchzuführen, die die Differenz quantitativ auf der Stufe NO_x-Emissionen und NO₂-Immissionen zu fassen versucht.

7.3.6.1 Vorgehen

Emissionsberechnung für die IST-Variante (IST bzw. Basis):

Links und Zonen des Kantons Zürich werden aus dem nationalen Verkehrsmodell der Schweiz (VM UVEK) selektiert und die Summe der NO_x-Emissionen auf ZH-Autobahnen (AB), ZH-ausserorts- (ao) und innerorts-Strassen (io) und die zugehörigen Fahrleistungen für Personenwagen (PW) und Lieferwagen (LI) für alle Euroklassen für die drei Jahre 2015, 2020, 2025 berechnet. Für diese werden die mittleren NO_x-Emissionsfaktoren (EF) nach Strassenkategorie AB, ao, io bestimmt. Schwere Motorwagen, Motorräder: Für diese Fahrzeugkategorien werden lediglich die Summen der Fahrleistungen und NO_x-Emissionen Kt. Zürich bestimmt, weil sie in den folgenden Arbeitsschritten nicht involviert werden, ihre gesamten Emissionen jedoch für die Immissionsabschätzung bekannt sein müssen (sie sind in allen betrachteten Varianten gleich gross).

Variante best available technology (BAT):

Für die NO_x-Emissionen von PW und LI der Euroklassen 5 und 6 wird eine Variante berechnet, in der statt der mittleren NO_x-EF die BAT NO_x-EF verwendet werden, nämlich Euro 6d2/c2 für PW und Euro 6 für LI. Die Differenz zur Variante IST ergibt das Potenzial, um wie viel die NO_x-Emissionen tiefer wären, wenn die Euro-Klassen 5 und 6 mit dem BAT-Wert fahren würden. Diese Zahl dient als Indikator für jene Emissionen, die der Gesetzgeber erreichen wollte, aber wegen der Manipulationen in den Euro-5- und Euro-6-Motoren nicht erreicht werden. Die Differenz wird für die Jahre 2015, 2020, 2025 berechnet und wird differenziert nach den drei Strassenkategorien. Die Resultate liegen zwar auch für die älteren Euro-Klassen 0 bis 4 vor, werden jedoch in der vorliegenden Abschätzung nicht berücksichtigt.

Variante Abgasgrenzwerte (EGW):

Für die NO_x-Emissionen PW und LI wird eine weitere Variante unter der Annahme berechnet, dass die Fahrzeuge aller Euro-Klassen auf allen Strassenkategorien entsprechend ihrem Euro-Klassen-abhängigen NO_x-EGW emittieren.

Abschätzung der NO_x-Emissionen:

Für die beide Varianten werden anhand der Differenz-Emissionen nach Strassenkategorie und mithilfe von typischen Immissionssituationen die Auswirkungen auf die Immissionen abgeschätzt. Dadurch wird sichtbar, ob die niedrigeren NO_x-Emissionen (BAT und GW) im Vergleich mit den NO_x-Emissionen in der IST-Variante für die NO₂-Immissionsbelastung relevante Auswirkungen hätten.

Abschätzung der NO₂-Immissionen:

Aus der PolluMap-Applikation⁹² stehen für ein paar ausgewählte Standorte im Kt. Zürich (städtisch/verkehrsexponiert, städtisch/Wohngebiet, ländlich/verkehrsexponiert) die Zusammensetzung der NO_x-Immissionen 2015, 2020, 2030 nach Emittenten (Strassenverkehr, Haushalte/Dienstleistungen, Industrie, Land-/Forstwirtschaft, Import) zur Verfügung.

7.3.6.2 Resultate NO_x-Emissionen

Variante	Strassenkat.	2015	2020	2025
Nur PW und LI		t/a	t/a	t/a
Variante IST	AB	1'627	1'422	1'034
	ao	568	515	372
	io	1'172	1'401	983
	Summe	3'366	3'337	2'389
Variante BAT	AB	875	597	451
	ao	288	199	147
	io	650	600	438
	Summe	1'814	1'396	1'035
Variante Grenzwert	AB	925	542	392
	ao	347	206	151
	io	624	519	371
	Summe	1'897	1'266	915
schwere Motorwagen, Motorräder		t/a	t/a	t/a
Alle Varianten	AB	468	248	145
	ao	353	201	115
	io	452	364	211
	Summe	1'273	813	471
Summe alle Fahrzeugkategorien		t/a	t/a	t/a
Variante IST	AB	2'095	1'670	1'179
	ao	920	716	487
	io	1'623	1'764	1'194
	Summe	4'639	4'151	2'860
Variante BAT	AB	1'344	845	596
	ao	641	400	262
	io	1'102	964	649
	Summe	3'087	2'209	1'506
Variante Grenzwert	AB	1'393	790	537
	ao	700	407	266
	io	1'076	883	582
	Summe	3'170	2'079	1'385

Abbildung 33: NO_x-Emissionen Strassenverkehr Kt. Zürich in Tonnen pro Jahr. Hinweis zum Umgang mit Kaltstartzuschlägen: Diese werden in HBEFA aus methodischen Gründen gänzlich dem io zugeschlagen.

Variante	Strassenkat.	2015	2020	2025
Nur PW und LI				
Variante BAT	AB	-46%	-58%	-56%
	ao	-49%	-61%	-61%
	io	-44%	-57%	-55%
	alle	-46%	-58%	-57%
Variante Grenzwert	AB	-43%	-62%	-62%
	ao	-39%	-60%	-59%
	io	-47%	-63%	-62%
	alle	-44%	-62%	-62%
Summe alle Fahrzeugkategorien				
Variante BAT	AB	-36%	-49%	-49%
	ao	-30%	-44%	-46%
	io	-32%	-45%	-46%
	alle	-33%	-47%	-47%
Variante Grenzwert	AB	-33%	-53%	-54%
	ao	-24%	-43%	-45%
	io	-34%	-50%	-51%
	alle	-32%	-50%	-52%

Abbildung 34: Veränderung in Prozent der NO_x-Emissionen der beiden Varianten BAT und Grenzwert ggü. dem Ist-Zustand (100 Prozent). Negative Veränderungen bedeuten Reduktionen ggü. der Variante IST. Lesebeispiel: In der Variante BAT wären 2015 die NO_x-Emissionen der PW und LI auf Autobahnen um 46 Prozent geringer als in IST, die NO_x-Emissionen aller Fahrzeugkategorien wären auf Autobahnen um 36 Prozent geringer als in IST.

Die Resultate für die Variante BAT für Diesel-PW und Diesel-LI der Klassen Euro 5 und Euro 6 weist auf eine bedeutende Reduktion der NO_x-Emissionen im Vergleich mit der IST-Variante. Die Emissionen der betroffenen Fahrzeugkategorien wären grob gesprochen in der BAT Variante bloss halb so gross wie in der IST-Variante. Der Effekt ist 2015 noch etwas geringer (-46%), in den späteren Jahren 2020 und 2025 jedoch stärker (-58% und -57%). Die Unterschiede zwischen den Strassenkategorien sind wenig prägnant. Auch in Bezug auf die NO_x-Emissionen aller Fahrzeugkategorien (nicht nur PW, LI) ist der Effekt noch deutlich mit -33% für 2015 und -47% für 2020/2025.

Die Variante EGW unterscheidet sich nur wenig von der Variante BAT, die Reduktion im Jahr 2015 ist etwas schwächer als BAT (-32%), dafür etwas stärker 2020 (-50%) und 2025 (-52%).

7.3.6.3 Resultate NO_x- und NO₂-Immissionen

Tabelle 35 zeigt, wie sich die Änderung der NO_x-Emissionen in der Variante BAT ggü. IST auf die NO_x- und die NO₂-Immissionen überträgt. Die Ergebnisse sind als exemplarisch zu betrachten, sie gelten für folgende drei Standorte im Kt. Zürich:

- Städt./Verkehr: Stadt Zürich, Rosengartenstrasse.
- Städt./Wohnen: Stadt Zürich Stampfenbachstrasse.
- Ländlich/Verkehr: Im Langhag, Gemeinde Effretikon direkt an der Nationalstrasse A1

Jahr	Spezies	Sektor	IST-Zustand			Variante BAT mit Reduktion auf...		
			Städt./Verk. ug/m3	Städt./Woh. ug/m3	Ländl./Verk. ug/m3	68% Städt./Verk. ug/m3	68% Städt./Woh. ug/m3	64% Ländl./Verk. ug/m3
2015	NOx	Strassenverkehr	35.3	18.6	61.8	24.0	12.6	39.6
2015	NOx	Summe	66.8	51.6	80.5	55.5	45.6	58.3
2015	NO2	Summe	38.2	31.9	43.2	33.6	29.1	34.8
2015	NO2	Reduktion BAT ggü. IST				-4.6	-2.8	-8.4
						55%	55%	51%
2020	NOx	Strassenverkehr	24.5	12.9	44.1	13.4	7.1	22.3
2020	NOx	Summe	51.6	41.1	60.6	40.6	35.3	38.8
2020	NO2	Summe	32.3	27.2	36.2	26.9	24.1	26.0
2020	NO2	Reduktion BAT ggü. IST				-5.4	-3.1	-10.2
						54%	54%	51%
2025/2030	NOx	Strassenverkehr	12.6	6.3	21.0	6.8	3.4	10.6
2025/2030	NOx	Summe	34.4	28.7	34.3	28.6	25.9	23.9
2025/2030	NO2	Summe	24.2	20.9	24.2	20.8	19.1	17.9
2025/2030	NO2	Reduktion BAT ggü. IST				-3.4	-1.8	-6.2

Abbildung 35: Auswirkungen der Variante BAT ggü. IST auf die NO_x- und NO₂-Immissionen an drei charakteristischen Standorttypen im Kt. Zürich.

Die Prozentwerte (Bsp. 2015: 68%, 68%, 64%) ergeben sich aus: 100% - 32% = 68% etc (Abbildung 34), Spalte «2015», Zeile «Summe alle Fahrzeugkategorien/innerorts»). Für die beiden Standorttypen Städt./Verkehr und Städt./Wohnen werden die Reduktionsfaktoren für Innerorts-Strassen (io) verwendet, für Ländl./Verkehr die Reduktionsfaktoren für Autobahnen (AB).

Für die Umrechnung der NO_x- auf NO₂-Immissionen wurde das Modell benutzt, welches in PolluMap für die Applikation in OSTLUFT⁹² benutzt wurde (siehe Referenz, Seite 39). Parameterwerte (A,B,C) für 2015 (113,135,0.012), für 2020 (113,135,0.012), 2030 (117.5,136,0.014).

Wie im Fall der NO_x-Emissionen ist auch bei den NO₂-Immissionen eine Absenkung in der Variante BAT ggü. IST sichtbar. Im Jahr 2015 wären in der Stadt die NO₂-Immissionen um 3 bis 5 µg/m³ tiefer, direkt an den stark befahrenen Autobahnen sogar um ca. 8 µg/m³. Im Jahr 2020 wäre der Effekt in der Tendenz noch etwas stärker. Die Reduktionen der NO₂-Immissionen liegen 2015 und 2020 im Bereich von 10 % bis 20 %.

Für das Jahr 2025 stehen keine Immissionswerte zur Verfügung, sondern nur für 2030. Man kann davon ausgehen, dass die modellierten Immissionen 2030 tiefer liegen als 2025 und dass der Reduktionseffekt bei den NO_x-Emissionen etwas geringer wäre als 2025. Wenn schwächere Reduktionsfaktoren (die drei Faktoren in Tabelle 34: 54 %, 54 %, 51 % gelten für 2025) der Wirklichkeit näherkämen, würde der Reduktionseffekt bei den Immissionen im Jahr 2030 etwas geringer ausfallen als in Abbildung 35 angegeben.

7.4 Struktur des Datensatzes

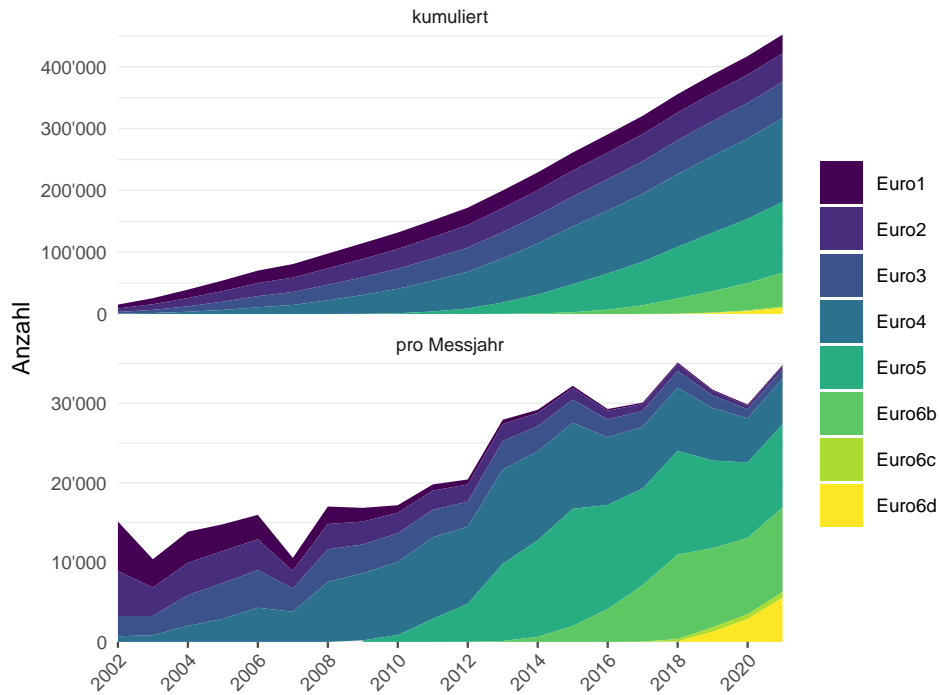


Abbildung 36: Verlauf der Anzahl an Messwerten pro Jahr nach der Qualitätsselektion.

Tabelle 4: Anzahl an Messwerten pro Messjahr.

Jahr	vor QS	nach QS														Benzin	Diesel	Personenwagen	Lieferwagen
		gesamt	kumuliert	Euro1	Euro2	Euro3	Euro4	Euro5a	Euro5b	Euro6b	Euro6c	Euro6d							
2002	23868	15132	15132	6231	5646	2550	705	0	0	0	0	0	0	14042	1090	14143	989		
2003	31359	10391	25523	3554	3578	2417	842	0	0	0	0	0	0	9445	946	9772	619		
2004	18929	13859	39382	3920	4062	3861	2016	0	0	0	0	0	0	12394	1465	13003	856		
2005	20020	14793	54175	3359	4026	4513	2895	0	0	0	0	0	0	12891	1902	13863	930		
2006	20092	15969	70144	3076	3862	4734	4297	0	0	0	0	0	0	13401	2568	14854	1115		
2007	15672	10558	80702	1626	2220	2922	3790	0	0	0	0	0	0	8628	1930	9712	846		
2008	22430	17019	97721	2192	3195	4101	7531	0	0	0	0	0	0	13524	3495	15846	1173		
2009	20731	16852	114573	1724	2876	3621	8437	187	7	0	0	0	0	12954	3898	15465	1387		
2010	21475	17184	131757	948	2590	3603	9186	791	66	0	0	0	0	12805	4379	15795	1389		
2011	23762	19798	151555	780	2422	3448	10255	2531	362	0	0	0	0	14267	5531	17950	1848		
2012	24951	20421	171976	633	2162	3149	9685	3818	963	11	0	0	0	14082	6339	18483	1938		
2013	34222	27936	199912	543	2129	3594	11871	5886	3794	119	0	0	0	18480	9456	24983	2953		
2014	36156	29178	229090	401	1645	3183	11172	5911	6237	629	0	0	0	18849	10329	26272	2906		
2015	39471	32196	261286	278	1454	2912	10822	5986	8746	1998	0	0	0	19884	12312	28809	3387		
2016	51316	29283	290569	214	1099	2244	8502	4606	8494	4123	1	0	0	17256	12027	26145	3138		
2017	43361	30083	320652	167	876	1993	7776	4336	7810	7102	23	0	0	18239	11844	27006	3077		
2018	55579	35123	355775	203	879	2087	7945	4477	8565	10611	302	54	20120	15003	30733	4390			
2019	52033	31711	387486	134	587	1581	6607	3618	7401	9953	555	1275	17926	13785	27449	4262			
2020	48701	29842	417328	144	440	1139	5572	3118	6361	9592	600	2876	16974	12868	25934	3908			
2021	64378	34818	452146	125	434	1158	5737	3628	6822	10667	706	5541	19327	15491	30014	4804			

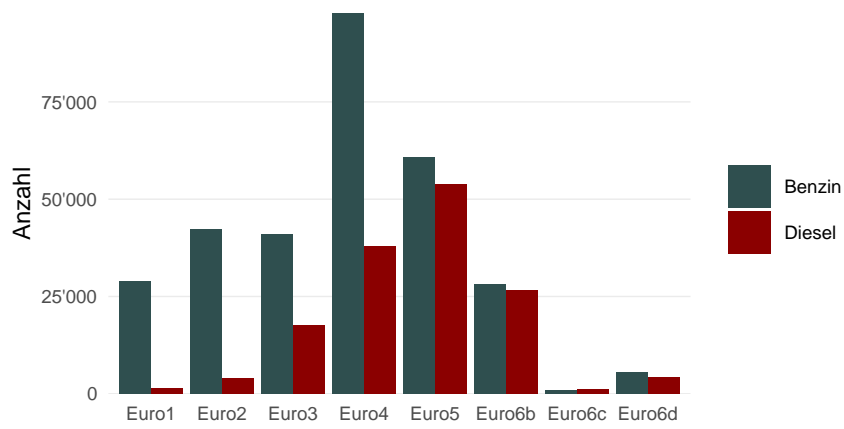


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Messwerten von Personen- und Lieferwagen nach der Qualitätsselektion.

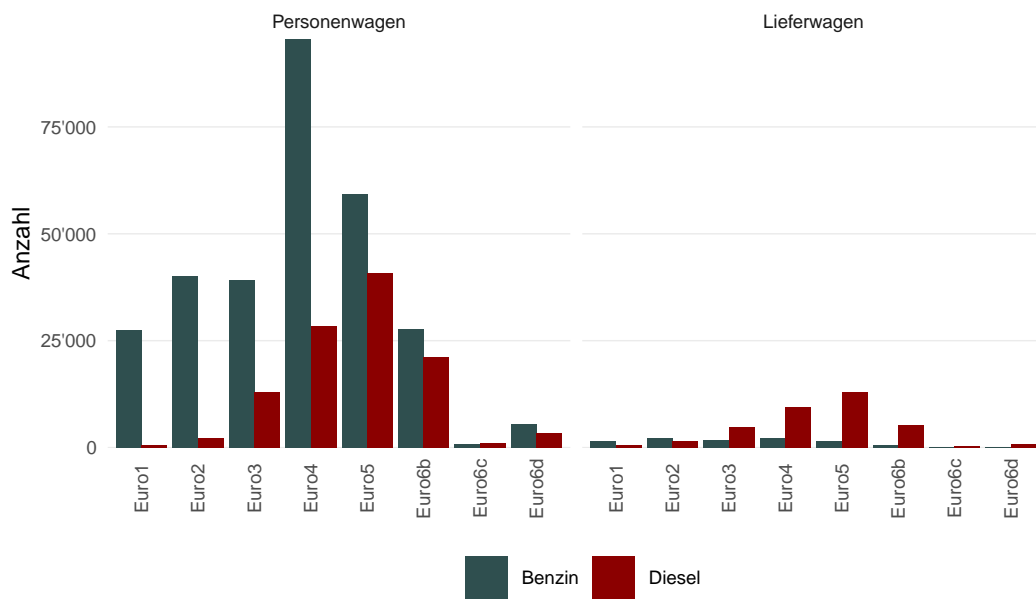


Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Messwerten nach der Qualitätsselektion; Personen- und Lieferwagen getrennt betrachtet.

