



INSTITUTE OF  
ENVIRONMENTAL  
PHYSICS



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



**Empa**

Materials Science and Technology

# **Remote RDE Messtechnik Validierung**

## **Abschlussbericht**

Stand: 29.10.19

**Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU**

## **Impressum**

**Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

### **Auftragnehmer:**

- Empa, Abteilung Fahrzeugantriebssysteme, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf
- Institut für Umweltphysik (IUP), Air Quality Measurement Technology (AQM-Tec), Uni-versität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 229, D-69120 Heidelberg
- Camion Pro International, Internationaler Berufsverband für die Transportbranche, Herten-steinstrasse 51, CH-6004 Luzern

### **Autor/Autorin:**

Dr. Denis Pöhler (IUP), Uli Roth (IUP), Thomas Bütler (Empa), Andreas Mossyrsch (Camion Pro)

**Begleitung BAFU:** Harald Jenk, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien

**Hinweis:** Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## **Zusammenfassung**

Die Abteilung Fahrzeugantriebssysteme der Empa hat zusammen mit dem Institut für Umweltphysik (IUP) der Universität Heidelberg eine Studie zur Untersuchung der Genauigkeit von LKW Stickoxid(NO<sub>x</sub>)-Emissionsmessungen durch das Plume-Chasing-Verfahren (Messung in der Abgasfahne) mit dem ICAD-NO<sub>x</sub>-Messinstrument vom IUP durchgeführt. NO<sub>x</sub>-Emissionen verschiedener LKW-Modelle (EURO II, V, VI) mit unterschiedlichen Emissionsverhalten wurden unter verschiedenen Fahrsituationen und Verkehrsdichten bestimmt. Ziel dieser Studie ist die Quantifizierung, ob sich diese Technik zur Bestimmung von Stickoxid-Emissionen, u.a für die Verwendung im Handbuch HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport), eignet und inwieweit die Messgenauigkeit ausreicht, um LKWs mit auffällig hohem Emissionsniveau verlässlich zu identifizieren.

Für die Validierung des Plume-Chasing-Verfahrens mit dem ICAD-NO<sub>x</sub> - Messinstrument wurde ein mobiles Emissionsmessgerät (engl. portable emissions measurement system, PEMS) durch die Empa eingesetzt, ein anerkanntes Verfahren, um Emissionen in realen Fahrsituationen zu bestimmen. Die Emissionen der verschiedenen LKWs wurden mit beiden Systemen gemessen und im Anschluss verglichen. Der Vergleich des EURO VI LKW musste aufgrund merkwürdigen PEMS Messdaten verworfen werden.

Die beiden Messverfahren zeigten eine gute Übereinstimmung. Das Plume-Chasing-Verfahren lieferte aussagekräftige NO<sub>x</sub>-Emissionen von niedrigen (<200mg/kWh) bis hohen (>10.000mg/kWh) Werten. Es bestimmt meist leicht geringere Emissionswerte als PEMS, vor allem beim EURO II LKW (-20%). Beste Übereinstimmungen wurden auf Landstraßen und Bergauffahrten erzielt (R=0,91 und 0,93) und leicht geringere auf Autobahnen (R=0,89). Gezielte Plume-Chasing-Messungen mit einem erhöhten Fahrabstand zum untersuchten LKW führen nicht zu einer wesentlichen Verschlechterung der Übereinstimmung der Emissionswerte, nur zu weniger verwendbaren Messwerten (weniger Messwerte in der Abgasfahne). Eine verlässliche Messung ist somit auch mit erhöhtem Sicherheitsabstand möglich. Eine

gesonderte Messung nahe am Auspuff (mit speziellem Plume-Chasing Aufbau) lieferte zwar eine sehr gute Übereinstimmung, zeigte sich jedoch bei der Durchführung als weniger praktikabel. Aus den Messdaten konnte außerdem abgeleitet werden, dass die Bestimmung eines verlässlichen mittleren NO<sub>x</sub>-Emissionswertes für z.B. den EURO V LKW eine Mittelung über 5 Min. erfordert. Eine kurze Emissionsmessung (wie bei Remote Sensing Emissionsmessungen) liefert somit keinen repräsentativen Emissionswert für ein einzelnes Fahrzeug.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der verwendete Plume-Chasing Aufbau NO<sub>x</sub>-Emissionswerte unter realen Fahrbedingungen verlässlich bestimmt und dies deutlich einfacher als mit PEMS. Die Genauigkeiten vom PEMS und Anforderungen der RDE Richtlinien werden jedoch nur begrenzt erreicht. Die Verwendung im Handbuch HBEFA ist somit nur mit geringerer Genauigkeit als für PEMS möglich. Prinzipiell lassen sich jedoch ad hoc Untersuchungen im fließenden Verkehr für reale Emissionsuntersuchungen oder zum Auffinden von hohen Emittlern relativ einfach umsetzen. So können z.B. auch manipulierte und defekte Abgasreinigungsanlagen verlässlich bestimmt werden.

## Summary

The department of Automotive Powertrain Technologies of the Empa collaborates with the Institute of Environmental Physics (IUP) of the University of Heidelberg, in a study where the accuracy of truck NO<sub>x</sub> emission measurements using the plume chasing technology (measurement in the emission plume) with the ICAD-NO<sub>x</sub> instrument from the IUP is investigated. NO<sub>x</sub> emissions of different truck models (EURO II, V, VI) with different emission level were investigated at different driving and traffic situations. The objective of this study is to evaluate whether the plume chasing technique can be used to determine nitrogen oxide emissions, i.e. for the use in the emission hand book HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport), and whether the precision is sufficient to identify trucks with conspicuously high emissions.

To validate the plume chasing method using the ICAD-NO<sub>x</sub> instrument, a *portable emissions measurement system* (PEMS) was operated by Empa. This is a well established system to derive real driving emissions. The emissions of the different trucks were measured with both techniques and compared afterwards. The comparison for the EURO VI truck was refused due to strange measurement value of the PEMS system.

Both measurement techniques show good agreement. The plume chasing technique derives valid NO<sub>x</sub> emissions from low (<200mg/kWh) up to high (>10.000mg/kWh) values. The derived plume chasing emission values are typically slightly lower than with PEMS, especially for the EURO II truck (-20%). Best agreement was achieved on country roads and uphill (R=0,91 and 0,93) and slightly lower on highways (R=0,89). Dedicated plume chasing measurements with an increased driving distance to the investigated truck did not lead to a significant reduction in the measurement agreement, just to less useable measurement values (less data in the emission plume). A reliable measurement is thus also possible with a larger safety distance. A special dedicated investigation with a modified setup measuring close to the exhaust pipe, derives very good agreement, but is less practical in the execution. From

the measurement data we also derive that a reliable average NO<sub>x</sub> emission value requires for i.e. a EURO V truck an averaging of over 5 minutes of emission measurements. That mean, that a short or snap shot emission measurement (like for remote sensing emission measurements) derives no reliable emission value of an individual truck.

This study show that the used plume chasing setup can derive reliable NO<sub>x</sub> emissions under real driving conditions and this much simpler than with PEMS. The accuracy of PEMS and requirements of the RDE regulation are only partly achieved. The use for HBEFA is thus only possible with lower accuracy than PEMS. However plume chasing could allow ad hoc investigations of real driving vehicle emissions in the moving traffic or to investigate high emitters easily. Thus for example reliable identification of manipulated or defective emission systems are possible.

# Inhaltsverzeichnis

1. Projektpartner.....	9
1.1. Empa.....	9
1.2. Institut für Umweltphysik (IUP).....	9
1.3. Camion Pro International.....	10
1.4. Im Auftrag für BAFU.....	10
2. Einleitung.....	11
3. Grundlagen.....	14
3.1. Stickoxidbildung.....	14
3.2. Fahrzeugemissionen.....	15
3.2.1. EURO-Normen.....	15
3.2.2. Abgasnachbehandlung.....	17
3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE).....	18
3.3.1. Portable Emission Measurement System (PEMS).....	18
3.3.2. Plume-Chasing (Abgasfahnenmessung).....	20
3.3.3. Berechnung der NO <sub>x</sub> LKW- Emissionen für Plume-Chasing-Messungen.....	21
3.4. ICAD-NO <sub>x</sub> -Messinstrument für Plume-Chasing-Verfahren.....	24
3.4.1. NO <sub>x</sub> -Messung.....	26
3.4.2. CO <sub>2</sub> -Messung.....	27
4. Messaufbau und Durchführung.....	28
4.1. Aufbau Plume-Chasing.....	28
4.1.1. Modifizierter Messaufbau mit seitlicher Messung.....	30
4.2. PEMS.....	32
4.3. Durchführung.....	34
4.3.1. Teststrecke.....	35
5. Datenauswertung Plume-Chasing.....	37
5.1. Anpassung der CO <sub>2</sub> -Zeitreihe.....	37
5.1.1. Zeitliche Verschiebung zwischen Plume-Chasing und PEMS.....	38
5.1.2. ICAD-Kalibration.....	38
5.1.3. NO-Konverter-Kalibration.....	38
5.2. Mittelungsintervalle.....	39
5.3. Qualitätsfaktor / Fehlerwert.....	40
5.4. Bestimmung Hintergrundkonzentration.....	41
5.4.1. Methode 1 Minimum im Intervall (M1).....	42
5.4.2. Methode 2 Hintergrundmessung/Minimum (M2).....	42
5.4.3. Methode 3 Manuelle Bearbeitung der Hintergrundmessung (M3).....	42
5.4.4. Beispielauswertung einer Runde.....	43
5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration.....	45
5.5.1. Vergleich der Emissionen.....	46
5.5.2. EURO V.....	47
5.5.3. EURO II.....	49