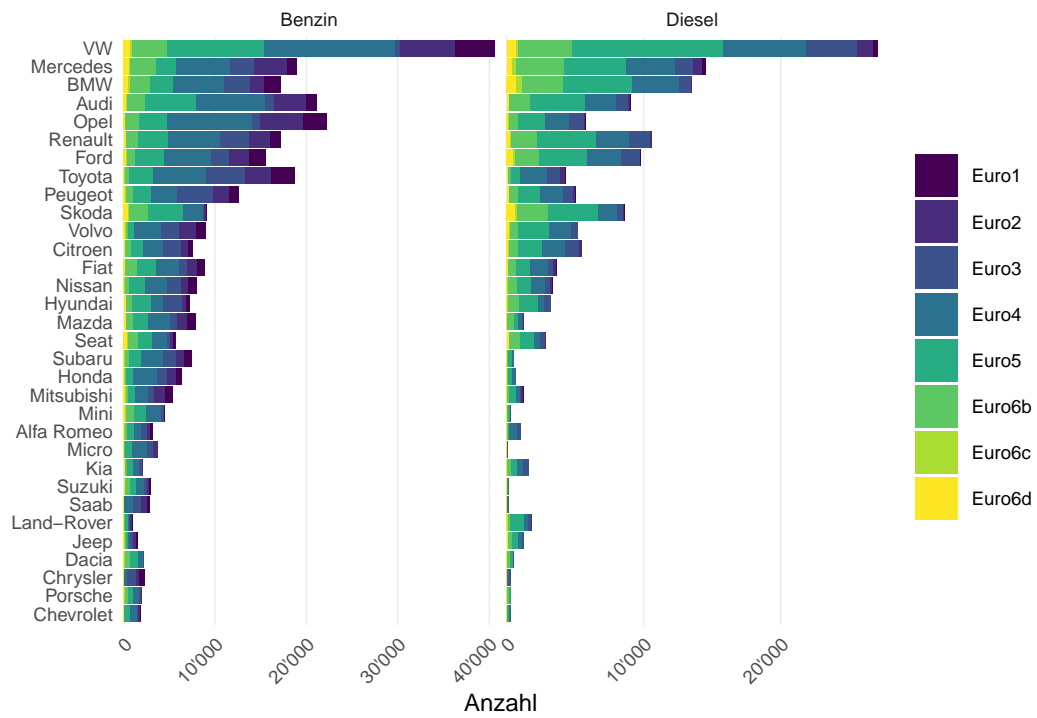


Abbildung 39: Anzahl an Messwerten nach Qualitätsselektion pro Hersteller, strukturiert nach Abgasnorm und Treibstoff (dargestellt sind Hersteller mit mehr als 2000 Fahrzeugen).

7.5 Bedingungen während der Messungen

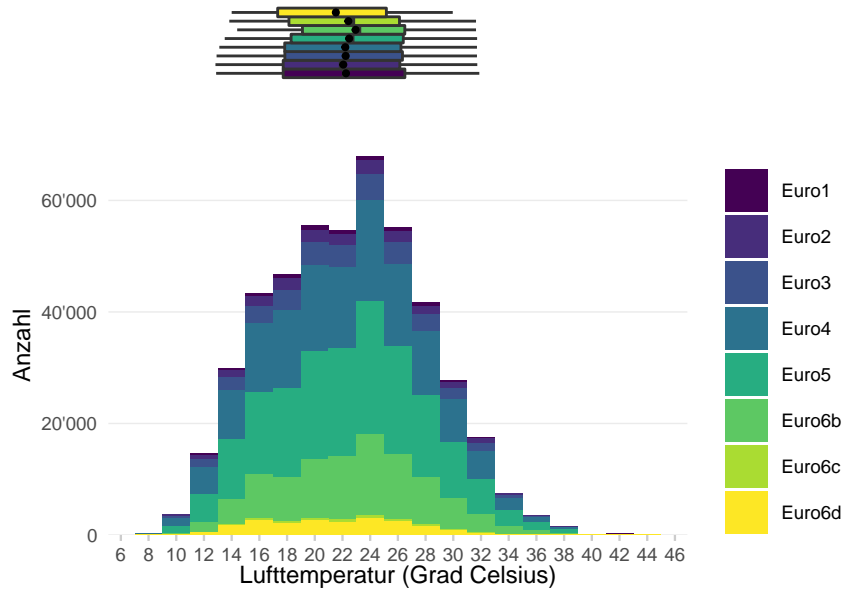


Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur während der Messungen, strukturiert nach Abgasnorm.

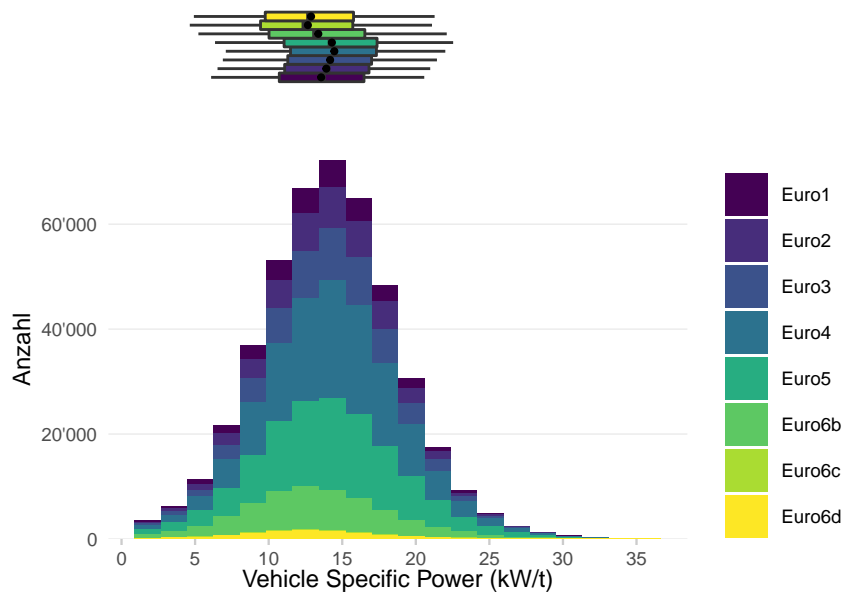


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Messungen vor der Qualitätsselektion, strukturiert nach Vehicle Specific Power (VSP) und Abgasnorm.

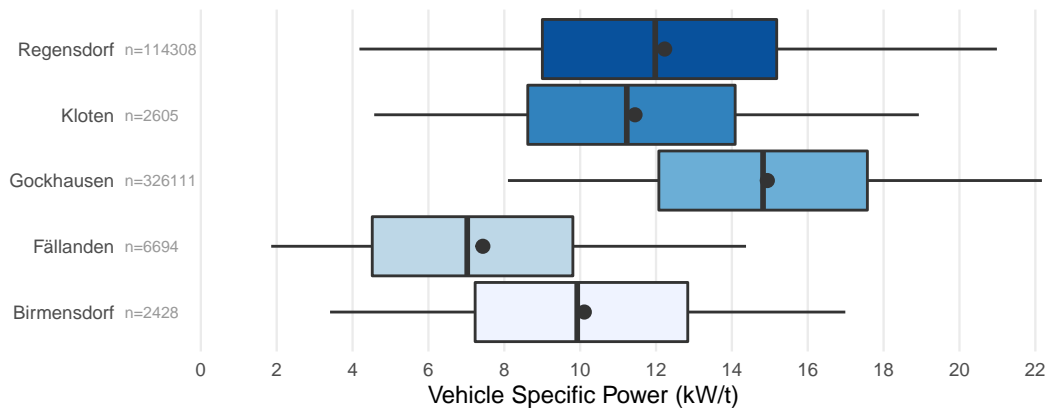


Abbildung 42: Verteilung von Vehicle Specific Power an verschiedenen Messstandorten.

7.6 Gesamtauswertung RSD Datensatz

7.6.1 Schadstoff-Anteile im unverdünnten Abgas

7.6.1.1 Stickstoffmonoxid

47 / 83

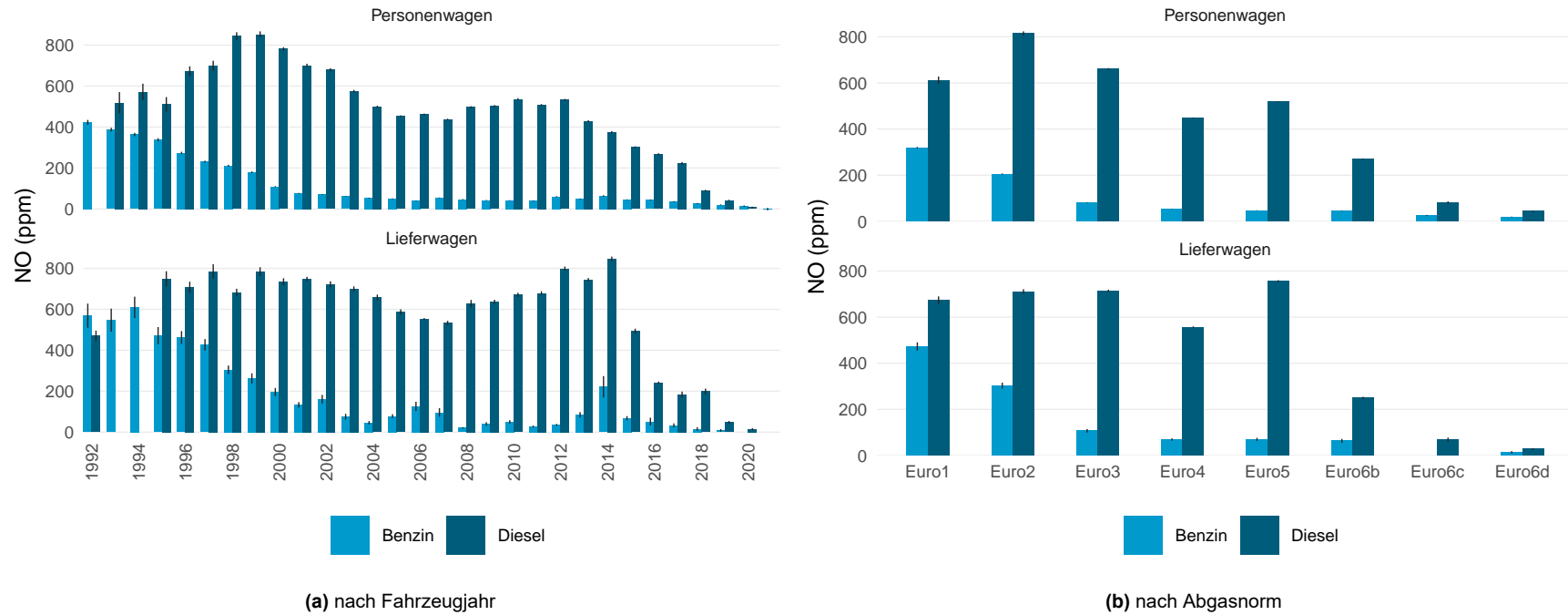


Abbildung 43: NO Stoffmengenanteil im unverdünnten Abgas.



7.6.1.2 Stickstoffdioxid

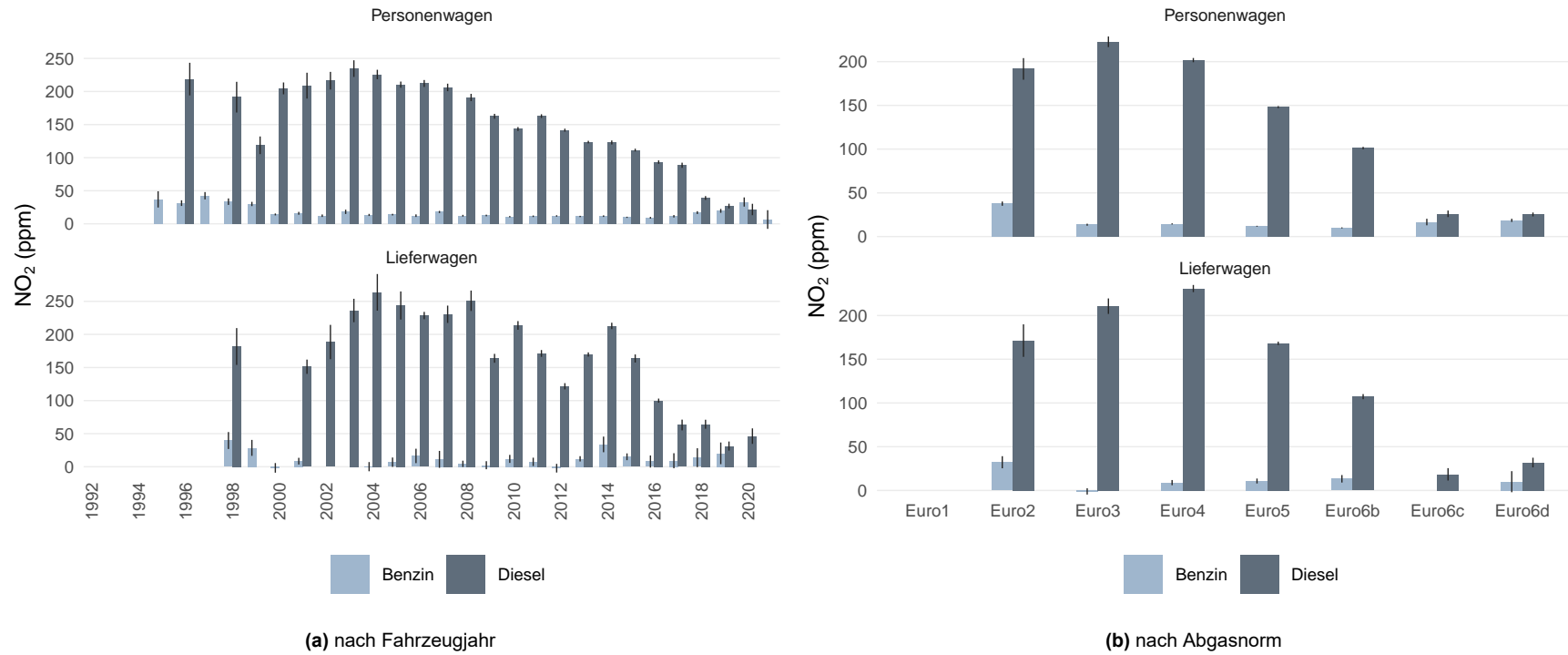


Abbildung 44: NO₂ Stoffmengenanteil im unverdünnten Abgas.



7.6.1.3 Kohlenmonoxid

49 / 83

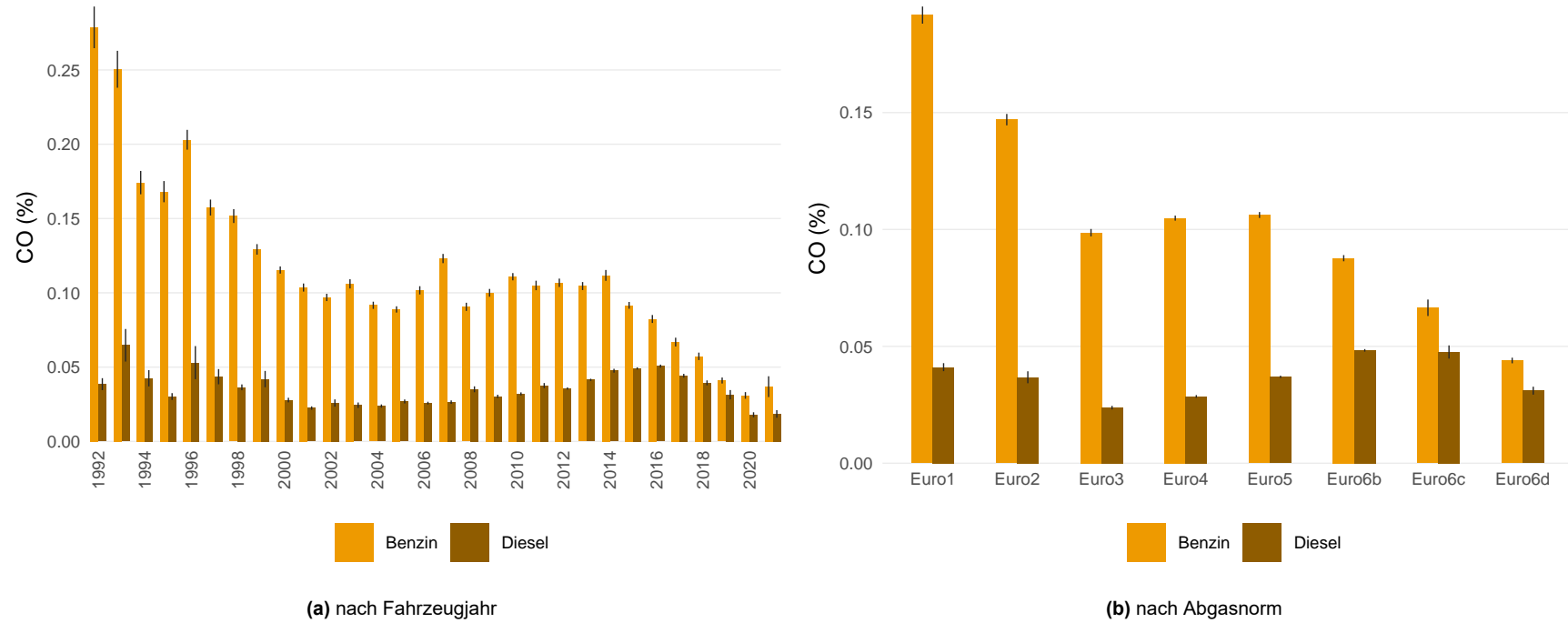


Abbildung 45: CO Stoffmengenanteil im unverdünnten Abgas.



7.6.1.4 Kohlenwasserstoffe

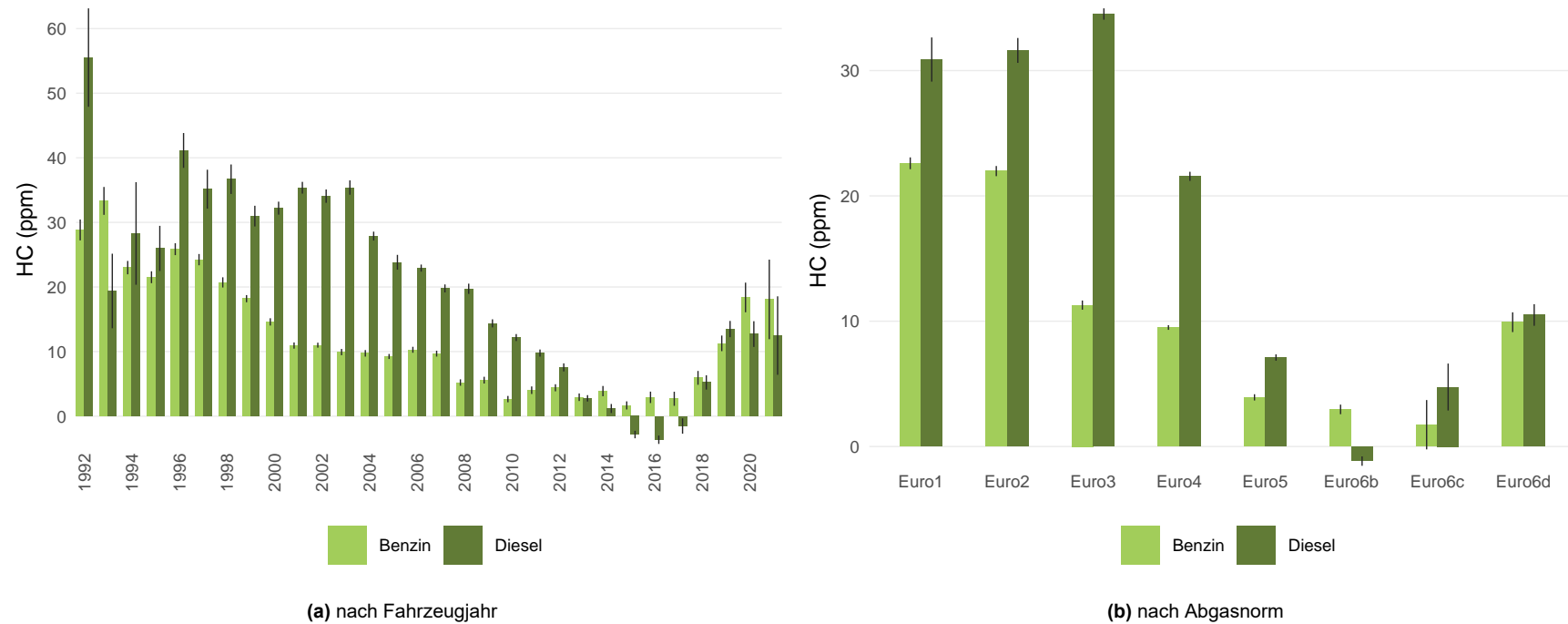


Abbildung 46: HC Stoffmengenanteil im unverdünnten Abgas; negative Mittelwerte können zustandekommen, wenn die Messwerte nahe an der Bestimmungsgrenze des Messsystems liegen und noch nicht sehr viele Messwerte vorliegen.



7.6.1.5 Opazität

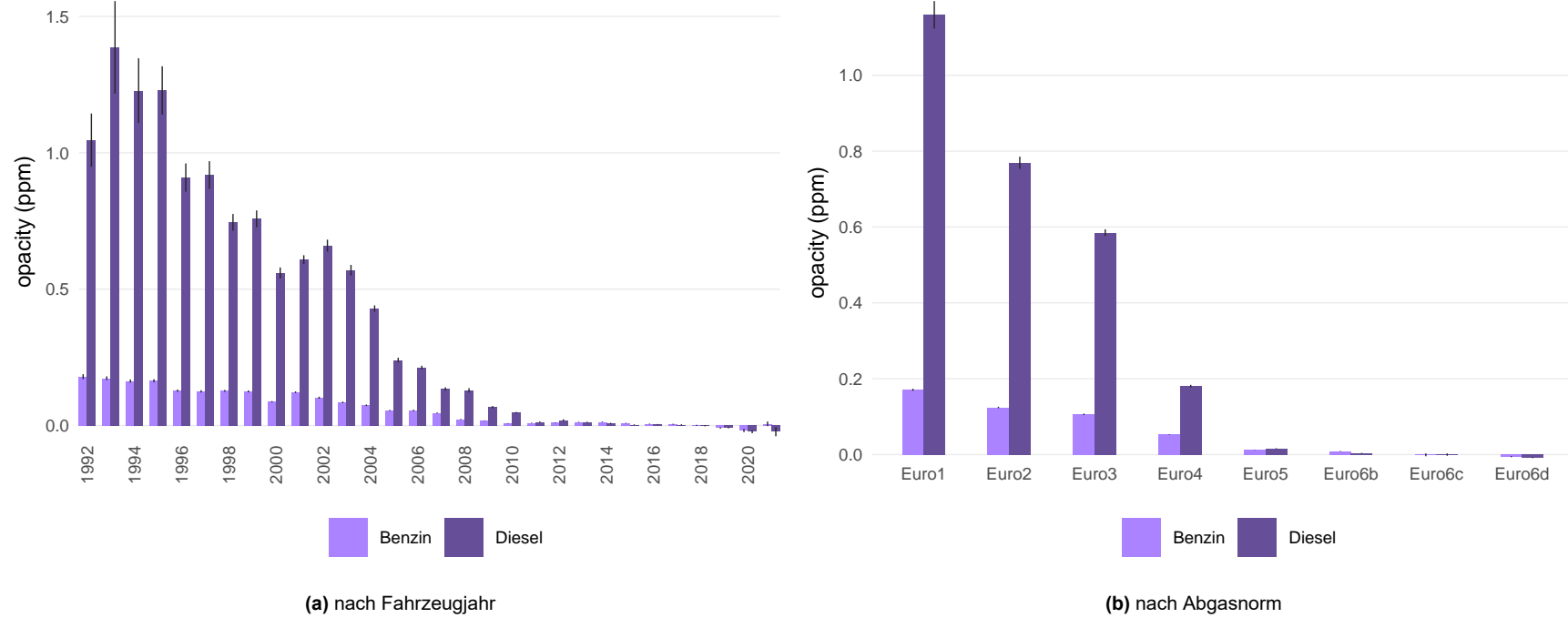
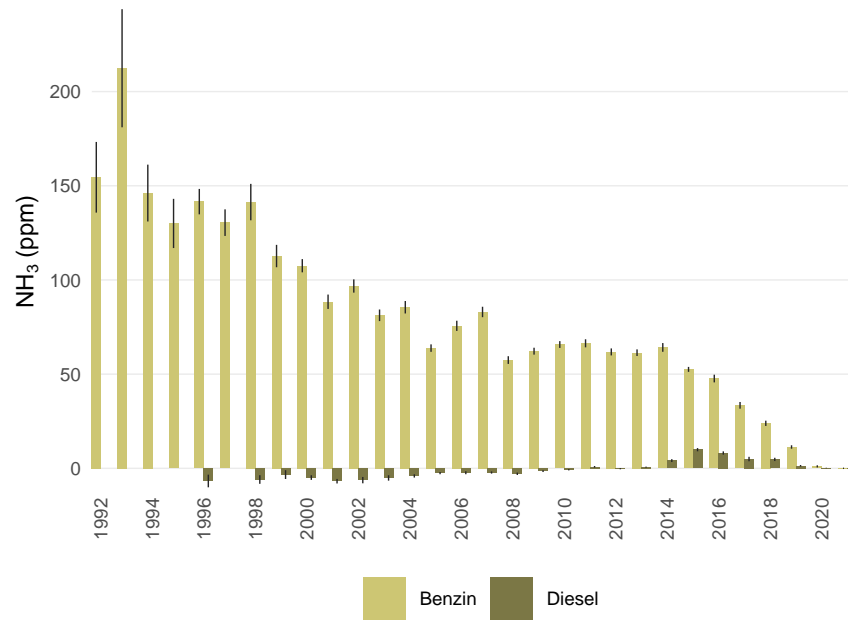


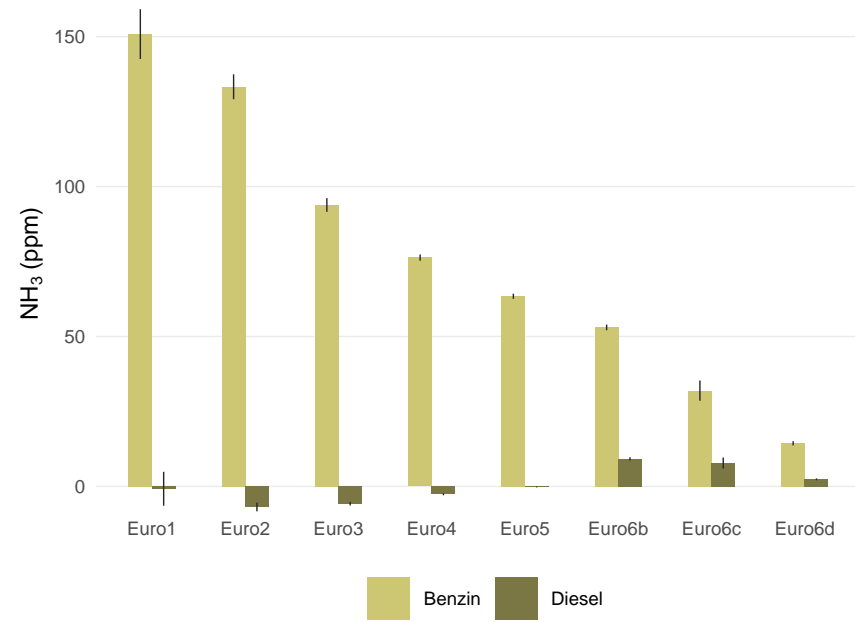
Abbildung 47: Opacity Stoffmengenanteil im unverdünnten Abgas.



7.6.1.6 Ammoniak



(a) nach Fahrzeugjahr



(b) nach Abgasnorm

Abbildung 48: NH₃ Stoffmengenanteil im unverdünnten Abgas.



7.6.2 Detailauswertung Stickoxide

Im Folgenden findet sich eine Auflistung aller durchgeführten Detail-Auswertungen.

7.6.2.1 Stickoxid-Emissionen

7.6.2.1.1 Durchschnittliche Emission der vermessenen Fahrzeugflotte

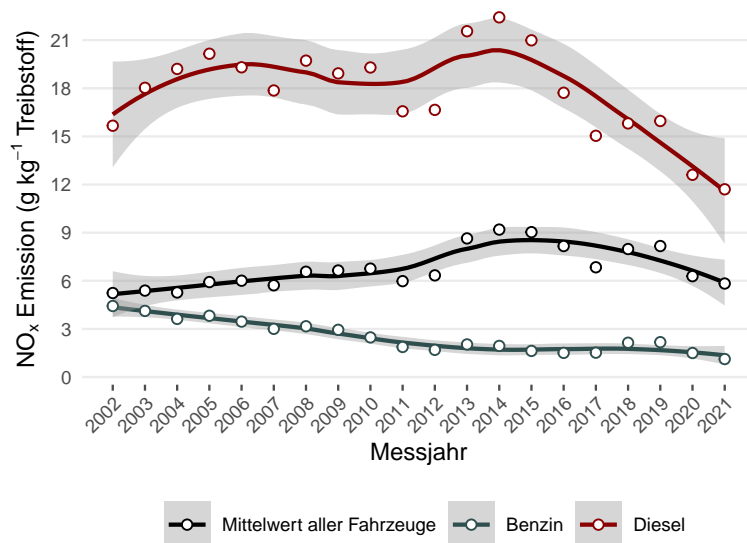


Abbildung 49: Mittlere NO_x Emission aller erfassten Personen- und Lieferwagen pro Messjahr. Kleinere Schwankungen der Mittelwerte von Jahr zu Jahr können eine Folge sich zwischen den Jahren ändernder (erfassten) Flottenzusammensetzung, Fahrbedingungen (wenn an Standorten mit anderen Motorlast-Anforderungen, gemessen wurde) sowie systematischen Messunsicherheiten zwischen verschiedenen Messgeräten sein. Der grau schattierte Bereich zeigt den Vertrauensbereich (98-Prozent Vertrauensintervall) der eingezeichneten Trendlinien an.

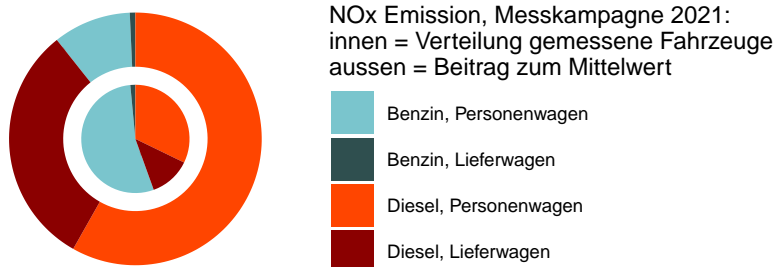


Abbildung 50: Zusammensetzung der mittleren NO_x Emission aller gemessenen Personen- und Lieferwagen im aktuellsten Messjahr mit der Verteilung der Anzahl gemessener Benzin- und Dieselfahrzeuge (innen) und ihrem relativen Beitrag zur mittleren NO_x Emission (ausen).

7.6.2.1.2 Vergleich der Emissionen: berechnet mit dem NO₂-Anteil aus HBEFA vs. gemessenem NO₂-Anteil

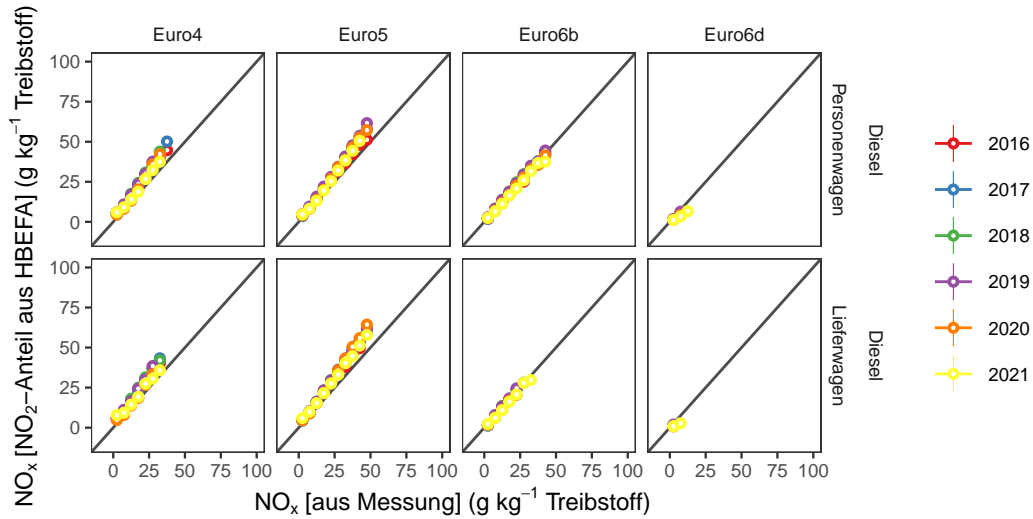


Abbildung 51: Vergleich der NO_x Emissionen von Diesel-Fahrzeugen nach Abgasnorm auf Basis des gemessenen NO₂ sowie entweder mittels HBEFA abgeleiteten oder direkt gemessenen NO₂ Anteils.

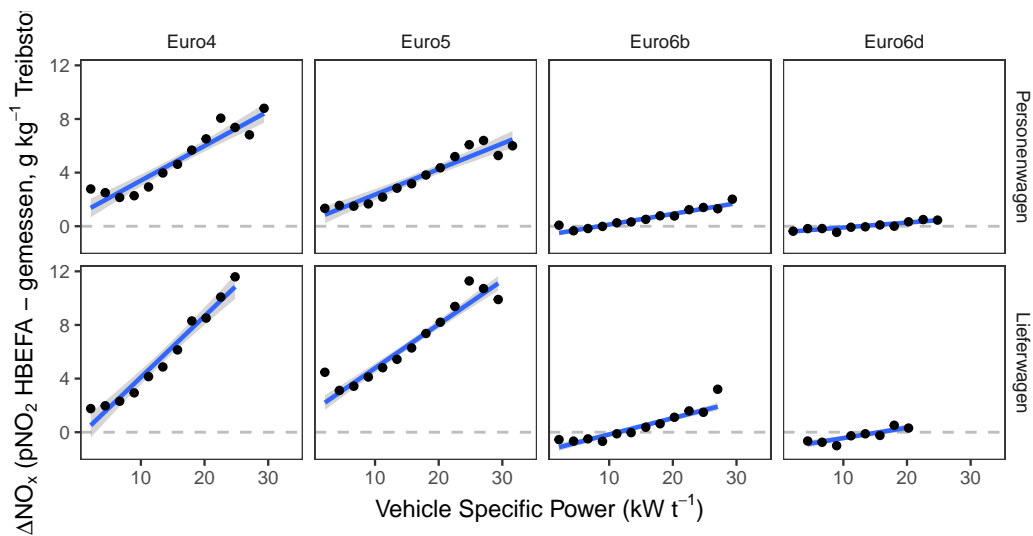


Abbildung 52: Vergleich der NO_x Emissionen von Diesel-Fahrzeugen nach Abgasnorm: Differenz NO₂ Anteil aus HBEFA - direkt gemessen, in Abhängigkeit von Vehicle Specific Power.