6. Datenauswertung PEMS.....	52
6.1. Kalibration.....	52
6.2. Zeitliche Korrektur der Emissionssignale (PEMS intern).....	52
6.3. Mittelungsintervalle.....	53
6.4. Auffälligkeiten.....	53
6.5. Fehleranalyse.....	54
7. Vergleich Rohdaten PEMS- und Plume-Chasing / Datenfilterung.....	58
7.1. EURO VI LKW.....	59
7.1.1. Zeitreihen.....	59
7.2. EURO V und EURO II LKW.....	63
7.2.1. EURO V und EURO II LKW Zeitreihen.....	64
7.2.2. Untersuchungen der Plume-Chasing-Messwerte.....	65
7.2.3. Untersuchungen Messwerte PEMS.....	69
7.2.4. Weitere Untersuchungen der Rohdaten-Zeitreihen.....	73
7.3. Einfluss verschiedener Mittelungsintervalle.....	73
8. Abschließender Vergleich PEMS - Plume-Chasing.....	77
8.1. Histogramm Abweichungen.....	80
8.2. Messzeitreihen.....	82
8.2.1. Zeitreihen EURO V LKW.....	82
8.2.2. Zeitreihen EURO II LKW.....	85
8.3. Vergleich nach Streckenabschnitt.....	88
8.3.1. Landstraße (sonstige).....	88
8.3.2. Landstraße (bergig).....	89
8.3.3. Landstraße (flach).....	91
8.3.4. Autobahn.....	92
8.3.5. Stadt (außerhalb der Untersuchung).....	92
8.3.6. Zusammenfassung Streckenabschnitte.....	94
8.4. Seitliche Messungen (nahe am Auspuff).....	94
8.5. Vergleich nach Fahrabstand.....	95
9. Analyse Messdauer für die Bestimmung von repräsentativen Emissionswerten.....	98
10. Schlussfolgerung.....	100
11. Ausblick.....	105
12. Literaturverzeichnis.....	108

# **1. Projektpartner**

## **1.1. Empa**

Thomas Büttler,  
Abteilung Fahrzeugantriebssysteme  
Leiter Forschungsgruppe Fahrzeugsysteme  
Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf  
Schweiz

Tel +41 (0)58 765 48 69 (Direkt)  
Tel +41 (0)58 765 11 11 (Zentrale)  
thomas.buetler@empa.ch  
www.empa.ch/abt504

## **1.2. Institut für Umweltphysik (IUP)**

Dr. Denis Pöhler  
(und Mitarbeiter Uli Roth)  
Air Quality Measurement Technology (AQM-Tec)  
Universität Heidelberg  
Im Neuenheimer Feld 229  
D-69120 Heidelberg

Tel +49 (0)6221 54 6334  
Mob +49 (0)176 2054718  
Fax +49 6221 546405  
denis.poehler@iup.uni-heidelberg.de  
[www.iup.uni-heidelberg.de/aqmtec](http://www.iup.uni-heidelberg.de/aqmtec)

### 1.3. Camion Pro International

#### **1.3. Camion Pro International**

Andreas Mossyrsch

Internationaler Berufsverband für die Transportbranche

Hertensteinstrasse 51

CH-6004 Luzern

Switzerland

Tel: +41 (0)71 440 0725

Fax: +41 (0)71 440 13 08

Homepage: [www.camionpro.eu](http://www.camionpro.eu)

E-Mail: [info@camionpro.eu](mailto:info@camionpro.eu)

#### **1.4. Im Auftrag für BAFU**

Eidgenössisches Departement für Umwelt,

Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Umwelt BAFU

Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien

Sektion Verkehr

Vertreten durch:

Harald Jenk

Stv. Sektionschef

Worblentalstrasse 68, CH-3063 Ittigen,

Postadresse: BAFU, CH-3003 Bern

Tel ++41 (0) 58 46 29350

Fax ++41 (0) 58 46 40137

[harald.jenk@bafu.admin.ch](mailto:harald.jenk@bafu.admin.ch)

<http://www.bafu.admin.ch/luft>

## 2. Einleitung

Bei Verbrennungsprozessen in Diesel- oder Ottomotoren entstehen neben anderen Emissionsprodukten auch Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), dies ist die Summe aus Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ).

Anfang 2017 konnte nachgewiesen werden, dass bei verschiedenen Lastwagen und Sattelschleppern das SCR (Selective Catalytic Reduction) Abgasreinigungssystem bei Fahrzeugen der Abgasstufen EURO V und EURO VI, zur Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen, ausgeschaltet wird. Ziel dieser durch die Fahrer und/oder Halter getätigten missbräuchlichen und strafbaren Massnahme ist die Einsparung vom Verbrauchsmittel Adblue oder das Vermeiden eines Austausches der SCR-Anlage nach gewissen Kilometerleistungen. Ohne dieses System emittiert jedoch das Fahrzeug ein Mehrfaches an Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) und erfüllt in keinem Fall mehr die Schadstoffkategorie gemäss seiner Typengenehmigung. Gemäss einer Studie des IUP sollen um die 20% der osteuropäischen Lastwagen auf deutschen Autobahnen von solchen Manipulationen betroffen sein (Pöhler und Adler, 2017). Eine Schwierigkeit ist, die manipulierten Fahrzeuge im Verkehr auf eine effiziente Weise zu identifizieren. Mit Hilfe dieser Studie soll untersucht werden, in wie weit die Messgenauigkeit der vom IUP verwendeten Methode ausreicht, schwere Nutzfahrzeuge mit auffällig hohem Emissionsniveau zu identifizieren.

Ziel dieser Arbeit ist es,  $\text{NO}_x$ -Emissionsmessungen an LKWs in realen Fahrsituationen durchzuführen und dabei zwei Messverfahren zu vergleichen. Das bisher verwendete und von der Europäischen Union (EU) anerkannte *Portable Emission Measurement System* (PEMS) misst die Emissionen durch einen Aufbau am zu untersuchenden Fahrzeug, bei dem die Abgase direkt aus dem Auspuff zum Messgerät umgeleitet werden. Das neue indirekte „Plume-Chasing“-Messverfahren (aus dem englischen: Abgasfahnenverfolgung; im Folgenden nur noch als Plume-Chasing bezeichnet; siehe Abschnitt 3.3.2) ermittelt die  $\text{NO}_x$ -Emissionen eines Fahrzeugs durch Messung der  $\text{NO}_x$ - und

## 2. Einleitung

CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Abgasfahne durch Hinterherfahren in einem Messfahrzeug. Die Emissionsmessung mittels Plume-Chasing benötigt im Gegensatz zum PEMS keinen langwierigen Aufbau am zu untersuchenden Fahrzeug. Im Vergleich zu anderen stationären Fernerkundungsmessverfahren (Remote Sensing) von Emissionen hat das Plume-Chasing-Verfahren den großen Vorteil, dass es durch die Hinterherfahrt hinter dem zu untersuchenden Fahrzeug eine Mittelung des Emissionswertes über einen längeren Zeitraum ermöglicht. Dies ist wichtig, da die Emissionen kurzzeitig stark schwanken und nur über einen Zeitraum von einigen Minuten verlässlich ein repräsentativer Emissionswert bestimmt werden kann (siehe Abschnitt 9). Erst nach längerer Messung lässt sich ein hoher Emittent z.B. durch eine manipulierte oder defekte Abgasreinigungsanlage eindeutig feststellen. Für das Plume-Chasing-Verfahren kam das neue ICAD-NO<sub>x</sub>-Messinstrument (Abschnitt 3.4) zum Einsatz. Verglichen wurden Emissionsmessungen an LKWs der EURO Normen II, V und VI bei verschiedenen Straßen- und Verkehrsbedingungen, um so möglichst alle realen Fahrsituationen abzubilden. Die Messungen erfolgten auf einer definierten Teststrecke in der Nähe von Heidelberg, die Landstraße (flach, bergig, sonstige) sowie Autobahn beinhaltet. Auf diese Weise wird festgestellt, bei welchen Straßen geringere oder größere Messfehler bei der Plume-Chasing Messung auftreten. Des Weiteren wird der Einfluss des Abstands bei der Plume-Chasing Messung sowie die zusätzliche seitliche Messung nahe am Auspuff (Abschnitt 4.1.1) bei Überholvorgängen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, welche Messbedingungen besonders verlässliche Emissionswerte liefern.