7.6.2.1.3 Zeitliche Entwicklung der Emissionen

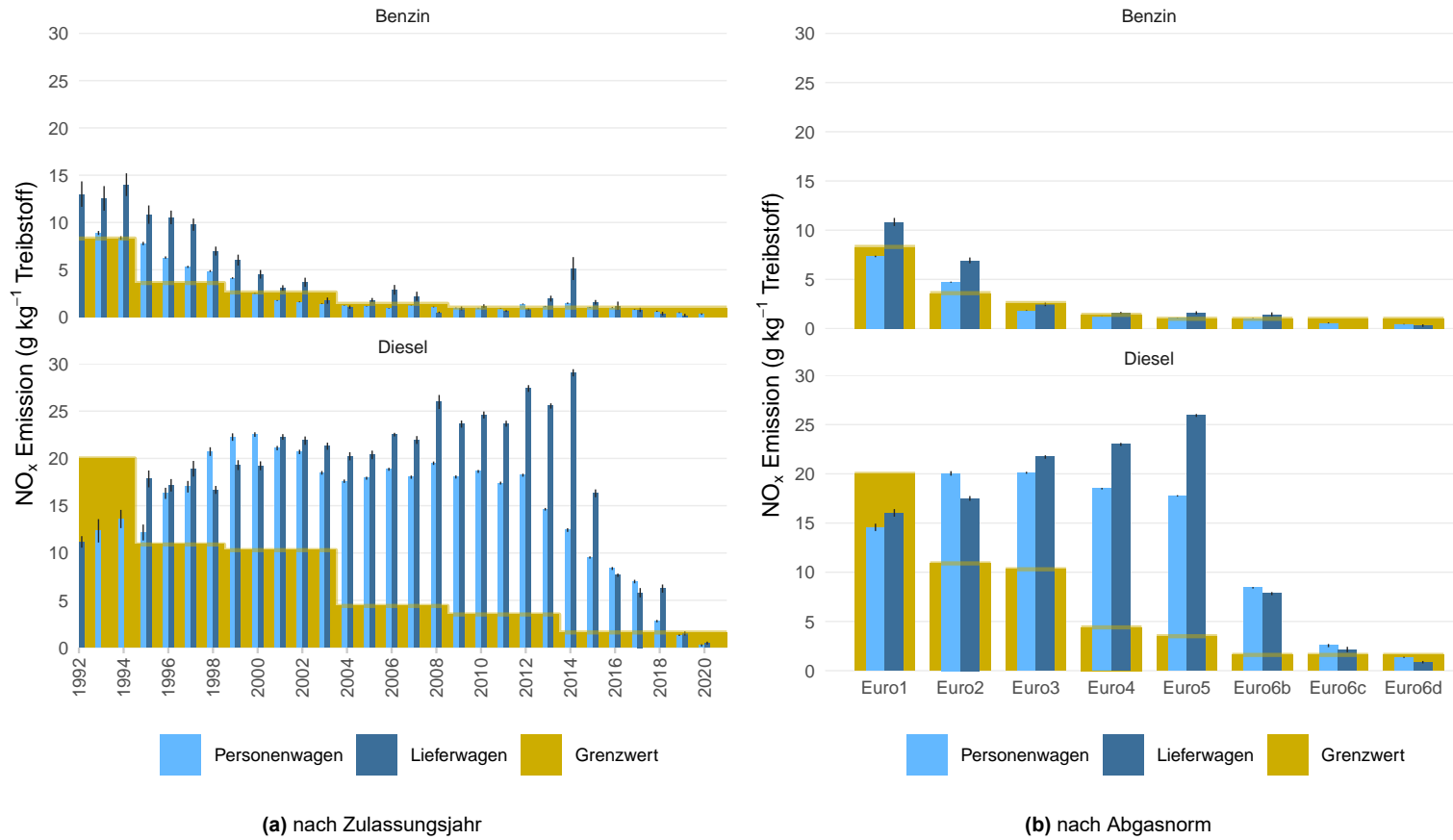
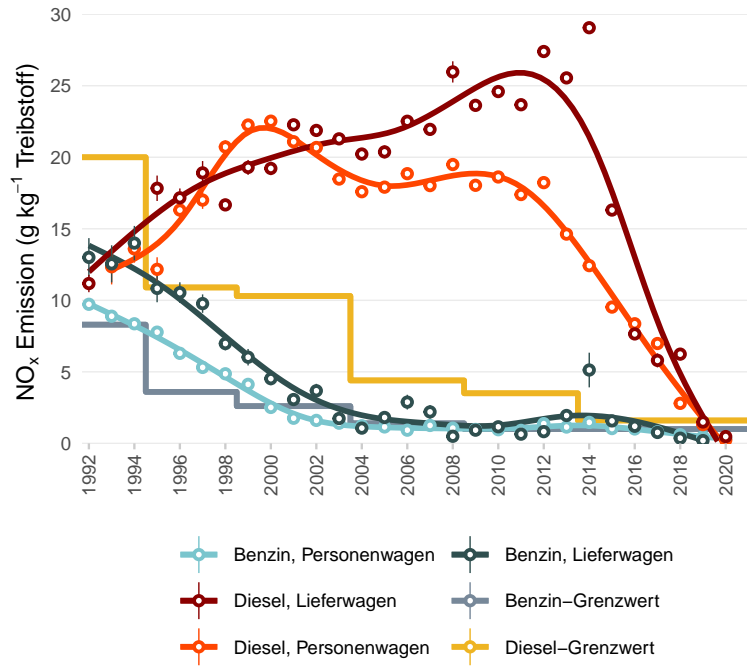
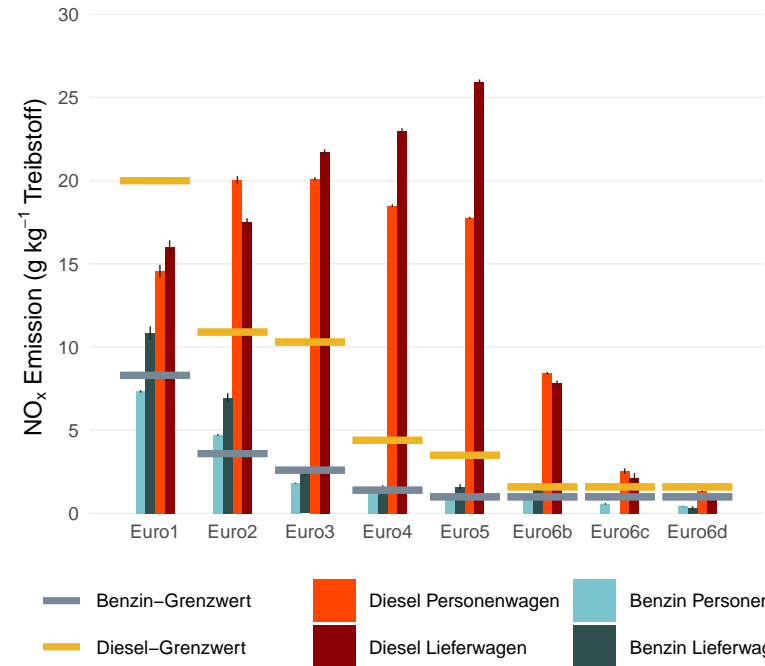


Abbildung 53: Mittlere NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) nach Treibstoff und Fahrzeugkategorie.



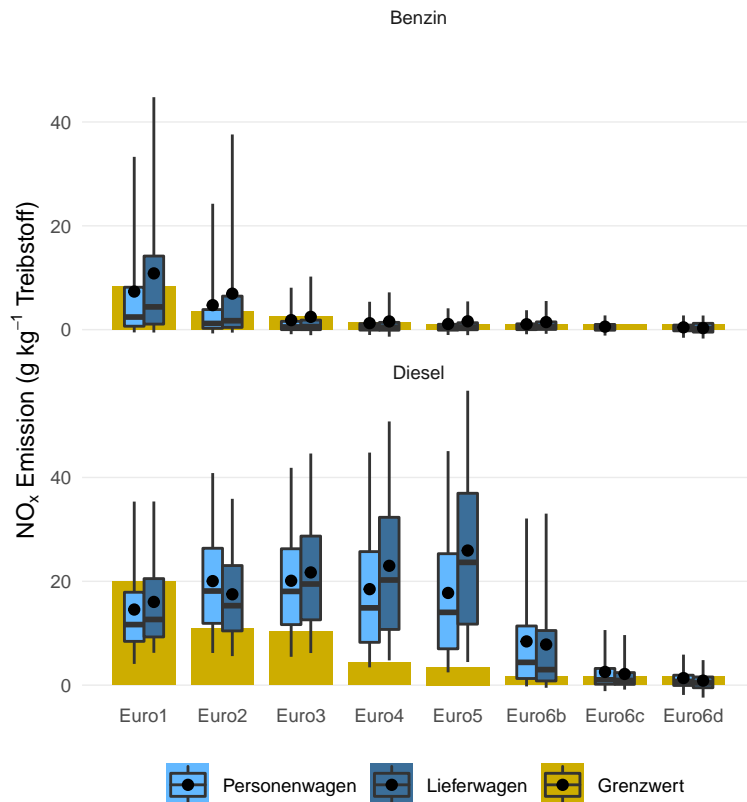
(a) nach Zulassungsjahr



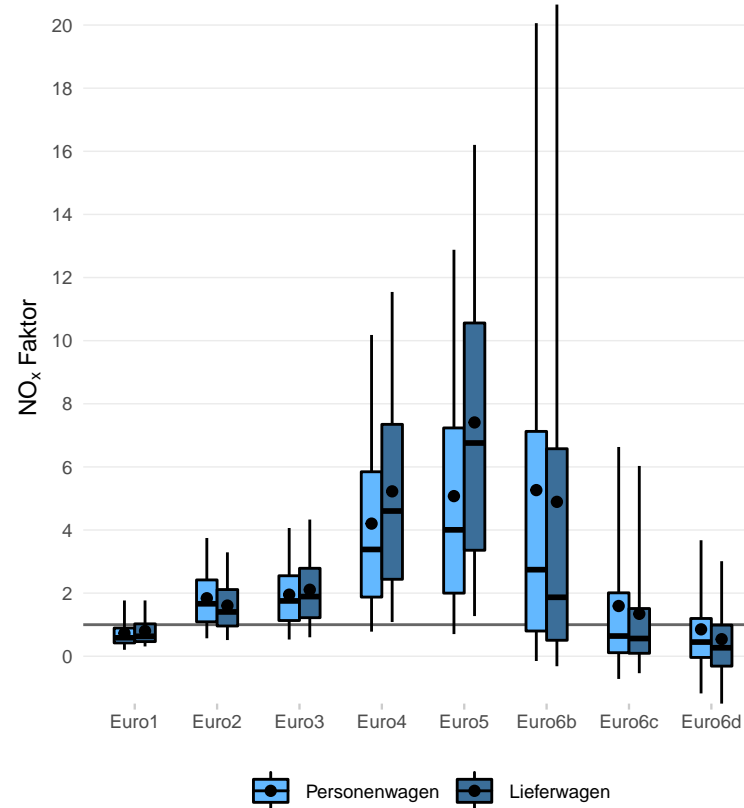
(b) nach Abgasnorm

Abbildung 54: Mittlere NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) nach Treibstoff und Fahrzeugkategorie (Variante 2).





(a) Emission



(b) NO_x Faktor

Abbildung 55: Boxplots von NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) sowie NO_x Faktor (Emission : Grenzwert) nach Treibstoff, Fahrzeugkategorie und Abgasnorm.



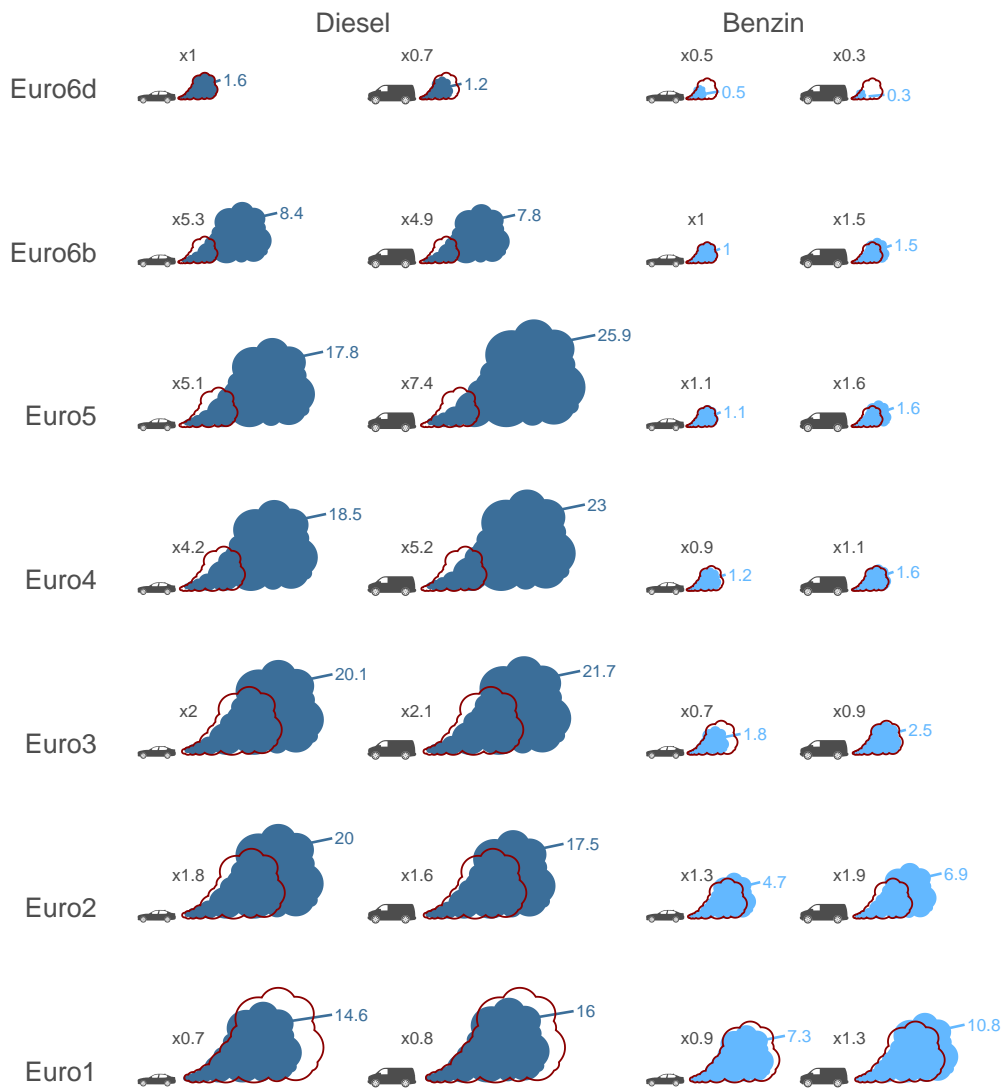


Abbildung 56: Mittlere NO_x Emission (NO₂-Anteil HBEFA) in g/kg Treibstoff als schematische Übersicht; ausgefüllte Abgaswolken symbolisieren den mittels Remote Sensing gemessenen NO_x-Ausstoß auf der Strasse, offene rote Symbole markieren die Grenzwerte aus der Typenzulassung (umgerechnet in g/kg Treibstoff); farbige Zahlen = NO_x Emission (g/kg Treibstoff), graue Zahlen über Fahrzeug = NO_x Faktor (Emission : Grenzwert); Darstellung frei nach ICCT.

7.6.2.1.4 Marken

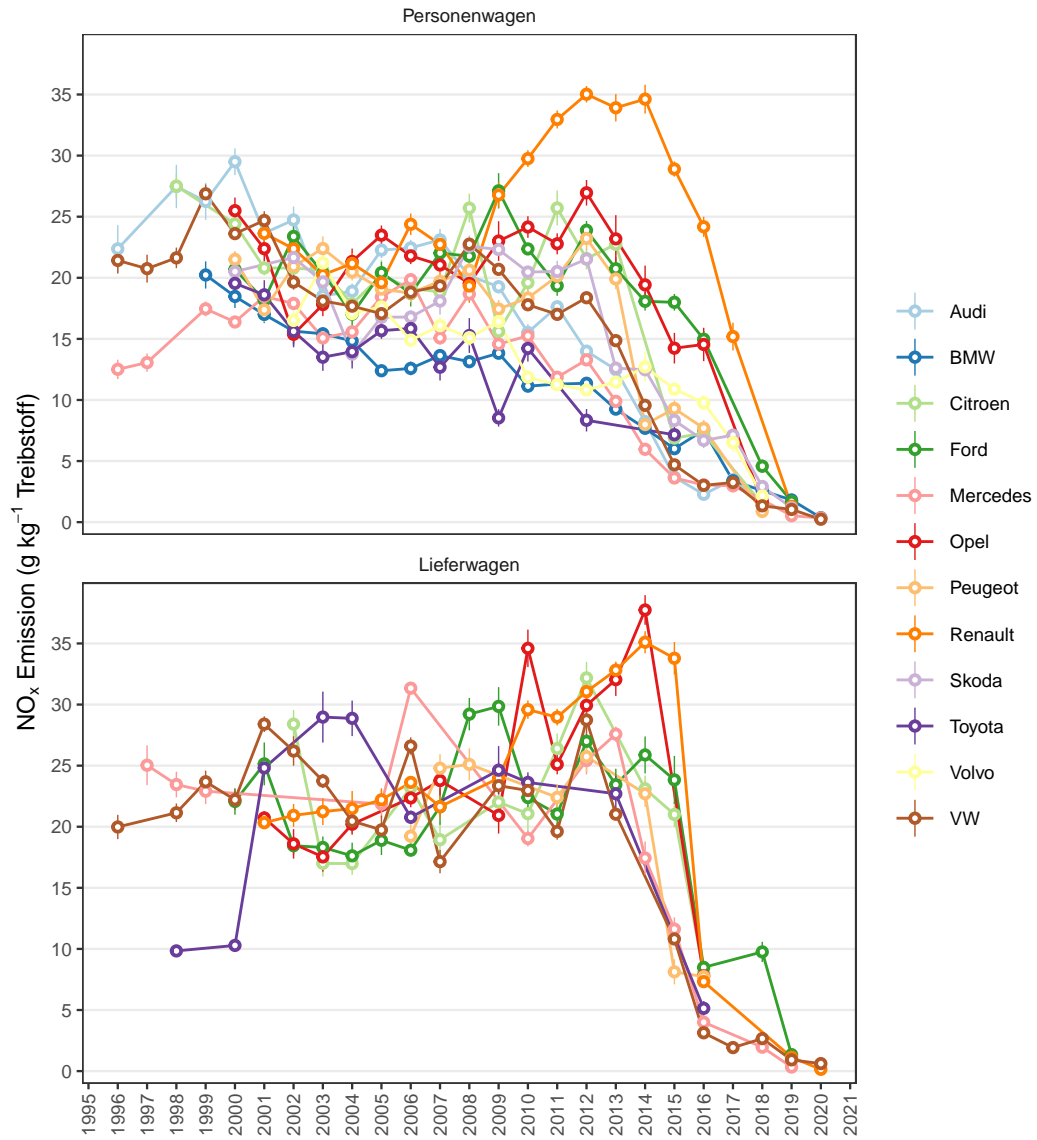


Abbildung 57: Mittlere NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) aller vermessenen Dieselfahrzeuge pro Fahrzeugjahr und Marke (12 häufigsten Marken, n > 49 pro Klasse).