In Abschnitt 3 werden die Grundlagen erläutert, die relevant für die Plume-Chasing Messung von NO<sub>x</sub> mit einem ICAD-NO<sub>x</sub>-Messinstrument sind. Abschnitt 4 zeigt den Aufbau und die Durchführung der mobilen Messungen. Im darauf folgenden Abschnitt 5 wird auf das Auswerteverfahren der Plume-Chasing-Methode eingegangen, und Abschnitt 6 erläutert das Auswerteverfahren für die Messdaten des PEMS. Nach der Auswertung folgt in Abschnitt 7 ein erster vorläufiger Vergleich zwischen PEMS und Plume-

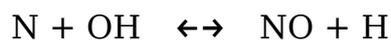
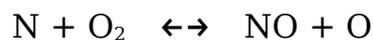
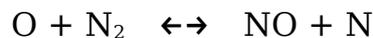
Chasing, bei dem es hauptsächlich um Fehleranalyse und Entwicklung sinnvoller Datenfilter geht. Daraus wird abgeleitet, dass die EURO VI LKW-Vergleichsmessungen nicht verwertbar waren. Im Abschnitt 8 ist der abschließende Vergleich der beiden Messverfahren dargestellt. In Abschnitt 10 erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Im Abschnitt 11 wird kurz auf eine außerhalb dieser Studie durchgeführte Vergleichsmessung eines EURO 6 PKW eingegangen, um zu demonstrieren, dass Plume-Chasing ebenfalls geringe Emissionswerte erfassen kann.

## 3. Grundlagen

Zu Beginn sollen in diesem Abschnitt die theoretischen Grundlagen erläutert werden, mit denen später die NO<sub>x</sub>-Emissionen gemessen werden. In Abschnitt 3.1 sind die chemischen Reaktionen der Stickoxidbildung bei Verbrennungsprozessen eingeführt. In Abschnitt 3.2 wird auf Fahrzeugemissionen und in Abschnitt 3.3 auf die verwendeten Messprinzipien für reale Fahrzeugemissionen eingegangen. Das verwendete ICAD-NO<sub>x</sub> - Messinstrument wird genauer in Abschnitt 3.4 erläutert.

### 3.1. Stickoxidbildung

Stickoxide entstehen bei Verbrennungsprozessen in Verbrennungsmotoren durch die Spaltung des atmosphärischen Stickstoffes über drei wesentliche Reaktionen. Der größte Anteil entsteht durch den *Zel'dovic-Zyklus* bei hohen Temperaturen, auch thermisches NO<sub>x</sub> genannt. [Zeldovich 1946] :



M ist ein beliebiger Stoßpartner, der für den Energieaustausch notwendig ist. Für diese Reaktionen werden hohe Aktivierungsenergien benötigt, wie sie zum Beispiel bei hohen Temperaturen in Verbrennungsmotoren auftreten. Da es in Verbrennungsmotoren zum raschen Abkühlen kommt, „friert“ der chemische Zustand mit NO ein.

Dieses NO kann mit Sauerstoff aus der Luft und ausreichender Aktivierungsenergie (hohe Temperaturen) weiter zu NO<sub>2</sub> reagieren. Der Anteil des umgewandelten NO<sub>2</sub> ist abhängig vom Sauerstoffüberschuss. Benzinmotoren sind nicht so problematisch wie Dieselmotoren, da diese stöchiometrisch ohne Sauerstoffüberschuss verbrennen.



Eine weitere  $\text{NO}_x$ -Quelle bilden Stickstoffverbindungen im Brennstoff, die zu  $\text{NO}_x$  oxidieren („fuel  $\text{NO}_x$ “) [Glarborg et al. 2003]. Des Weiteren kann  $\text{NO}_x$  durch die Reaktion mit Kohlenwasserstoffradikalen im Brennstoff entstehen, sogenanntes promptes  $\text{NO}_x$  [Fenimore, 1971; Wolfrum, 1972].

## 3.2. Fahrzeugemissionen

Fast alle LKWs auf europäischen Straßen sind mit Dieselantrieben ausgerüstet. Das bedeutet, dass sie neben Verbrennungsgasen auch  $\text{NO}_x$  emittieren, und somit zur Luftverschmutzung beitragen.

In Abschnitt 3.1 wird die Entstehung von  $\text{NO}_x$  in Kraftfahrzeugen beschrieben. Aber nicht alle Verbrennungsprozesse emittieren den gleichen Anteil an  $\text{NO}_x$ , denn je höher die Verbrennungstemperatur, umso größer die Bildung von  $\text{NO}_x$ . Auch ein leichter Sauerstoffüberschuss steigert die  $\text{NO}_x$ -Produktion, ein zu großer Überschuss senkt die Produktion wiederum ab. Da im Dieselmotor in beiden Punkten bessere Bedingungen für die Bildung von  $\text{NO}_x$  herrschen, sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen beim Dieselmotor höher als beim Benzinmotor.

In erster Näherung führt die Optimierung der Effizienz des Motors zu einer höheren  $\text{NO}_x$ -Produktion, zum Beispiel durch eine höhere Verbrennungstemperatur oder einen größeren Temperaturgradienten, der das Verbrennungsgas schneller abkühlen lässt. Auch ist die  $\text{NO}_x$ -Produktion abhängig von der geleisteten Arbeit, entsprechend ist die  $\text{NO}_x$ -Produktion eines LKWs deutlich höher als die eines PKWs. Man möchte aber nicht nur die  $\text{NO}_x$ - sondern auch die Feinstaub (PM-) und  $\text{CO}_2$ -Emissionen reduzieren, also muss man beim Motordesign einen Kompromiss zwischen Leistung, Kraftstoffverbrauch und Emissionen ( $\text{NO}_x$ , PM und  $\text{CO}_2$ ) finden. Allerdings reicht Motordesign alleine nicht aus, um aktuellen EURO Emissionsnormen zu entsprechen, daher muss eine zusätzliche Abgasnachbehandlung erfolgen.

### 3.2.1. EURO-Normen

In der EU werden Emissionsgrenzwerte in den als EURO Normen bekannten Verordnungen (zum Beispiel Verordnung 2007/46/EG) festgelegt. Dabei wird

### 3.2. Fahrzeugemissionen

auch das entsprechende Prüfverfahren definiert. Hierbei ist zu beachten, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen nur im Rahmen der Typenzulassung geprüft werden und nicht Teil einer periodischen Abgasuntersuchung sind.

<b>EURO-Norm (EN)</b>	<b>EN I</b>	<b>EN II</b>	<b>EN III</b>	<b>EN IV</b>	<b>EN V</b>	<b>EN VI</b>
Für Neufahrzeuge ab	01.01.92	01.10.96	01.10.00	01.10.05	01.10.08	01.01.13
Testzyklus	ESC	ESC	ETC	ETC	ETC	WHTC
NO <sub>x</sub> -Grenzwert [mg/kWh]	8000	7000	5000	3500	2000	400

*Tabelle 3.2.1: Übersicht der NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzwerte für Fahrzeuge ab 3,5t Gesamtgewicht entsprechend der EURO Norm.*

Die Emissionen werden für die Typenzulassung mit einem Testzyklus auf einem Prüfstand bestimmt, wodurch Vergleichbarkeit ermöglicht wird. Dabei ist jedoch nicht unbedingt die Realität widergespiegelt. Erst seit der Abgasnorm EURO VI ist mit dem *World Harmonized Transient Cycle* (WHTC) für schwere Nutzfahrzeuge eine Bestimmung realer Emissionen auf der Straße (*Real Driving Emissions*, RDE) Pflicht. Um die Emissionen unter realen Bedingungen zu messen, kommt ein PEMS zum Einsatz. Dabei werden die Abgase vom Auspuff direkt in das mobile PEMS geleitet und analysiert. Hinzu kommt ein Konformitätsfaktor von 1,5 für NO<sub>x</sub> gegenüber der EURO-Norm nach dem WHTC Zyklus auf dem Prüfstand, das heißt, die NO<sub>x</sub>-Emissionen dürfen bei der RDE Messung um den Faktor 1,5 über dem Grenzwert liegen. Für EURO VI anstelle von 400 mg/kWh also 600 mg/kWh.

Durch die Definition der Grenzwerte in mg/kWh für Kraftfahrzeuge über 3,5 t, erzielt man zwei wichtige Vorteile. Zum einen sollten die Emissionen je nach aktueller Motorleistung, beispielsweise Bergauffahrt (Vollast) oder Konstantfahrt (Halblast), kaum variieren. Zum anderen kann die geleistete Arbeit mit dem Plume-Chasing-Verfahren über die CO<sub>2</sub>-Emissionen recht genau bestimmt werden. Dies liegt daran, dass ein Liter Diesel eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub>-Emission verursacht und eine gewisse Energiemenge in kWh freisetzt. So kann der Emissionsgrenzwert in ein Emissionsverhältnis  $E_R = \text{NO}_x/\text{CO}_2$

umgerechnet werden. Dabei ist als einziges die Annahme des Motorwirkungsgrades nötig, in dieser Studie wird von 40 % ausgegangen. Ein geringerer Wirkungsgrad (wie er meist vorliegt) würde einen etwas höheren Emissionswert verursachen. Die Berechnung ist daher eher eine untere Abschätzung.