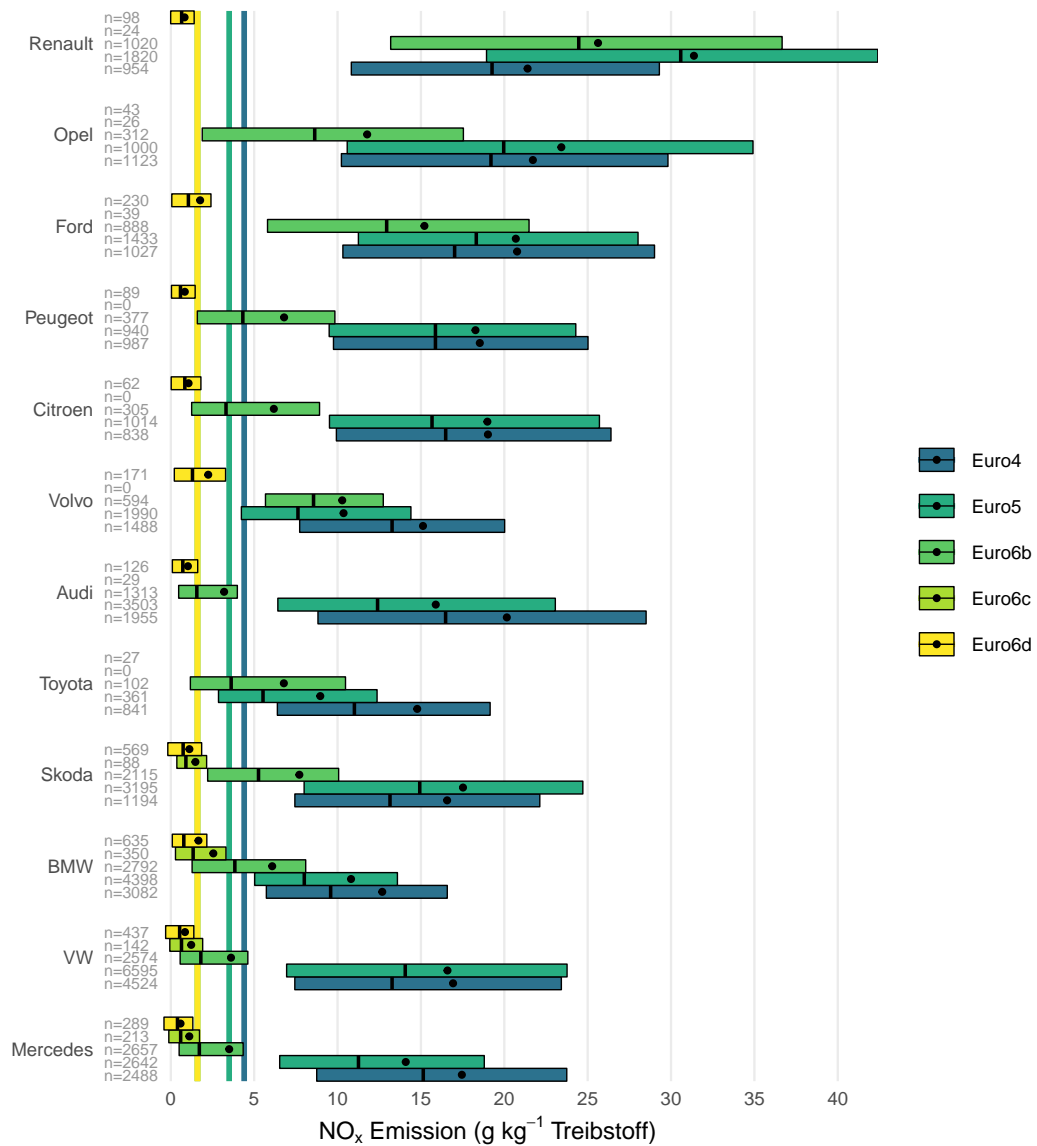


Abbildung 58: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Personenwagen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm (n > 49 und VSP < 20 kW/t); farbige durchgezogenen vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert; Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst.

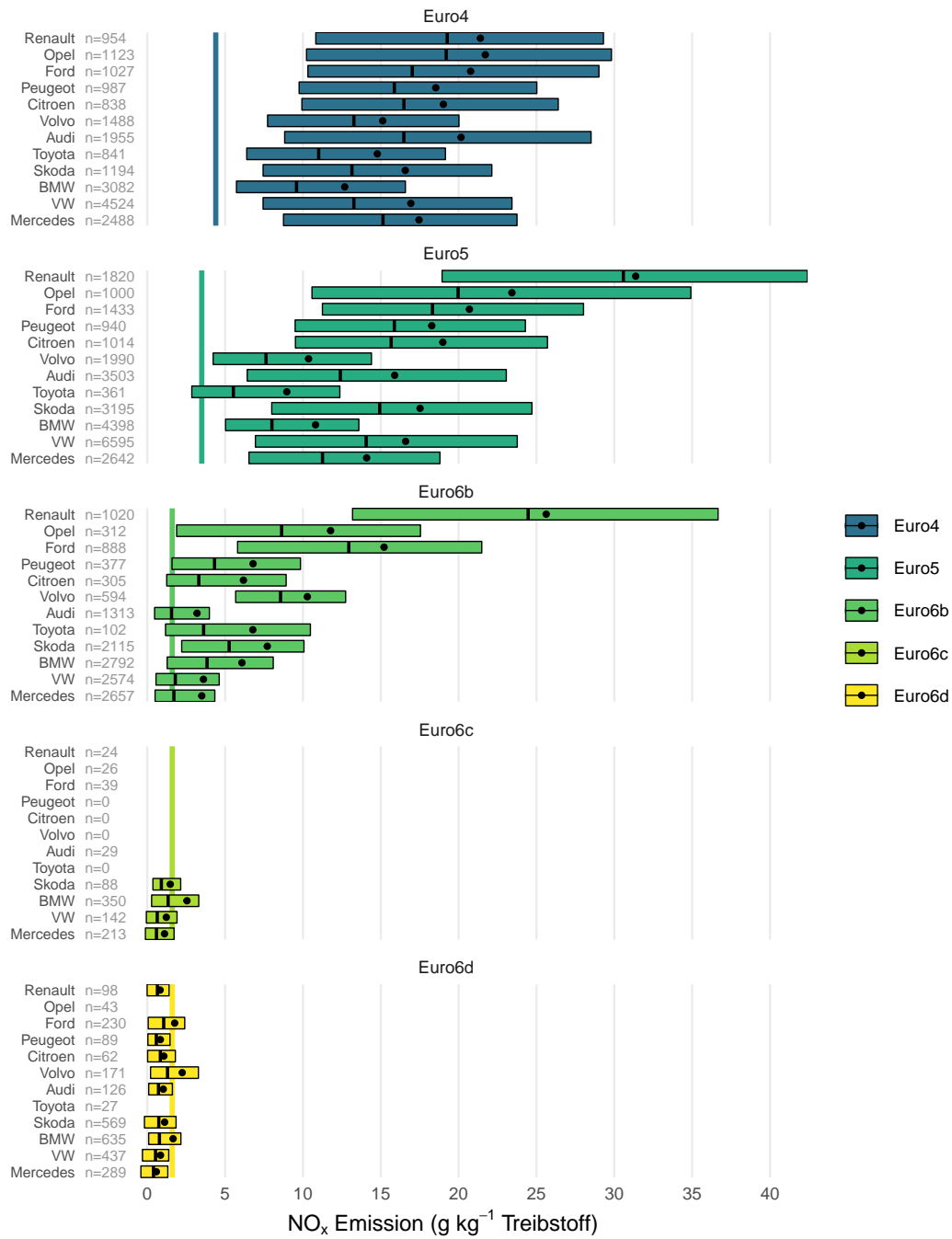


Abbildung 59: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Personenwagen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm (n > 49 und VSP < 20 kW/t); farbige durchgezogenen vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert; Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst (Variante 2).

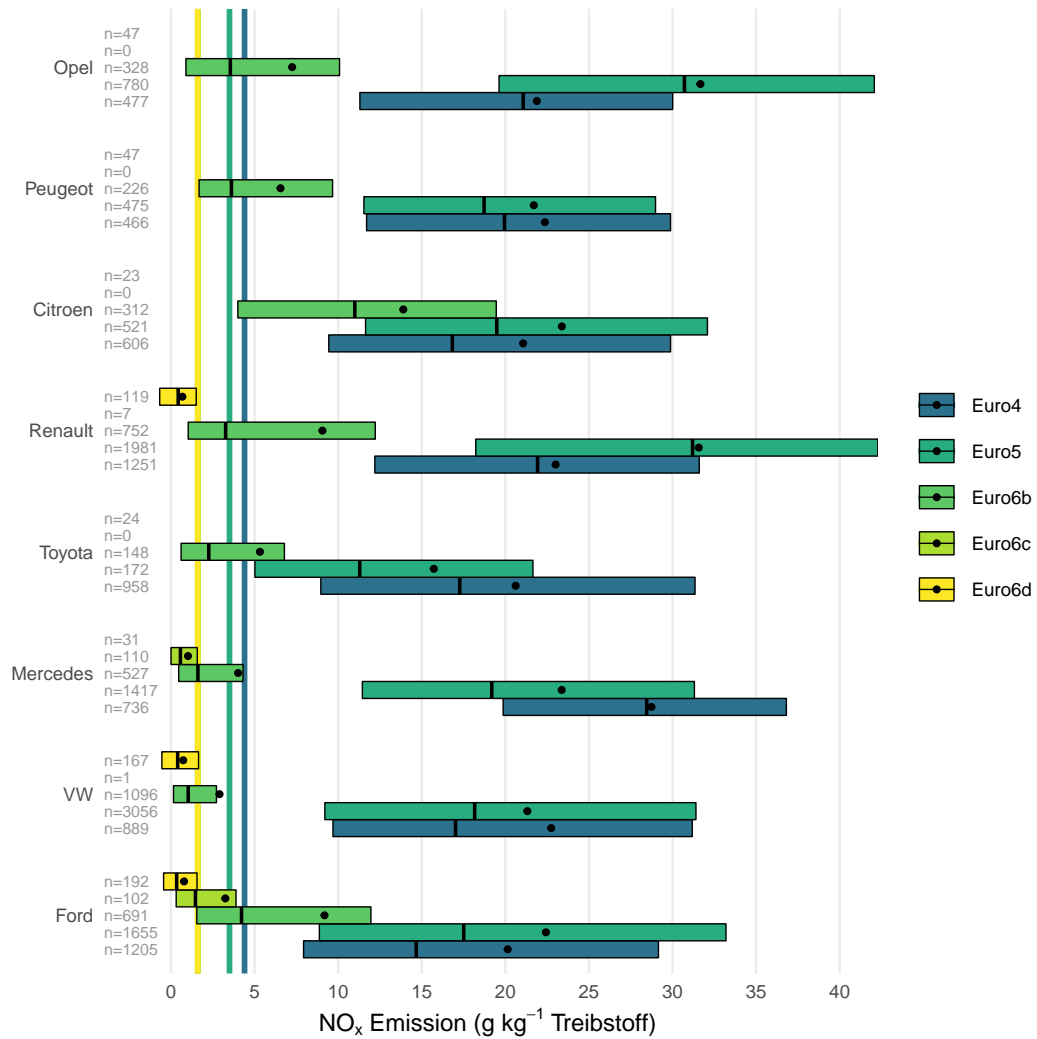


Abbildung 60: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Lieferwagen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm (n > 49 und VSP < 20 kW/t); farbige durchgezogene vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert; Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst.

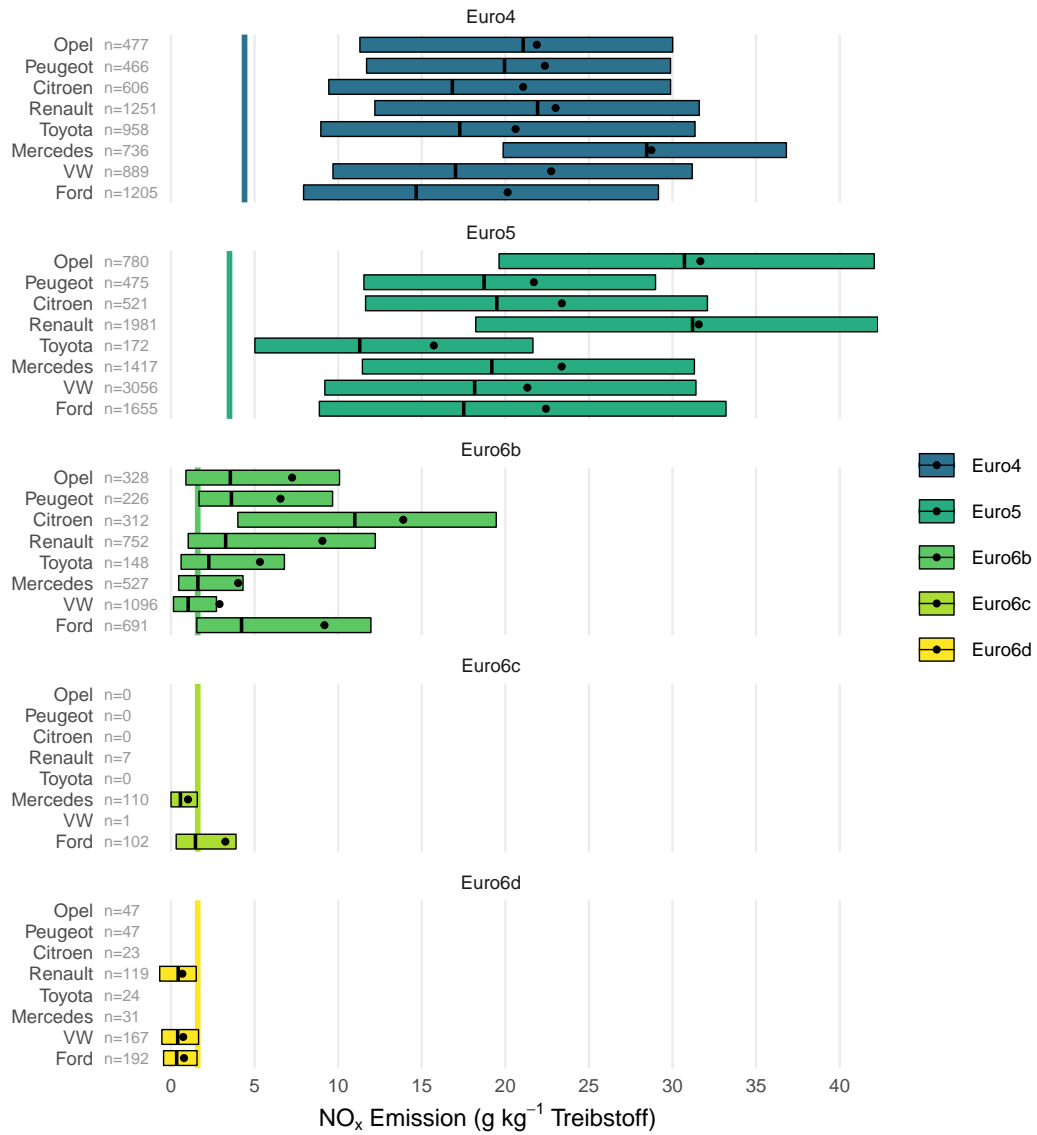


Abbildung 61: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Lieferwagen-Dieselfahrzeugen nach Marke und Abgasnorm (n > 49 und VSP < 20 kW/t); farbige durchgezogene vertikale Linien kennzeichnen den Grenzwert; Box = 25 - 75 Prozent Perzentil, Strich = Median, Kreis = Mittelwert; Reihenfolge der Marken: Median über alle Abgasnormen sortiert; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst (Variante 2).

7.6.2.1.5 High-Emitters

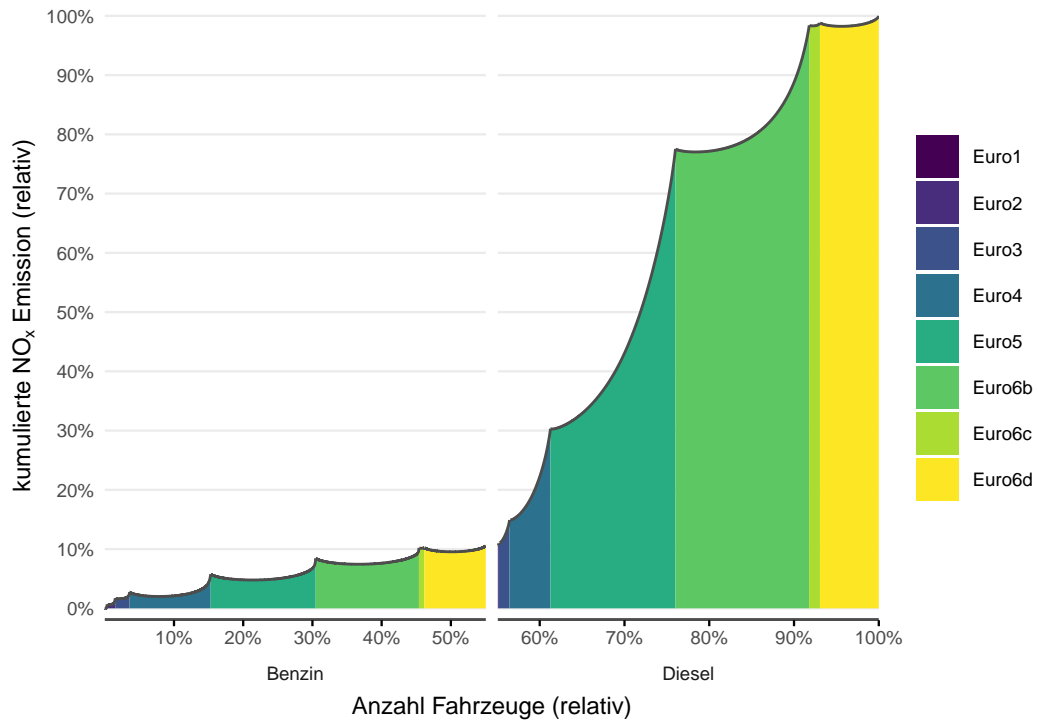


Abbildung 62: Kumulierte NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) aller in der aktuellsten Messkampagne vermessenen Fahrzeuge mit Vehicle Specific Power < 20 kW/t. Starke Anstiege der kumulierten Emissionen weisen auf einen vergleichsweise hohen Einfluss dieser Werte auf die Gesamtemissionen hin.