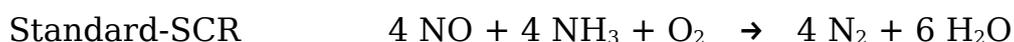
### 3.2.2. Abgasnachbehandlung

Um die Emissionen zu reduzieren wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Bei LKW-Dieselmotoren bis EURO IV und teilweise EURO V kommen häufig ausschließlich Abgasrückführungen (AGR, EGR) zum Einsatz.

In Kraftfahrzeugen der Klasse EURO V (2000 mg/kWh) und EURO VI (400 mg/kWh), kommt im Wesentlichen die *Selektive-Katalytische-Reduktion-Methode* (SCR) zum Einsatz (oft in Kombination mit AGR). Dabei wird eine Harnstoff-Wasser-Lösung, bekannt unter der Marke AdBlue® ((NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO), dem Abgas zugemischt. Dieses Verbrauchsmittel muss in einem zusätzlichen Tank mitgeführt werden. Bei Verwendung dieser Methode reagiert Ammoniak (NH<sub>3</sub>) im Katalysator mit NO<sub>x</sub> zu Wasser und elementarem Stickstoff. Dazu muss aus der Harnstoff Wasser-Lösung zunächst Ammoniak gebildet werden



Nun kann es im Katalysator zur Reduktion von NO<sub>x</sub> durch NH<sub>3</sub> kommen.



So können SCR-Systeme die NO<sub>x</sub>-Emissionen um über 90% reduzieren. Allerdings muss die AdBlue® Menge für die vorhandene NO<sub>x</sub>-Konzentration dosiert werden, da es sonst zu einer Emission von Ammoniak (Ammoniakschlupf) kommen kann. Deshalb wurde für die EURO VI Norm ein NH<sub>3</sub> Grenzwert von 10 ppm für LKWs eingeführt.

### 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

## 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

Wie in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, erfolgen  $\text{NO}_x$ -Emissionsmessungen für schwere Nutzfahrzeuge auf einem Motorprüfstand. Für Fahrzeuge der EURO Norm VI ist neuerdings aber auch eine RDE-Messung Pflicht. Diese wird mit einem mobilen Messsystem, einem sogenannten PEMS durchgeführt.

### 3.3.1. Portable Emission Measurement System (PEMS)

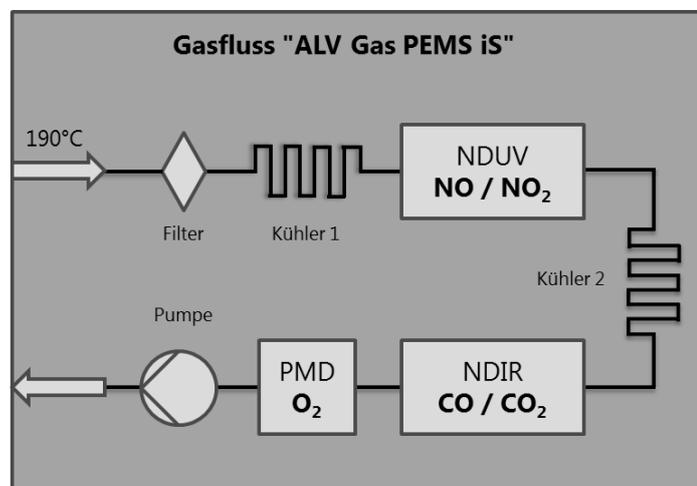


Abbildung 1 Schematischer Gasfluss im für diese Untersuchung eingesetzten AVL PEMS.

Ein PEMS ist ein relativ kleines Messsystem, welches zur mobilen Emissionsmessung von PKW und schweren Nutzfahrzeugen eingesetzt wird. Bei den schweren Nutzfahrzeugen gehören solche Messungen unter realen Fahrbedingungen seit der Emissionsstufe EURO VI zur Pflicht und bei den PKW entsprechend ab der Emissionsstufe EURO6d-temp. Bei den PKW müssen die Emissionswerte für Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Stickoxide ( $\text{NO}_x$ , gemessen als  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$ ) und die Partikelanzahl (PN) erfasst werden. Bei schweren Nutzfahrzeugen müssen zusätzlich auch die Kohlenwasserstoffemissionen (THC) gemessen werden. Um die Abgaszusammensetzung zu bestimmen wird ein Teil des Abgases (ca. 1-2 l/min) durch das Messsystem geleitet. Für die Bestimmung der

### 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

Konzentrationen gibt es verschiedene Messprinzipien die zur Anwendung kommen (NDIR, NDUV, FID, CLD).

Damit die gemessenen Konzentrationen in entsprechende Massemissionen in g/kWh oder in g/km berechnet werden können, muss auch der Abgasmassenstrom gemessen werden. Dies kann entweder direkt erfolgen, z.B. über ein sogenanntes Pitotflowmeter, oder indirekt über fahrzeugeigene Sensoren (Luftmassenmesser und Kraftstoffverbrauch). Um die zurückgelegte Fahrstrecke und das entsprechende Fahrprofil bewerten zu können, werden neben den Emissionsmesswerten auch Messwerte über die Umgebung gesammelt (GPS, Wetterstation).

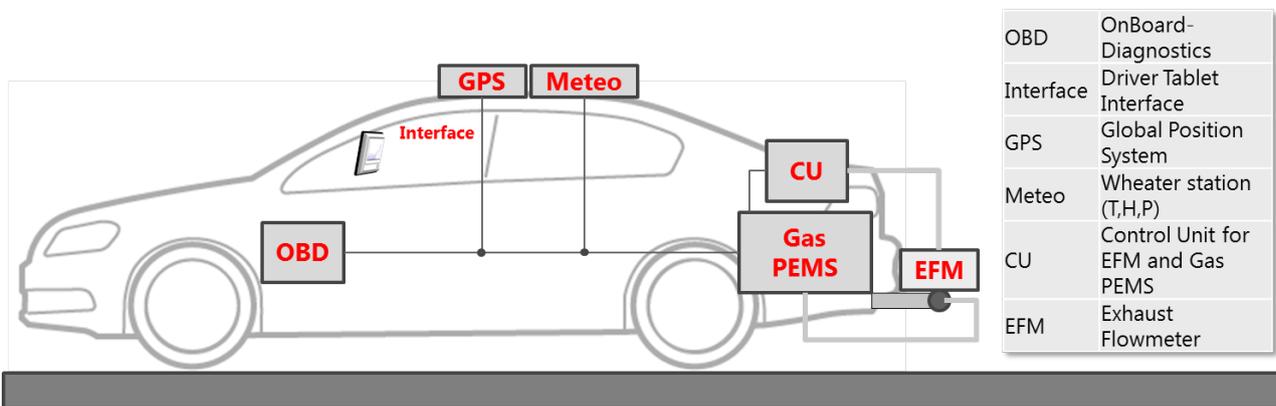


Abbildung 2 Schematischer Aufbau eines PEMS Systems für RDE Messungen mit einem PKW

Die im Handel verfügbaren PEMS-Geräte sind im Vergleich zu den am Prüfstand eingesetzten Messgeräten relativ klein. Durch die kompakten Aussenmasse werden aber auch Abstriche in der Messqualität in Kauf genommen. Um diesen Umstand zu berücksichtigen werden in den entsprechenden Regularien relativ grosszügige Messtoleranzen gewährt. Zusätzlich zu der Messtoleranz ist aber auch zu erwähnen, dass solche Messungen normalerweise lediglich zur Typenprüfung und zur Serienüberprüfung durchgeführt werden. Da der Fahrzeugaufbau eines solchen Messsystems aufwendig ist, ist eine Feldüberwachung einer grösseren Fahrzeugflotte, zum Beispiel im Rahmen einer periodischen Überprüfung oder einer Stichprobenkontrolle, mit einem solchen System kaum möglich.

### 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

#### 3.3.2. Plume-Chasing (Abgasfahnenmessung)

Alternativ zum PEMS können verschiedene Gas- und Partikelkonzentrationen in der Abgasfahne gemessen werden. Durch Hinterherfahren in einer Abgasfahne (Plume-Chasing-Methode; Abbildung 3), können durch die Messung relevanter Parameter, Rückschlüsse auf die Emissionen gezogen werden.