7.6.2.1.6 Einfluss der Motorlast

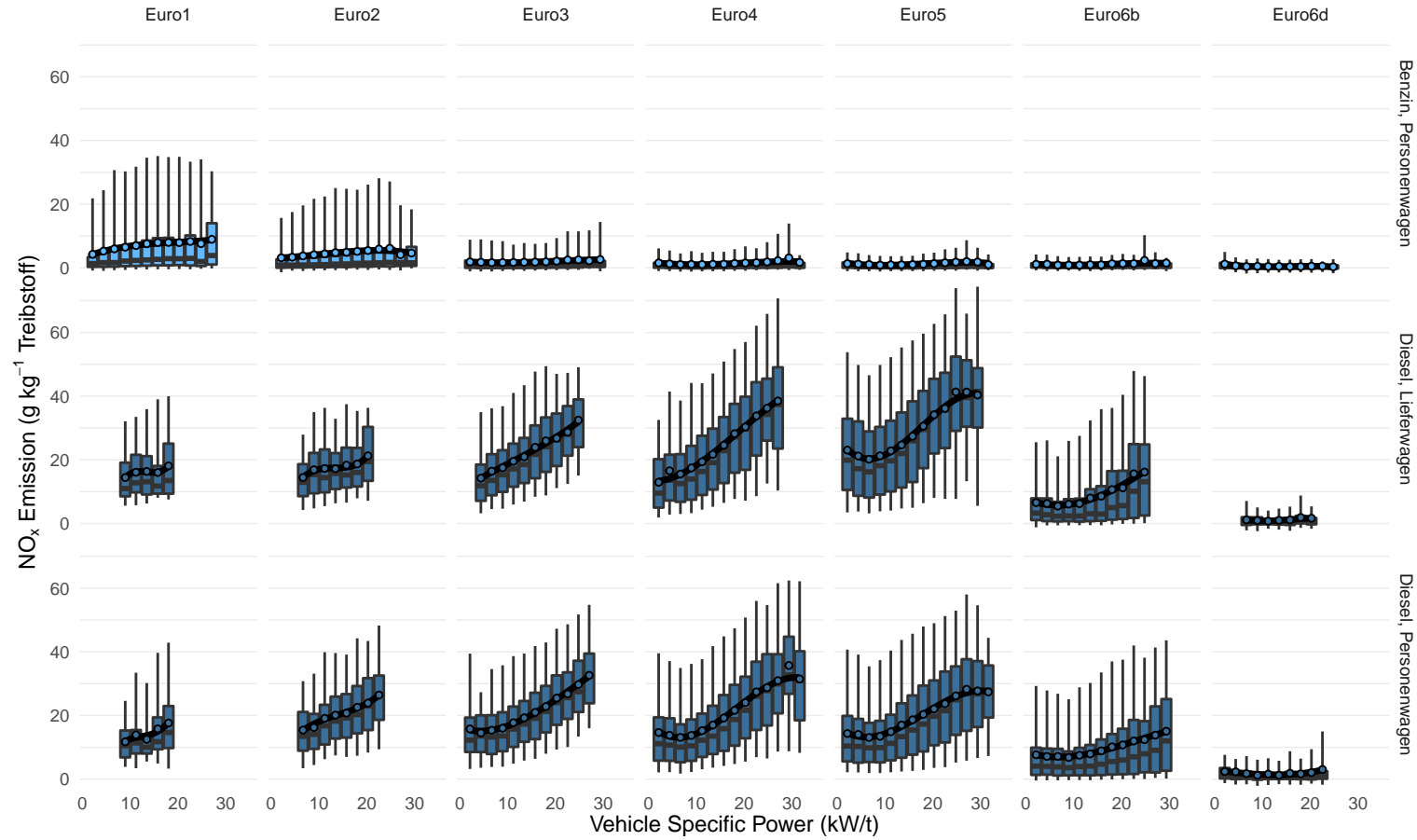


Abbildung 63: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA), strukturiert nach Vehicle Specific Power, Treibstoff, Fahrzeugtyp und Abgasnorm.

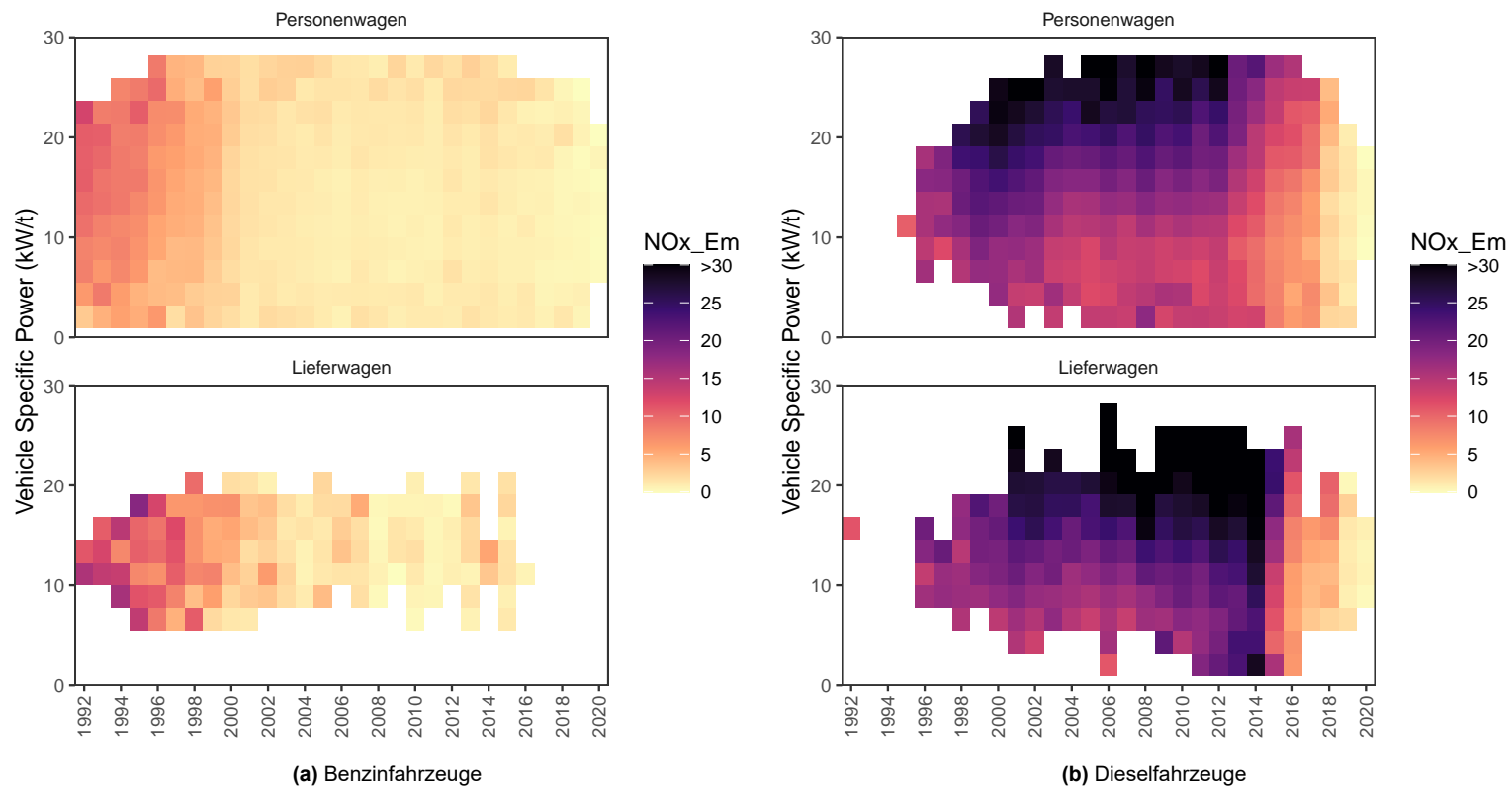


Abbildung 64: Mittlere NO_x Emissionen (NO_2 -Anteil HBEFA) (in g/kg Treibstoff) nach Fahrzeugjahr und Fahrzeugkategorie in Abhängigkeit von Vehicle Specific Power (siehe auch Carslaw et al., 2013).



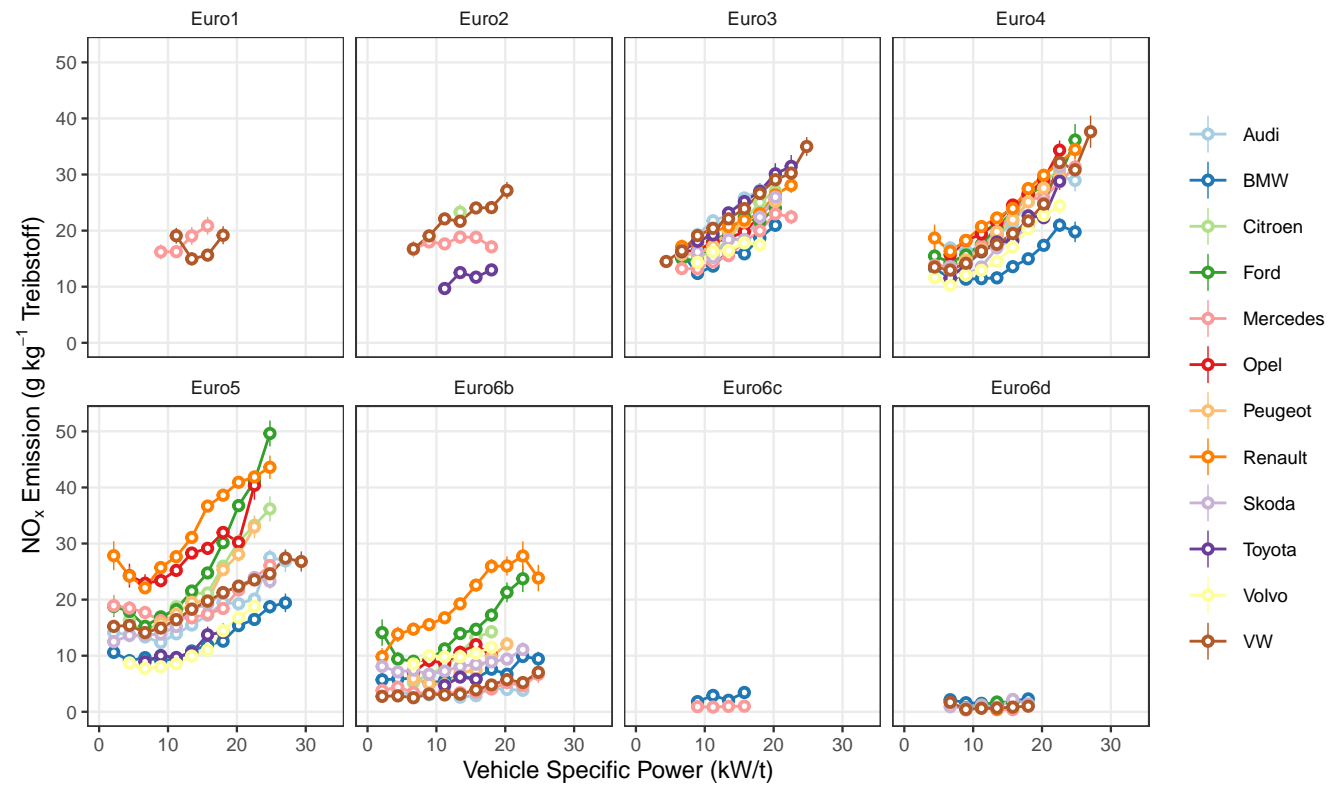


Abbildung 65: NO_x Emissionen (NO_2 -Anteil HBEFA) von Dieselfahrzeugen in Abhängigkeit von Vehicle Specific Power, strukturiert nach Abgasnorm und Hersteller.



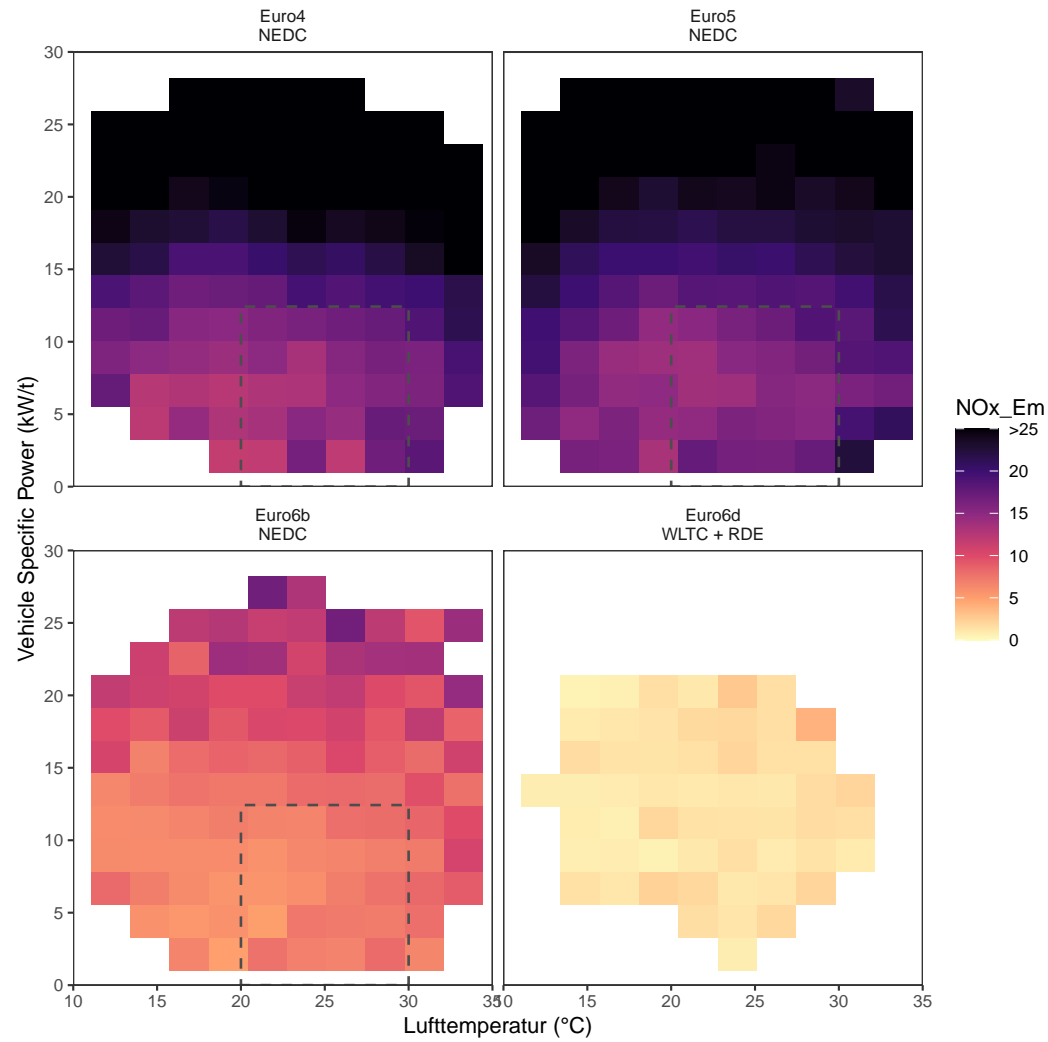


Abbildung 66: Mittlere NO_x Emissionen (NO_2 -Anteil HBEFA) (in g/kg Treibstoff) von Dieselfahrzeugen nach Abgasnorm in Abhängigkeit von Vehicle Specific Power (VSP) und Lufttemperatur; die gestrichelte Box zeigt horizontal die Bandbreite an Temperaturen, die während der Typenprüfung erlaubt sind, sowie in ihrer vertikalen Ausdehnung das 95-Prozent-Perzentil der VSP-Werte im jeweiligen Prüfzyklus.



7.6.2.1.7 Weitere Einflussfaktoren

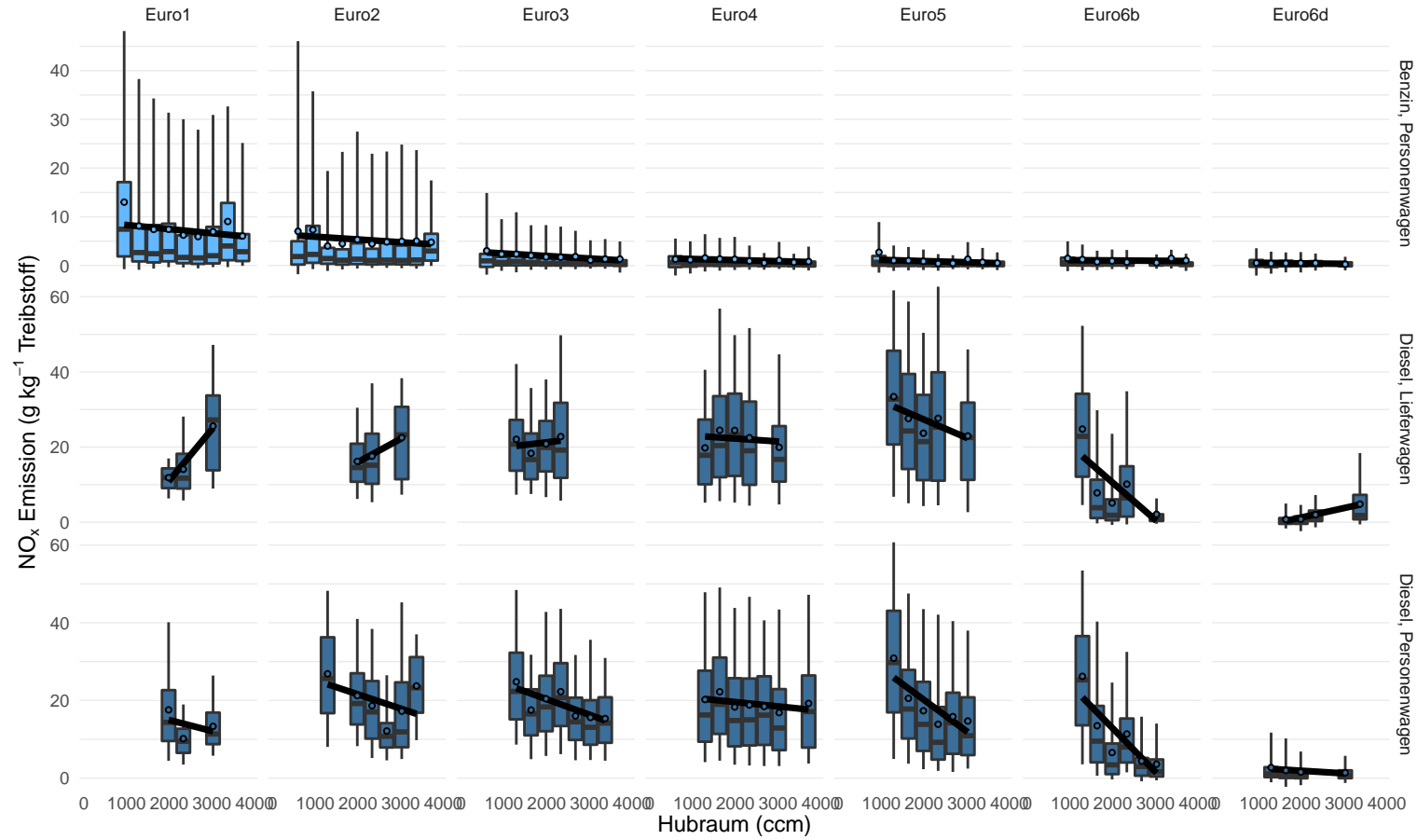


Abbildung 67: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA), strukturiert nach Hubraum, Treibstoff und Abgasnorm.