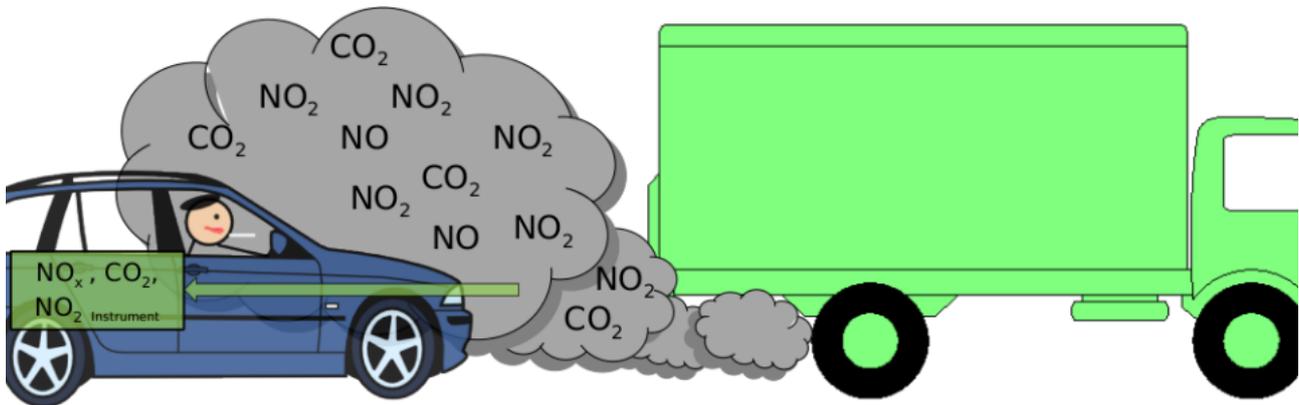


Abbildung 3 Prinzipbild Plume-Chasing

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges ICAD- $\text{NO}_x$ -Messinstrument verwendet, das eine mobile und schnelle Messung in der Abgasfahne für die Plume-Chasing-Methode erlaubt (siehe Abschnitt 3.4). Um aus den bestimmten  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen präzise Aussagen über die Emissionswerte in  $\text{mg/kWh}$  zu treffen, erfolgt zusätzlich die Messung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration. Dabei macht man sich zunutze, dass sich zum einen die  $\text{CO}_2$ -Emission von Diesel pro  $\text{kWh}$  relativ gut berechnen lässt, und zum anderen, dass sich das emittierte  $\text{CO}_2$  analog zum  $\text{NO}_x$  in der Abgasfahne verdünnt (es gibt keine Entmischung der Gase in der turbulenten Abgasfahne). Außerdem sind chemische Umwandlungs- und Abbauprozesse von  $\text{CO}_2$  und  $\text{NO}_x$  innerhalb der Zeit der Emission bis zur Messung zu vernachlässigen. Das Grundprinzip besteht also darin, in der Abgasfahne sowohl  $\text{NO}_x$  als auch  $\text{CO}_2$  gleichzeitig zu messen, dabei ist das Verhältnis  $R$  beider Gase unabhängig von Verdünnung und Ausbreitung in der Abgasfahne. Die Hintergrundkonzentrationen von  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}_2$  müssen jedoch beachtet werden, also die Konzentrationen die ohne

### 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

Abgasfahne in der Umgebungsluft vorliegen. Dazu müssen Hintergrundwerte bestimmt, und die Messung in der Abgasfahne entsprechend korrigiert werden.

$$R = \frac{E_{NO_x}}{E_{CO_2}} = \frac{\Delta C_{NO_x}}{\Delta C_{CO_2}} = \frac{C_{NO_x} - C_{NO_x, Hintergrund}}{C_{CO_2} - C_{CO_2, Hintergrund}}$$

Um zu verifizieren, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Messung auch wirklich in der Abgasfahne erfolgte und nicht ausschließlich die Hintergrundkonzentration gemessen wurde, werden die CO<sub>2</sub>-Messwerte herangezogen. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration muss um einen bestimmten Wert, beispielsweise 30 ppm, über der Hintergrundkonzentration liegen, damit ein Messwert als Messung in der Abgasfahne akzeptiert und als gültig eingestuft wird.

Im direkten Vergleich mit PEMS Messungen hat sich gezeigt, dass mit dem Plume-Chasing-Verfahren, vergleichbare Ergebnisse mit Abweichungen geringer als 120 mg/kWh an EURO 6 PKWs erreicht werden konnten [Krufczik, 2017]. Diese Abweichung liegt in der Größenordnung der Messfehler von den NO<sub>x</sub>-Instrumenten. Eine Herausforderung stellt die nötige Dauer der Messung: variiert die Abgasreinigung stark, muss über eine längere Strecke gemessen werden, um repräsentative Emissionswerte zu erhalten.

Mit GPS-Daten und Kamerabildern wurden zusätzliche Daten für die Auswertung bestimmt. So war es in der Auswertung möglich, starke Abweichungen genauer und mit Bezug auf die Verkehrssituation zu analysieren.

#### 3.3.3. Berechnung der NO<sub>x</sub> LKW- Emissionen für Plume-Chasing-Messungen

Das Emissionsverhältnis:

$$R = \frac{\Delta C_{NO_x}}{\Delta C_{CO_2}}$$

kann mit dem PEMS direkt am Auspuff oder dem Plume-Chasing-Verfahren, wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, bestimmt werden. Berücksichtigt werden muss dabei nur, dass sich in der Regel die Messung

### 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

von NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> auf Mischungsverhältnisse (ppb, ppm, %) bezieht und daher noch mit einem Umrechnungsfaktor für das Emissionsverhältnis (Bezug zur Masse) berechnet werden muss. Das gemessene Konzentrationsverhältnis kann direkt mit denen bei der Emissionen gleichgesetzt werden.

$$R' = k' \cdot R = k' \cdot \frac{\Delta c_{NO_x}}{\Delta c_{CO_2}} = \frac{\Delta c_{NO_x} [g/m^3]}{\Delta c_{CO_2} [g/m^3]} = \frac{E_{NO_x}}{E_{CO_2}}$$

Das bestimmte Verhältnis vom Plume-Chasing kann mit dem vom PEMS verglichen werden. Die Berechnung der Emission erfolgt beim PEMS in der Regel durch die zusätzliche Messung des Volumenstroms, sie kann aber auch direkt aus dem Verhältnis ermittelt werden, wie es vor allem beim Plume-Chasing oder anderen indirekten Verfahren wie Remote Sensing angewendet wird.

Bei den hier durchgeführten Messungen werden die NO<sub>x</sub>- und CO<sub>2</sub>- Zeitreihen automatisch ausgewertet, um die NO<sub>x</sub>-Emission der LKWs zu berechnen. Zur Bestimmung der tatsächlichen NO<sub>x</sub>-Emission wird der Quotient  $R$  berechnet, der unter Berücksichtigung der Hintergrundkonzentrationen aus NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> bestimmt wird. Dazu wurden über eine Leitung am Dach Hintergrundmessungen aufgenommen (siehe Abbildung 6), sodass später automatisch oder manuell jedem Messwert in der Abgasfahne ein Hintergrundwert zugewiesen werden konnte (siehe Abschnitt 5.4). Im Anschluss wurde das NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis  $R$  gebildet, wobei NO<sub>x</sub> in den Einheiten ppb und CO<sub>2</sub> in ppm gemessen wurde. Dieser Quotient wurde nun noch mit dem Faktor

$$u = 651,9 \frac{\text{mg} \cdot \text{ppm}}{\text{ppb} \cdot \text{kWh}}$$

multipliziert, um die NO<sub>x</sub>-Emission  $E_{NO_x}$  in mg/kWh zu erhalten.

Dieser Faktor ergibt sich aus folgenden Rechenschritten: Der Zusammenhang zwischen verbrauchtem Diesel und ausgestoßener CO<sub>2</sub>-Menge ist durch

$$E_{CO_2, \text{proL}} = 2,64 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2)}{\text{l}} \quad \text{gegeben. Mit dem Brennwert} \quad BW_{\text{Diesel}} = 12,6 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}},$$

### 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

dem pauschal angenommenen maximalen Wirkungsgrad der Dieselmotoren von  $\mu=40\%$  und der Dichte von Diesel  $\rho_{\text{Diesel}}=0,84 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$ , kann nun aus den Werten der  $\text{CO}_2$ -Emission des Fahrzeugs die aufgewandte Energie in kWh berechnet werden.

$$E_{\text{CO}_2} = \frac{E_{\text{CO}_2, \text{pro L}}}{\mu \cdot BW_{\text{Diesel}} \cdot \rho_{\text{Diesel}}}$$

$$E_{\text{CO}_2} = 0,642 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

Die gemessene  $\Delta c_{\text{NO}_x}$  und  $\Delta c_{\text{CO}_2}$  Konzentration ist als Teilchenverhältnis in „parts per billion“ (ppb) bzw. „parts per million“ (ppm) gegeben. Dies muss mit Hilfe der idealen Gasgleichung bei einer Temperatur  $T=20^\circ\text{C}$  und Außendruck  $p=1013,25 \text{ hPa}$  der Umgebungsluft, in eine Massendichte umgerechnet werden. Für ein Mol Gas ergibt sich das Volumen:

$V_{\text{mol}} = 24,055 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$ . Die molare Masse von  $\text{NO}_x$  bezieht sich laut

Definition auf die molare Masse von  $\text{NO}_2$  und ist  $M_{\text{mol}, \text{NO}_x} = 46,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ . Von

$\text{CO}_2$  ist diese  $M_{\text{mol}, \text{CO}_2} = 44,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ .