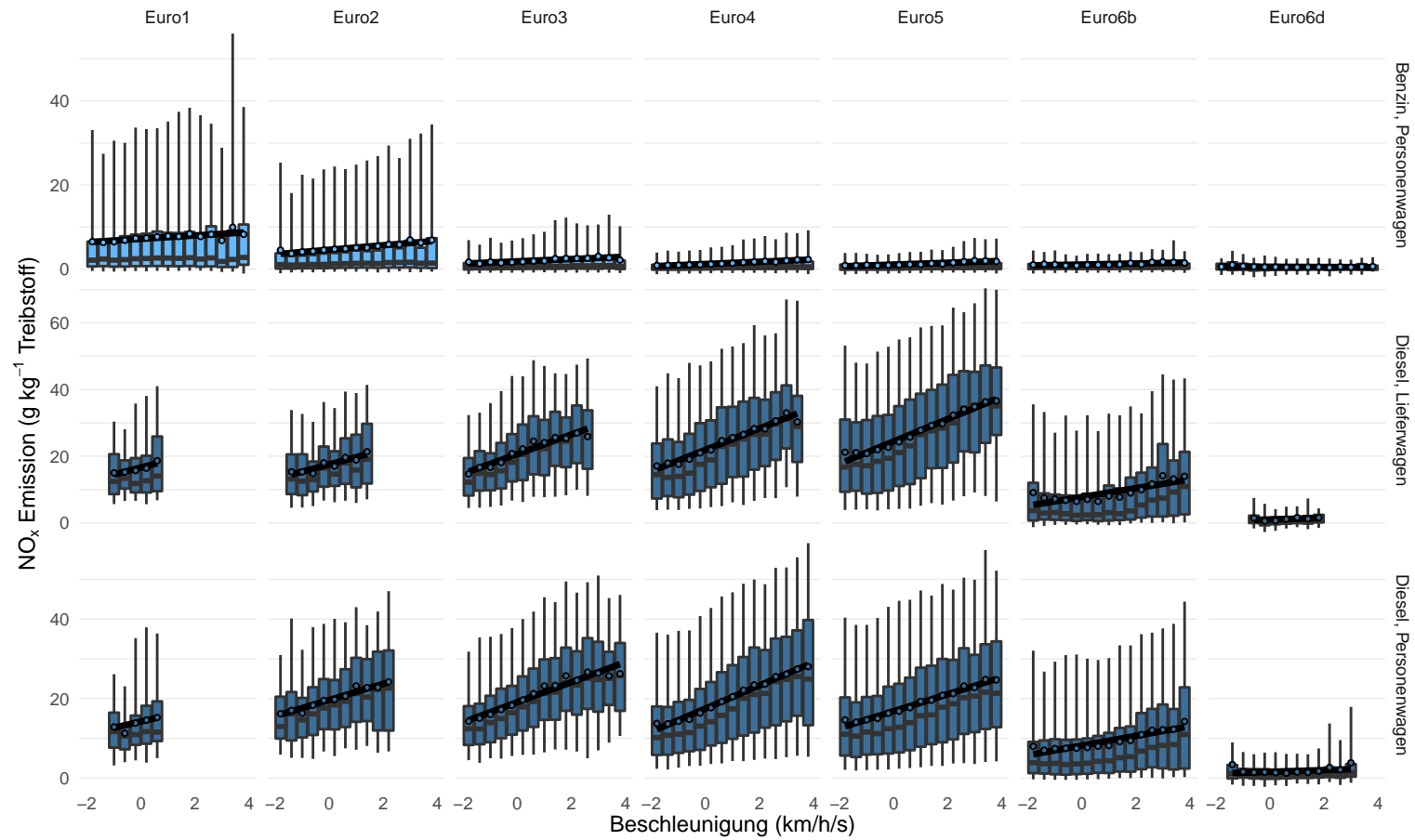


Abbildung 68: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA), strukturiert nach Beschleunigung, Treibstoff und Abgasnorm.



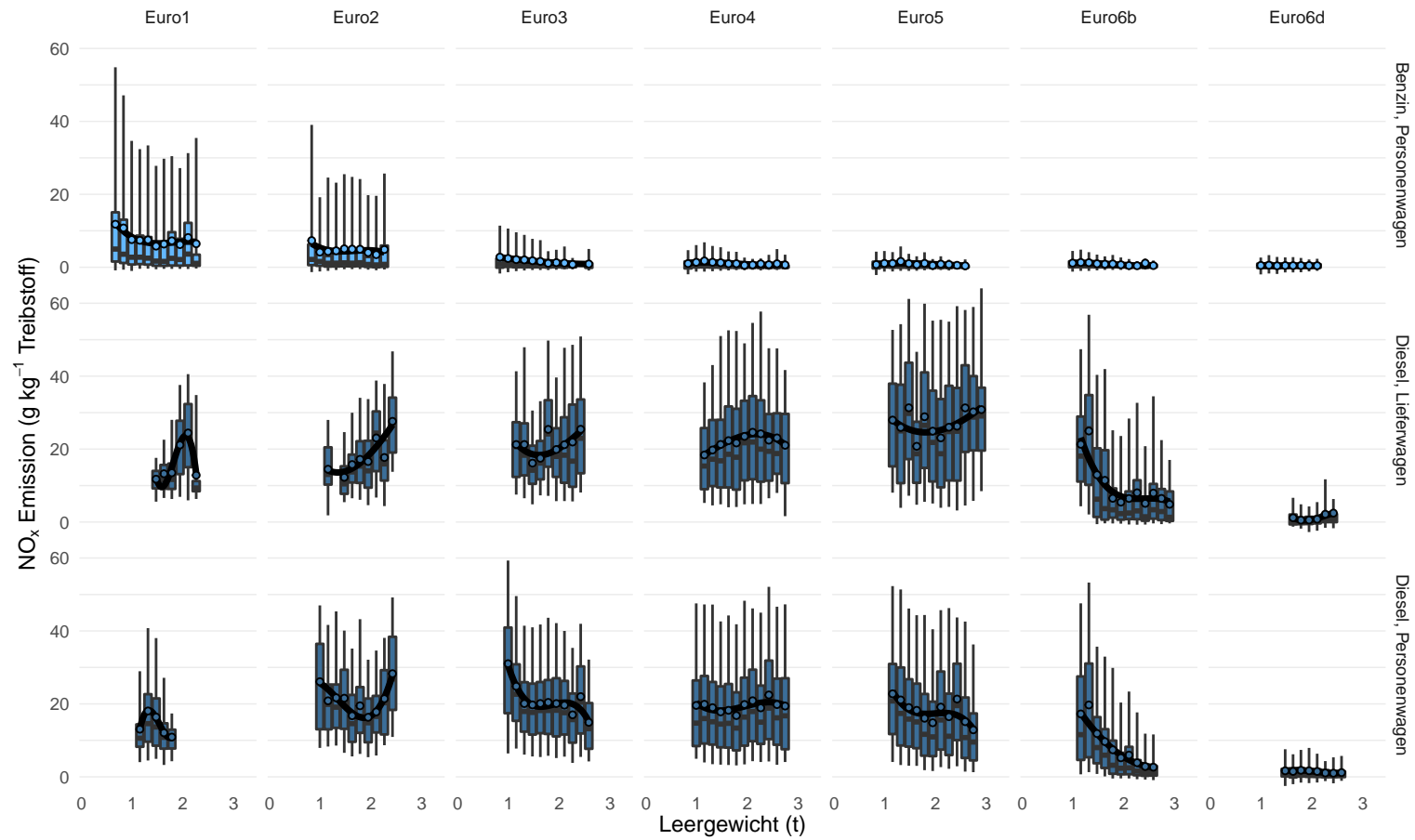


Abbildung 69: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA), strukturiert nach Leergewicht, Treibstoff und Abgasnorm.



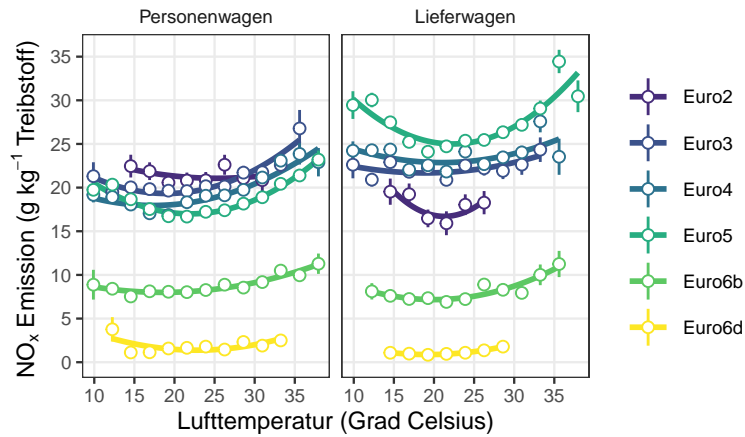


Abbildung 70: Mittlere NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Diesel-Fahrzeugen nach Lufttemperatur und Abgasnorm; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst.

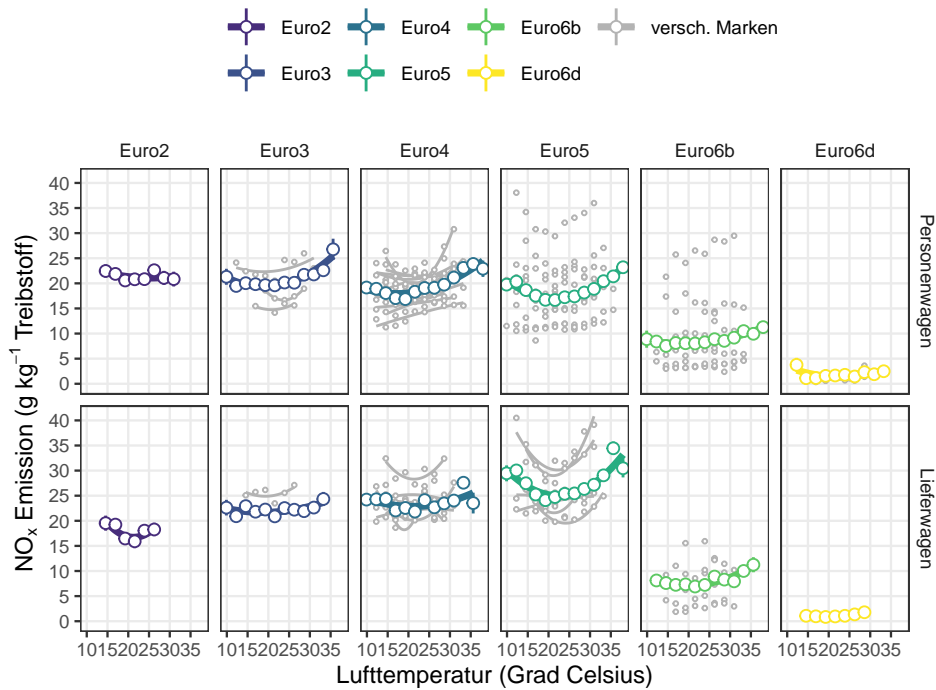


Abbildung 71: Mittlere NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Diesel-Fahrzeugen nach Lufttemperatur und Abgasnorm; wenn ausreichend Daten vorhanden, wurde zusätzlich das Temperaturverhalten verschiedener Marken einzeln hinzugefügt; Euro5a und Euro5b sind zu Euro5 zusammengefasst.

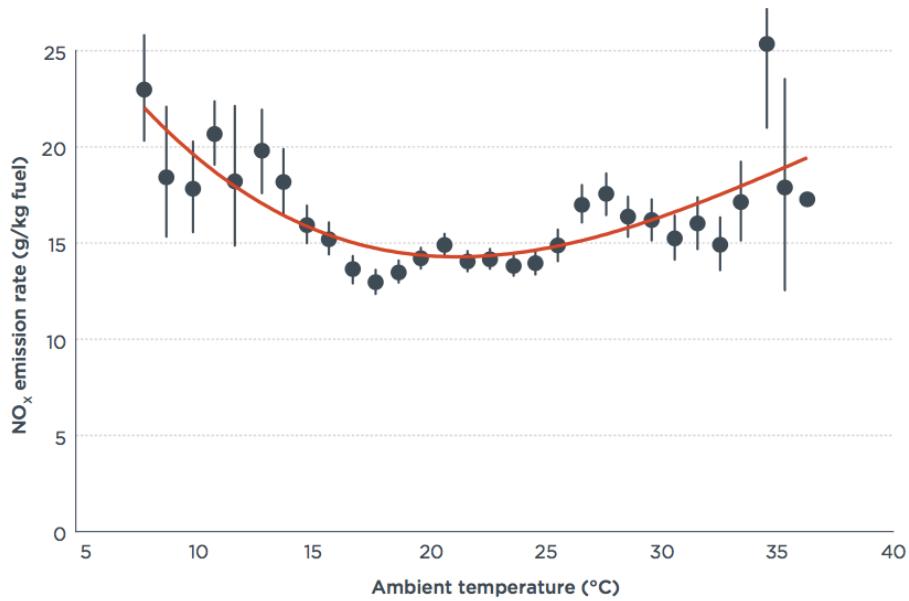


Abbildung 72: Lufttemperaturabhängigkeit der NO_x Emissionen von Euro5 Dieselfahrzeugen (Quelle: Borken-Kleefeld und Dallmann, 2018).

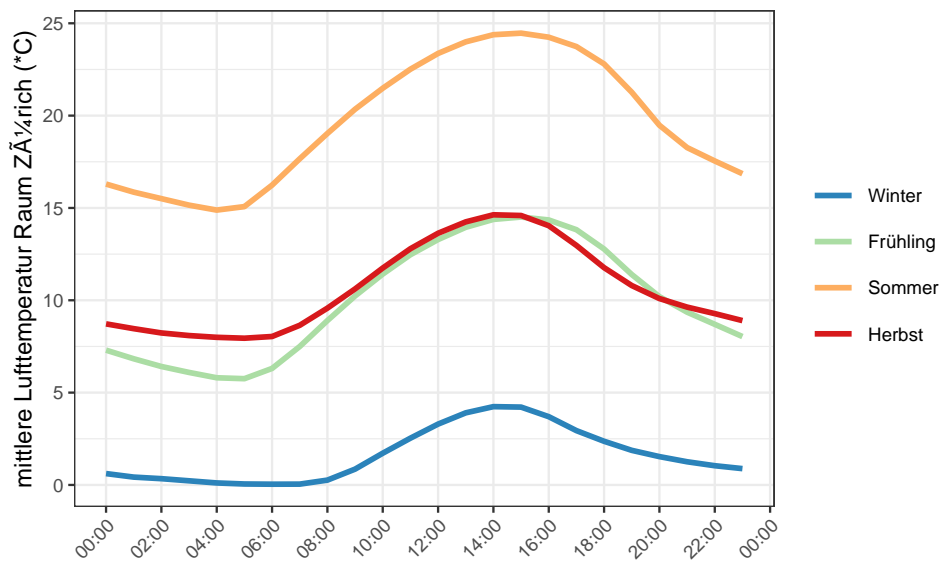


Abbildung 73: Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur im Raum Zürich (Daten Meteoschweiz).

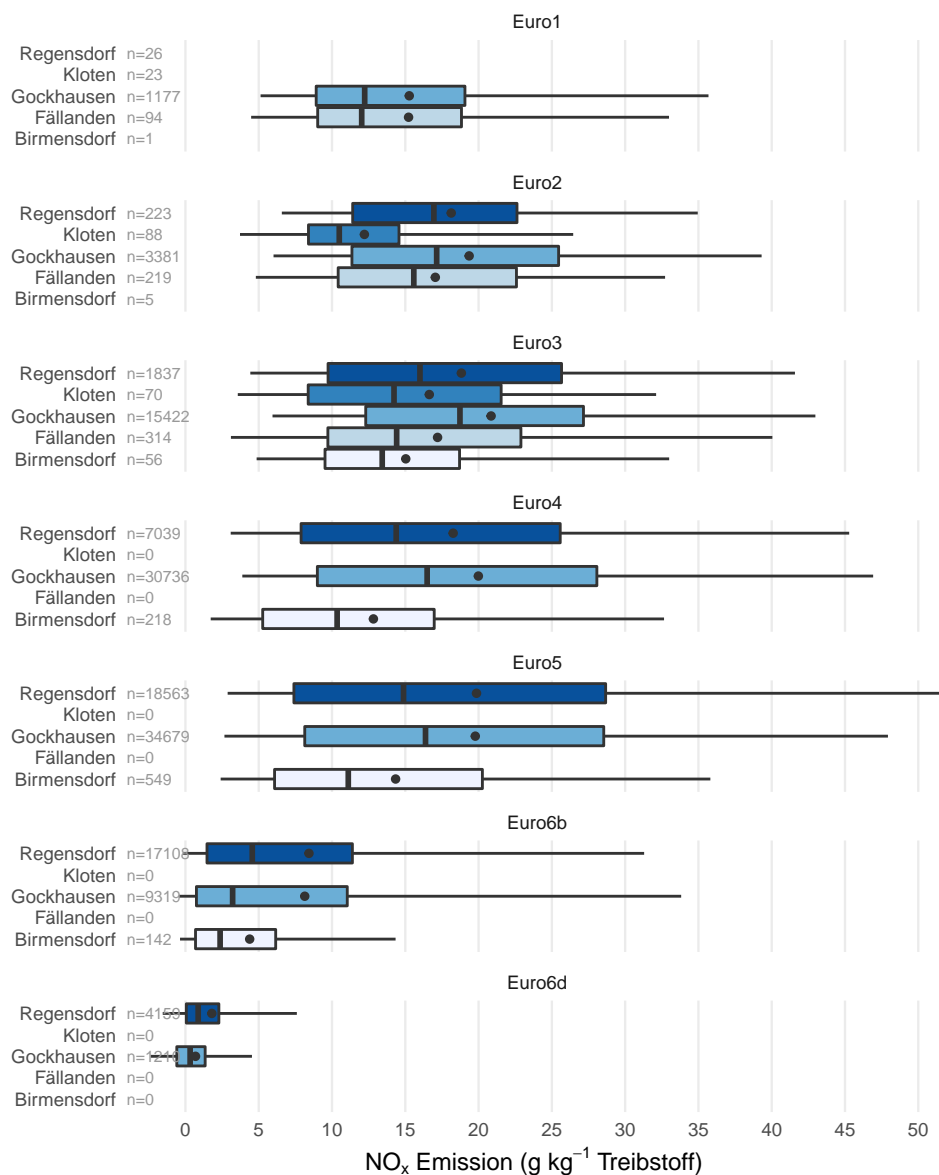


Abbildung 74: NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Diesel-Fahrzeugen nach Abgasnorm und Messstandort.

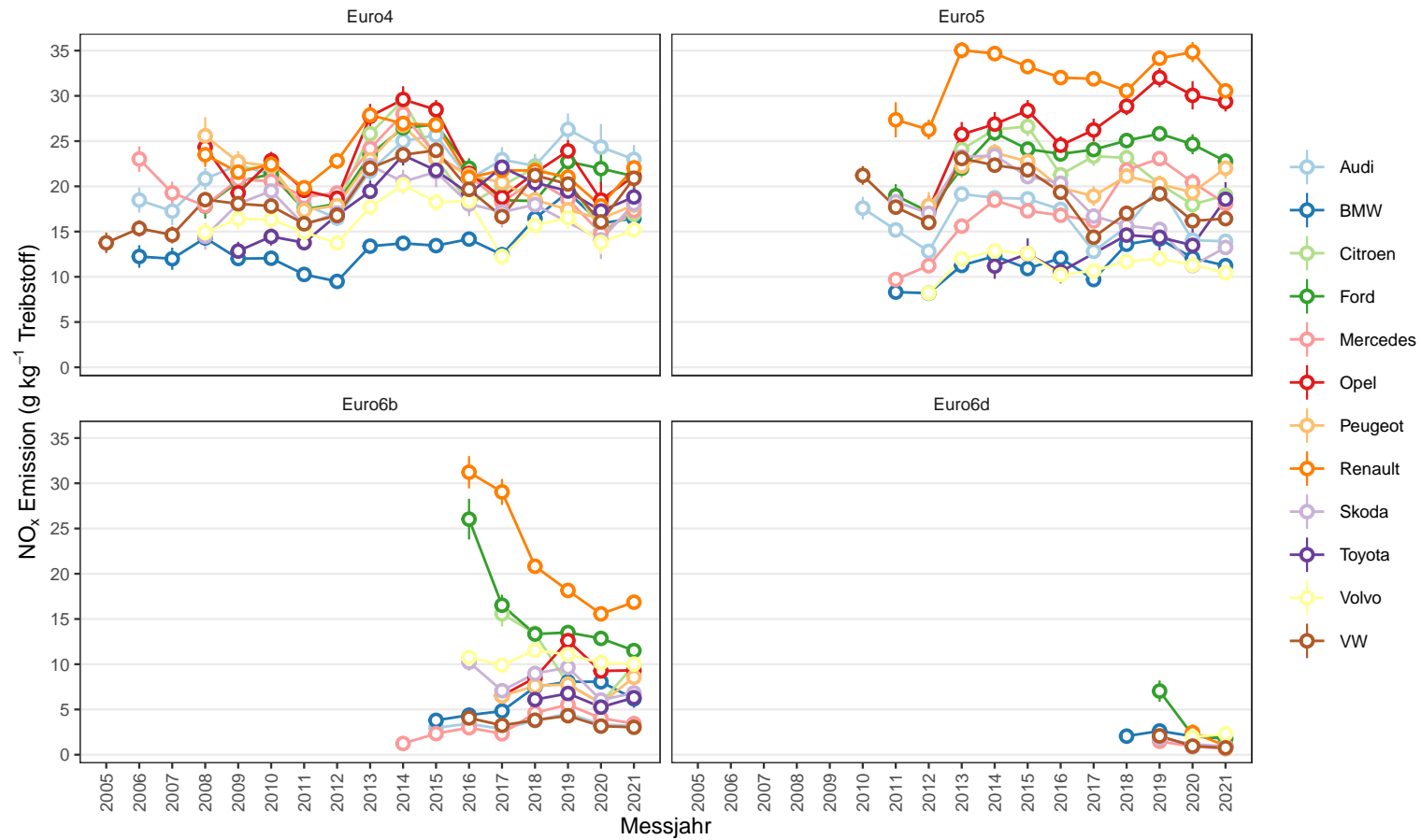


Abbildung 75: Mittlere NO_x Emissionen (NO₂-Anteil HBEFA) von Dieselfahrzeugen in Abhängigkeit des Messjahres, strukturiert nach Abgasnorm und Marke.

7.6.2.2 Oxidationsgrad von Stickoxiden aus Dieselfahrzeugen

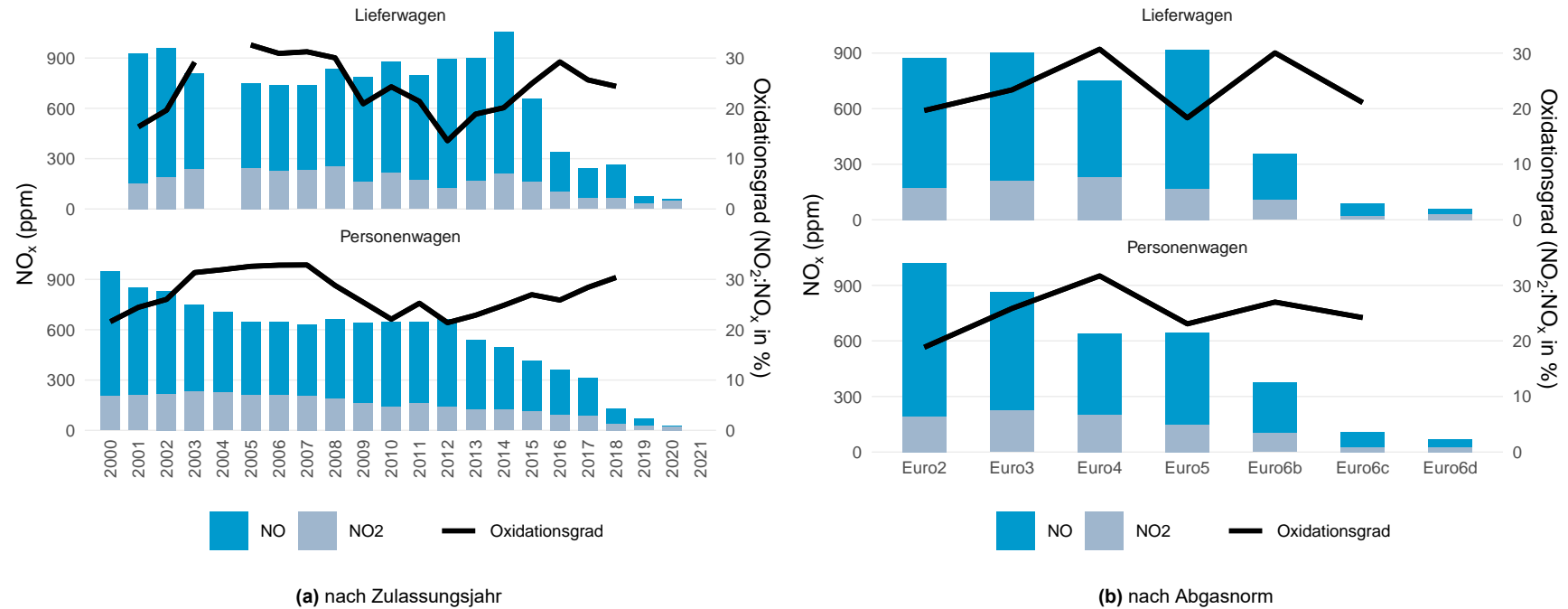


Abbildung 76: NO_x Stoffmengenanteile und Oxidationsgrad NO₂:NO_x im unverdünnten Diesel-Abgas, strukturiert nach Fahrzeugkategorie (Daten beruhen auf Messungen von NO und NO₂ mit dem RSD Modell 5000 oder jünger).



Literatur

1. Karl, T. *u. a.* Urban eddy covariance measurements reveal significant missing NO_x emissions in Central Europe. *Scientific Reports* **7**, 2536 (2017).
2. Mertens, M., Kerkweg, A., Grewe, V. & Jöckel, P. Impact of road traffic emissions on tropospheric ozone in Europe for present day and future scenarios. in **18**, EPSC2016–10100 (2016).
3. Rahman, M. M., Mazaheri, M., Clifford, S. & Morawska, L. Estimate of main local sources to ambient ultrafine particle number concentrations in an urban area. *Atmospheric Research* **194**, 178–189 (2017).
4. Rönkkö, T. *u. a.* Traffic is a major source of atmospheric nanocluster aerosol. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**, 7549–7554 (2017).
5. Hama, S. M. L., Cordell, R. L. & Monks, P. S. Quantifying primary and secondary source contributions to ultrafine particles in the UK urban background. *Atmospheric Environment* **166**, 62–78 (2017).
6. Comte, P. *u. a.* *GASOMEP: Current Status and New Concepts of Gasoline Vehicle Emission Control for Organic, Metallic and Particulate Non-Legislative Pollutants.* (Empa, 2017).
7. Zotter, P. *u. a.* Radiocarbon analysis of elemental and organic carbon in Switzerland during winter-smog episodes from 2008 to 2012 – Part 1: Source apportionment and spatial variability. *Atmospheric Chemistry and Physics* **14**, 13551–13570 (2014).
8. Karagulian, F. *u. a.* Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment* **120**, 475–483 (2015).
9. INFRAS/Meteotest. *Emissionskataster Schweiz 2015 - Treibhausgase und Luftschadstoffe.* (2021).
10. *Towards Cleaner Air. Scientific Assessment Report 2016. EMEP Steering Body and Working Group on Effects of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution.* (2016).
11. Felber-Dietrich, D. *Luftverschmutzung und Gesundheit. Übersicht zu den Auswirkungen.* Bundesamt für Umwelt. (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2014).
12. *Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.* (2016).

13. Beelen, R. *u. a.* Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *The Lancet* **383**, 785–795 (2014).
14. Rasche, M. *u. a.* Rapid increases in nitrogen oxides are associated with acute myocardial infarction: A case-crossover study. *European Journal of Preventive Cardiology* 204748731875580 (2018). doi:10.1177/2047487318755804
15. 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).
16. BAFU. *Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Ergebnisse des Überwachungssystems im Bereich Biodiversität, Stand 2016*. 60 (2017).
17. 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).
18. Inquiry into Emission Measurements in the Automotive Sector, C. of. *Report on the inquiry into emission measurements in the automotive sector (2016/2215(INI))*. (European Parliament, 2017).
19. 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).
20. Contag, M. *u. a.* How They Did It: An Analysis of Emission Defeat Devices in Modern Automobiles. in 231–250 (IEEE, 2017). doi:10.1109/SP.2017.66
21. Muncrief, R., German, J. & Schultz, J. *Defeat devices under the U.S. and EU passenger vehicle emissions testing regulations*. (ICCT, 2016).
22. Borken-Kleefeld, J. & Dallmann, T. *Remote sensing of motor vehicle exhaust emissions*. 40 (ICCT, 2018).
23. Keller, M., Hausberger, S., Matzer, C., Wüthrich, P. & Notter, B. *HBEFA Version 3.3 - Hintergrundbericht*. (INFRAS, 2017).
24. Sjödin, A. *u. a.* *Real-driving emissions from diesel passenger cars measured by remote sensing and as compared with PEMS and chassis dynamometer measurements - CONOX Task 2 report*. 41 (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).

25. Jenk, H. The CONOX project: Pooling, sharing and analyzing European remote sensing data. (2017).
26. Bernard, Y., Tietge, U., German, J. & Muncrief, R. *Determination of real-world emissions from passenger vehicles using remote sensing data.* (ICCT, 2018).
27. Dallmann, T., Bernard, Y., Tietge, U. & Muncrief, R. *Remote sensing of motor vehicle emissions in London.* (True Initiative, 2018).
28. Borken-Kleefeld, J. & Chen, Y. New emission deterioration rates for gasoline cars – Results from long-term measurements. *Atmospheric Environment* **101**, 58–64 (2015).
29. Chen, Y. & Borken-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).
30. Chen, Y. & Borken-Kleefeld, J. NO_x Emissions from Diesel Passenger Cars Worsen with Age. *Environmental Science & Technology* **50**, 3327–3332 (2016).
31. Chen, Y., Zhang, Y. & Borken-Kleefeld, J. When is Enough? Minimum Sample Sizes for On-Road Measurements of Car Emissions. *Environmental Science & Technology* acs.est.9b04123 (2019). doi:10.1021/acs.est.9b04123
32. Götsch, M., Alt, G.-M., Delb, V. & Sintermann, J. *RSD Messungen 2016 - Auswertung und Bericht.* 32 (2016).
33. Sintermann, J., Alt, G. M., Götsch, M., Baum, F. & Delb, V. *Langjährige Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing.* 86 (Kanton Zürich / Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2018).
34. Sintermann, J., Alt, G. M., Götsch, M., Baum, F. & Delb, V. *Langjährige Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing.* 88 (Kanton Zürich / Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2019).
35. Sintermann, J., Alt, G. M., Götsch, M., Baum, F. & Delb, V. *Langjährige Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing.* 88 (Kanton Zürich / Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2020).
36. 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).
37. Pavlovic, J., Ciuffo, B., Fontaras, G., Valverde, V. & Marotta, A. How much difference in type-approval CO₂ emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **111**, 136–147 (2018).

38. Zimmermeyer, G., Lüers, B. & Holderbaum, B. Der Weg zum sauberen Dieselmotor. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* **6**, 215–223 (2017).
39. 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).
40. Franco, V. u. a. Road vehicle emission factors development: A review. *Atmospheric Environment* **70**, 84–97 (2013).
41. 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).
42. Tietge, U., Bernard, Y., German, J. & Muncrief, R. *A comparison of light-duty vehicle NOx emissions measured by remote sensing in Zurich and Europe*. 29 (ICCT, 2019).
43. Dallmann, T., Bernard, Y., Tietge, U. & Muncrief, R. Remote sensing of motor vehicle emissions in Paris. 44 (2019).
44. Franco, V., Posada Sánchez, F., German, J. & Mock, P. Real-world exhaust emissions from modern diesel cars. *ICCT communications* **49**, 847129–102 (2014).
45. 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).
46. 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], 2013).
47. ICCT. *Road tested: Comparative overview of real-world versus type-approval NOx and CO2 emissions from diesel cars in Europe* International Council on Clean Transportation. (2017).
48. Keller, M., Wüthrich, P. & Notter, B. *Handbook emission factors for road transport 3.1 / 3.2 / 3.3 Quick reference*. (INFRAS, 2017).
49. Statistik, B. für. Strassenfahrzeuge – neue Inverkehrsetzungen. (2018).
50. ICCT. *European vehicle market statistics - Pocketbook 2017/18*. (2017).
51. Schmidt, C. W. Beyond a One-Time Scandal: Europe's Ongoing Diesel Pollution Problem. *Environmental Health Perspectives* **124**, A19–A22 (2016).
52. Dunmore, R. E. u. a. Diesel-related hydrocarbons can dominate gas phase reactive carbon in megacities. *Atmospheric Chemistry and Physics* **15**, 9983–9996 (2015).

53. 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).
54. OSTLUFT. *Luftqualität 2016*. (OSTLUFT - Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein, 2017).
55. ICCT. *Real-Driving Emissions Test Procedure for Exhaust Gas Pollutant Emissions of Cars and Light Commercial Vehicles in Europe*. (ICCT, 2017).
56. 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).
57. 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).
58. Ntziachristos, L., Papadimitriou, G., Ligterink, N. & Hausberger, S. Implications of diesel emissions control failures to emission factors and road transport NO_x evolution. *Atmospheric Environment* **141**, 542–551 (2016).
59. O’Driscoll, R. *u. a.* A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NO_x and primary NO₂ emissions from Euro 6 diesel passenger cars and comparison with COPERT emission factors. *Atmospheric Environment* **145**, 81–91 (2016).
60. Kraftfahrt-Bundesamt. Rückruf für VW Touareg 3.0 I Diesel Euro 6. (2017).
61. e.V., D. U. Ergebnisse unserer Abgasmessungen. *Deutsche Umwelthilfe e.V.* (2017).
62. e.V., D. U. Dieselgate erreicht BMW: Abgasmessungen bei einem BMW 320d zeigen klare Indizien für Abschalteinrichtungen. *Deutsche Umwelthilfe e.V.* (2017).
63. Suarez-Bertoa, R. & Astorga, C. Impact of cold temperature on Euro 6 passenger car emissions. *Environmental Pollution* **234**, 318–329 (2018).
64. Borken-Kleefeld, J., Bernard, Y., Carslaw, D. & Sjödin, A. *Contribution of vehicle remote sensing to in-service/real driving emissions monitoring - CONOX Task 3 report. 24* (IVL in cooperation with IIASA, University of York, University of Leeds, Kanton Zürich, Opus Remote Sensing Europe, ICCT, Opus Inspectio, 2018).
65. Zeitung, S. Der Diesel wird zum teuren Nischenprodukt. *sueddeutsche.de* (2017).
66. Jimenez-Palacios, J. L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge* (1998).

67. Schneidmesser, 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).
68. Anenberg, S. C. *u. a.* Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets. *Nature* **545**, 467 (2017).
69. 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).
70. 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).
71. 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).
72. 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).
73. Bade, S., Montanari, D. & Grüningen, S. von. *Die Kosten der Luftverschmutzung 2005 bis 2015*. 97 (Econcept im Auftrag von AWEL Kanton Zürich, UGZ Stadt Zürich, Fachstelle Umwelt Winterthur, 2018).
74. Raumentwicklung, B. für. *Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs in der Schweiz. Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr 2015*. 36 (Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2018).
75. Triantafyllopoulos, G., Katsaounis, D., Karamitros, D., Ntziachristos, L. & Samaras, Z. Experimental assessment of the potential to decrease diesel NO_x emissions beyond minimum requirements for Euro 6 Real Drive Emissions (RDE) compliance. *Science of The Total Environment* **618**, 1400–1407 (2018).
76. Bishop, G. A. & Stedman, D. H. Measuring the Emissions of Passing Cars. *Accounts of Chemical Research* **29**, 489–495 (1996).
77. 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).
78. Hausberger, S. *Fuel Consumption and Emissions of Modern Passenger Cars*. 24 (TU Graz, Institute for Internal Combustion Engines; Thermodynamics, 2010).

79. Leys, C., Klein, O., Dominicy, Y. & Ley, C. Detecting multivariate outliers: Use a robust variant of the Mahalanobis distance. *Journal of Experimental Social Psychology* **74**, 150–156 (2018).
80. Breiman, L. Random forests. *Machine learning* **45**, 5–32 (2001).
81. Ishwaran, H. & Kogalur, U. B. *Random Forests for Survival, Regression, and Classification (RF-SRC)*. (manual, 2018).
82. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. (R Foundation for Statistical Computing, 2019).
83. Ropkins, K., Hanley, S. & Munir, S. *The R package pems.utils: open-source processing, Visualization and Analysis Tools for Portable Emissions Measurement Systems data*. (2012).
84. Carslaw, D. C., Williams, M. L., Tate, J. E. & Beevers, S. D. The importance of high vehicle power for passenger car emissions. *Atmospheric Environment* **68**, 8–16 (2013).
85. Bishop, G. A. & Stedman, D. H. A Decade of On-road Emissions Measurements. *Environmental Science & Technology* **42**, 1651–1656 (2008).
86. Carslaw, D. C. & Rhys-Tyler, G. New insights from comprehensive on-road measurements of NO_x, NO₂ and NH₃ from vehicle emission remote sensing in London, UK. *Atmospheric Environment* **81**, 339–347 (2013).
87. Carslaw, D. C., Murrells, T. P., Andersson, J. & Keenan, M. Have vehicle emissions of primary NO₂ peaked? *Faraday Discussions* **189**, 439–454 (2016).
88. Ekström, M., Sjödin, Å. & Andreasson, K. Evaluation of the COPERT III emission model with on-road optical remote sensing measurements. *Atmospheric Environment* **38**, 6631–6641 (2004).
89. Sjödin, A. u. a. *On-Road Emission Performance of Late Model Diesel and Gasoline Vehicles as Measured by Remote Sensing*. 47 (IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017).
90. Bütler, T. *Pilotprojekt Vergleichsmessungen Remote Sensing - PEMS - Rollenprüfstand*. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. (Empa, 2016).
91. Bonnel, P., Carriero, M., Clairotte, M. & Giesaskiel, B. Assessment of RSD measurement performance against reference vehicles and PEMS emissions - Potential for Euro 6 in-service vehicle emissions screening. Based on EC JRC 2017 Testing Program. (2017).
92. INFRAS/Meteotest. *OSTLUFT: NO₂-Immissionen Ostschweiz / Liechtenstein*. (2012).