Daraus ergibt sich, dass 1ppb  $\text{NO}_x$  (bei Raumtemperatur)

$$k_{\text{NO}_x} = \frac{M_{\text{mol}, \text{NO}_x}}{V_{\text{mol}}} \cdot 10^{-9} \text{ ppb} \quad \text{entsprechen und} \quad 1 \text{ ppm } \text{CO}_2 \quad k_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{mol}, \text{CO}_2}}{V_{\text{mol}}} \cdot 10^{-6} \text{ ppm}$$

entspricht. Der Umrechnungsfaktor  $k'$  ergibt sich dann zu:

$$k' = \frac{k_{\text{NO}_x}}{k_{\text{CO}_2}} = \frac{M_{\text{mol}, \text{NO}_x}}{M_{\text{mol}, \text{CO}_2}} = 1,045$$

Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen werden aus dem Verhältnis  $R$  berechnet, wobei das gemessene Konzentrationsverhältnis (bestimmt aus Konzentrationen in

### 3.3. Verwendete Messprinzipien der Realen Fahrzeugemissionsbestimmung (RDE)

Massenverhältnissen) mit dem Faktor  $k' = \frac{k_{NO_x}}{k_{CO_2}}$  umgerechnet werden, da die Emission ebenfalls in Massen [mg/kWh] definiert sind. Analog können auch die Konzentrationen von NO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> einzeln von Mischungsverhältnissen in Massendichten umgerechnet werden. Entsprechend ergibt sich für die Emission:

$$E_{NO_x} = R \cdot k' \cdot E_{CO_2} = R \cdot \frac{k_{NO_x}}{k_{CO_2}} \cdot \frac{E_{CO_2,proL}}{\mu \cdot BW_{Diesel} \cdot \rho_{Diesel}}$$

$$E_{NO_x} = R \cdot \frac{M_{mol,NO_x}}{M_{mol,CO_2}} \cdot \frac{ppm \cdot 10^{-3}}{ppb} \cdot \frac{E_{CO_2,proL}}{\mu \cdot BW_{Diesel} \cdot \rho_{Diesel}}$$

$$E_{NO_x} \left[ \frac{kg}{kWh} \right] = R \cdot 0,00065185 \cdot \frac{ppm \cdot kg}{ppb \cdot kWh}$$

$$E_{NO_x} \left[ \frac{mg}{kWh} \right] = R \cdot 651,9 \cdot \frac{ppm \cdot mg}{ppb \cdot kWh}$$

$$E_{NO_x} \left[ \frac{mg}{kWh} \right] = R \cdot 651,9 \cdot \frac{ppm \cdot mg}{ppb \cdot kWh}$$

$$E_{NO_x} \left[ \frac{mg}{kWh} \right] = \frac{\Delta c_{NO_x} [ppb]}{\Delta c_{CO_2} [ppm]} \cdot 651,9 \cdot \frac{ppm \cdot mg}{ppb \cdot kWh}$$

$$E_{NO_x} \left[ \frac{mg}{kWh} \right] = \frac{\Delta c_{NO_x} [ppm]}{\Delta c_{CO_2} [\%]} \cdot 65,19 \cdot \frac{\% \cdot mg}{ppm \cdot kWh}$$

Der so errechnete NO<sub>x</sub>-Emissionswert kann mit der EURO Abgasnorm verglichen werden.

### 3.4. ICAD-NO<sub>x</sub>-Messinstrument für Plume-Chasing-Verfahren

Das ICAD (Iterative Cavity Enhanced DOAS; DOAS: Differentielle Optische Absorptionsspektroskopie)-Messinstrument bestimmt NO<sub>2</sub>-Konzentrationen durch spektrale Absorption (Patentanmeldung EP 15 179 088.8). Es ist ein an

### 3.4. ICAD-NO<sub>x</sub>-Messinstrument für Plume-Chasing-Verfahren

der Universität Heidelberg entwickeltes und gebautes Messsystem (weitere Informationen zum ICAD können beim Spin-off [www.airyx.de](http://www.airyx.de) gefunden werden). Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 4, und das zur Untersuchung verwendete Gerät in Abbildung 5 dargestellt. Um die Stickstoffkonzentration einer Luftprobe zu bestimmen, wird diese durch eine Pumpe in die Messzelle des Messgerätes gesaugt. Da in der Messzelle nur die NO<sub>2</sub>-Konzentration bestimmt werden kann, wird zur Bestimmung des gesamten NO<sub>x</sub> mit Hilfe eines Konverters NO zu NO<sub>2</sub> umgewandelt (siehe Abschnitt 3.4.1). In der Messzelle wird die Luft von einer blauen Hochleistungs-LED durchleuchtet. Das NO<sub>2</sub> in der Luft absorbiert elektromagnetischen Strahlung, woraus eine wellenlängenabhängigen Intensitätsänderung im gemessenen Spektrum resultiert. Aus diesem Absorptionsspektrum lässt sich die NO<sub>2</sub>-Konzentration bestimmen. Da jeder Stoff ein für ihn einzigartiges Absorptionsspektrum aufweist, ist sichergestellt, dass andere in der Luft vorhandene Stoffe den NO<sub>2</sub>-Messwert nicht beeinflussen können.

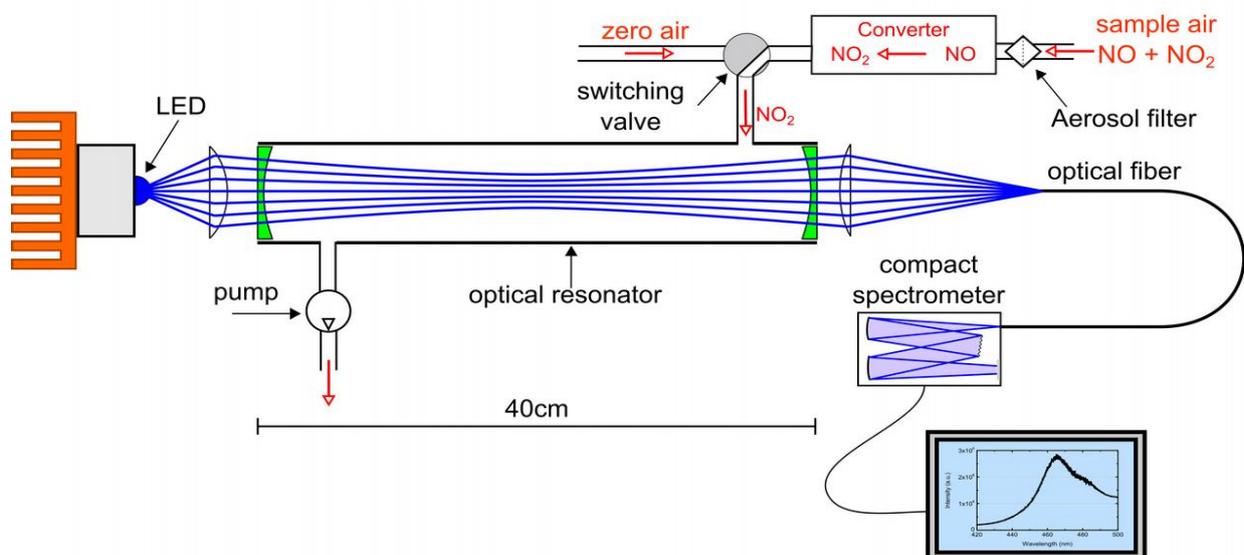
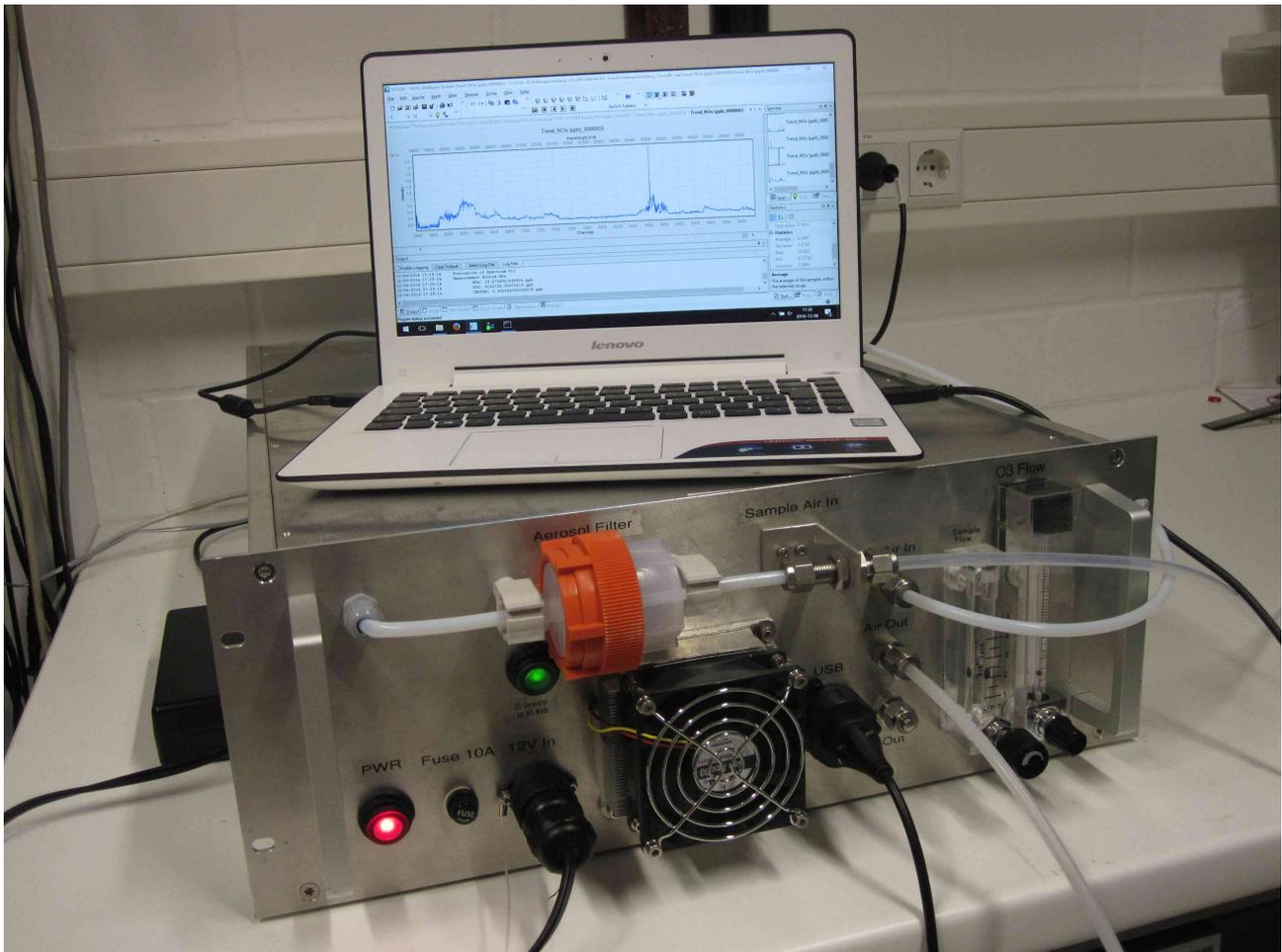


Abbildung 4: Messprinzip des verwendeten ICAD-NO<sub>x</sub> Systems.

Die Genauigkeit des Messgerätes ist abhängig von der Länge des Lichtweges. Damit ein möglichst langer Lichtweg erreicht wird, sind an den Enden der Messzelle hochreflektive Spiegel angebracht (Cavity Enhanced). Das Licht wird vielfach reflektiert, und legt dabei eine Strecke von über 1000 m zurück,

### 3.4. ICAD-NO<sub>x</sub>-Messinstrument für Plume-Chasing-Verfahren

was zu einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,5$  ppb führt. Statt sich auf die absoluten Messintensitäten zu beziehen, basiert das ICAD-Verfahren für die Bestimmung der Konzentration auf den charakteristischen NO<sub>2</sub>-Absorptionsbanden. Dadurch ist es unempfindlich gegenüber Intensitätsschwankungen und es ist bestens für mobile Anwendungen geeignet.



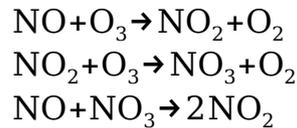
*Abbildung 5: Bild des ICAD-NO<sub>x</sub> Instrumentes verwendet für Plume-Chasing-Messungen in dieser Studie.*

#### 3.4.1. NO<sub>x</sub>-Messung

Mit der im ICAD-Messgerät verbauten LED kann nur NO<sub>2</sub> gemessen werden. Da NO mit O<sub>3</sub> zu NO<sub>2</sub> reagiert, kann mit der richtigen O<sub>3</sub>-Konzentration und genügender Reaktionszeit, das gesamte NO zu NO<sub>2</sub> umgewandelt werden. Auf diese Weise erlaubt eine NO<sub>2</sub>-Messung die Bestimmung der NO<sub>x</sub>-Konzentration. Ozonhaltige Luft (ohne Stickoxidverunreinigungen) wird

### 3.4. ICAD-NO<sub>x</sub>-Messinstrument für Plume-Chasing-Verfahren

in einem eigens entwickelten Generator erzeugt (Patentanmeldung DE102015000423) und mit dem Probengas vermischt. Über einen drei Meter langen Schlauch können folgende Reaktionen stattfinden, die das NO in NO<sub>2</sub> umzuwandeln.



#### 3.4.2. CO<sub>2</sub>-Messung

Für die CO<sub>2</sub>-Messung wurde ein modifizierter Sensor K30-FR CO<sub>2</sub> von SenseAir eingesetzt. Er wurde so modifiziert, dass er die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Probeluft, die durch die Messzelle geleitet wird, direkt bestimmt, und somit eine kurze Ansprechzeit von unter 2 Sekunden erreicht. Der Sensor nutzt die Infrarot- (IR-) Absorption von CO<sub>2</sub> zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die Messluft wird mit einem Aerosolfilter gereinigt, Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Messluft werden bestimmt und die Messwerte entsprechend zur Verbesserung der Messgenauigkeit korrigiert. Außerdem wird der Sensor auf einer konstanten Temperatur gehalten. Die Messdaten des CO<sub>2</sub>-Sensors werden analog zu den Zeitintervallen des NO<sub>x</sub>-Messverfahrens gemittelt, wodurch insgesamt eine Messgenauigkeit von ±2 ppm der CO<sub>2</sub>-Messung erreicht wird.

Vor der Messreihe wurde der CO<sub>2</sub>-Sensor mit Kalibrationsgasen von 0, 500, 1000 und 1500 ppm kalibriert.

## 4. Messaufbau und Durchführung

In diesem Abschnitt wird der Aufbau zur Bestimmung der Emissionen mit dem Plume-Chasing-Verfahren (Abschnitt 4.1) und dem PEMS (Abschnitt 4.2) dieser Studie beschrieben. Nähere Ausführungen zu den untersuchten LKWs finden sich in Abschnitt 4.3 und Erläuterungen zur Teststrecke in Abschnitt 4.3.1.

### 4.1. Aufbau Plume-Chasing

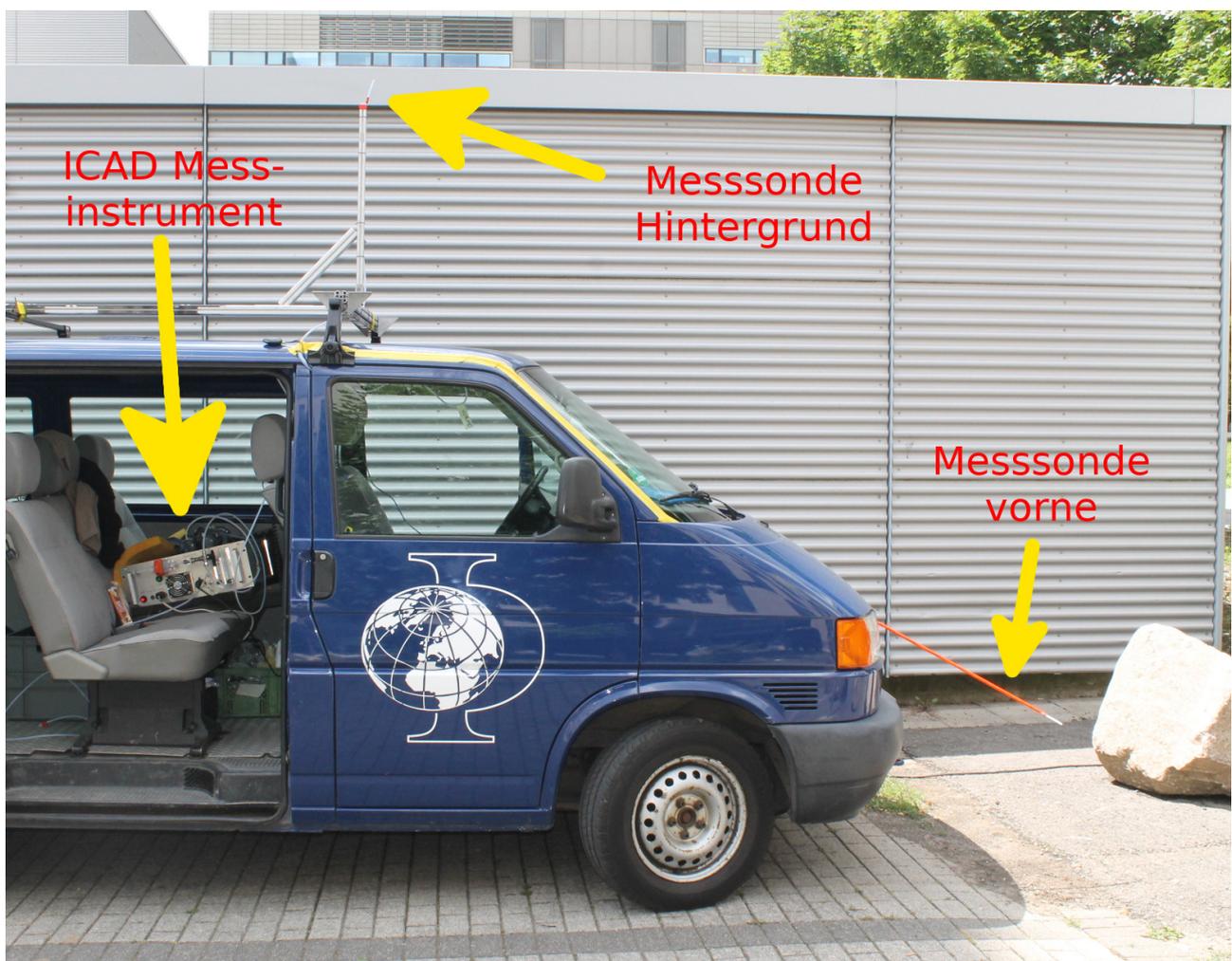


Abbildung 6: Fahrzeug mit Messaufbau.

#### 4.1. Aufbau Plume-Chasing

Abbildung 6 zeigt den Aufbau am Fahrzeug der Universität Heidelberg. Auf der Rückbank wurde das ICAD-Messgerät befestigt. Zur Messung der LKW-Abgasfahne führte von dem Messgerät ein *Polytetrafluoroethylen* (PTFE)-Schlauch durch den Motorraum nach vorne zur vorderen Messsonde (im orangenen Aluminiumrohr). Eine Messsonde auf dem Dach (ca. 2,6m Höhe) ermöglichte Referenzmessungen (Hintergrundmessungen) außerhalb der Abgasfahne. Ein Schalter im Fahrzeuginnenraum erlaubte den Wechsel zwischen Abgasfahnen- und Hintergrundmessung.

Das ICAD-Messgerät war über ein USB-Kabel mit einem Laptop verbunden, der eine annähernd sofortige (ca. 12 Sekunden Verzögerung) Auswertung ermöglichte. Die Verzögerung entstand hauptsächlich durch das Ansaugen über den Schlauch und den Luftaustausch in der Messzelle. Anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentration konnte auch bei niedrigem NO<sub>x</sub>-Ausstoß überprüft werden, ob in der Abgasfahne gemessen wurde. Wenn das nicht der Fall war, wurde die Fahrposition der Lage des Auspuffs angepasst, beispielsweise durch versetztes Fahren.

Zu jedem Messwert wurden die GPS-Daten gespeichert, und alle fünf Sekunden wurden über eine Dashcam Fotos aufgenommen, um äußere Veränderungen, wie den Wechsel von Stadtverkehr zur Landstraße oder überholende Fahrzeuge, die einen Peak verursachen können, besser nachzuvollziehen zu können.

In Abbildung 7 ist das Messfahrzeug, das die Abgasfahne eines LKWs untersucht, zu sehen.

## 4.1. Aufbau Plume-Chasing

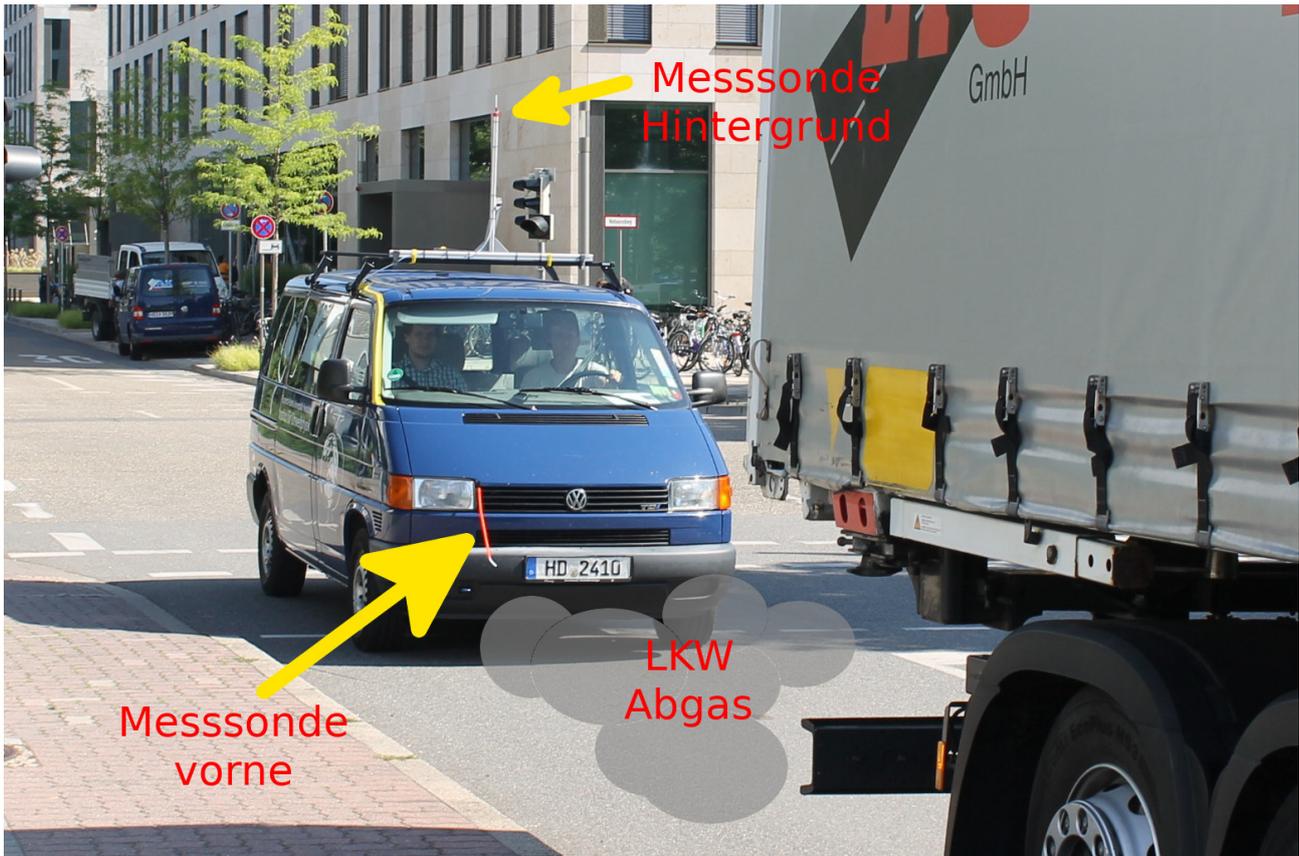


Abbildung 7: Plume-Chasing Messung hinter einem LKW.

### 4.1.1. Modifizierter Messaufbau mit seitlicher Messung

Neben der Standardmesssonde vorne am Plume-Chasing-Messfahrzeug wurden auch Untersuchungen mit einer seitlichen Messsonde rechts vom Messfahrzeug (siehe Abbildung 8 und 9) durchgeführt. Dies ermöglicht beim Überholen bzw. Vorbeifahren auf der zweiten Fahrspur dichter am Auspuff zu messen. In der Studie wurde eine manuelle ausklappbare Messlanze getestet, die ca. 1 m zur Seite heraus ragte. Die Messungen erfolgten beim EURO V LKW, da sich bei diesem der Auspuff links befand. Bei dem in dieser Studie verwendeten EURO VI LKW befand sich der Auspuff rechts, weshalb keine seitlichen Messungen durchgeführt werden konnten.

Da bei hohem Verkehrsaufkommen eine seitliche Messung schwierig ist, wurde diese Messreihe abends durchgeführt. Je nach Verkehrssituation und Straße konnte sie dennoch nur in einzelnen Abschnitten erfolgen. Die

#### 4.1. Aufbau Plume-Chasing

seitlichen Messungen waren eine technische und praktische Herausforderung, weil sowohl die Mechanik erst ausgefahren werden musste, und dann beim seitlichen Fahren ein möglichst geringer Abstand auf gleicher Höhe zum LKW zu halten war.

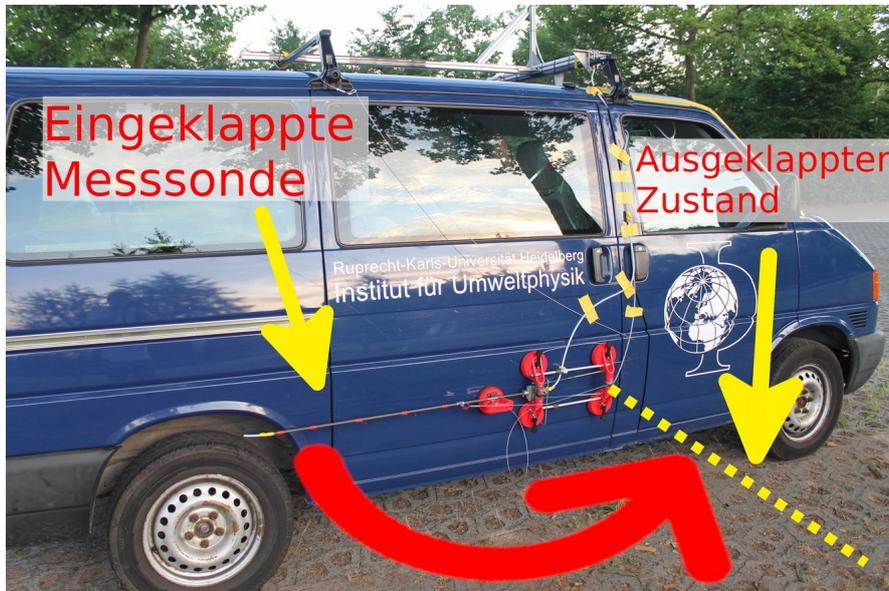


Abbildung 8: Messaufbau für seitliche Messungen

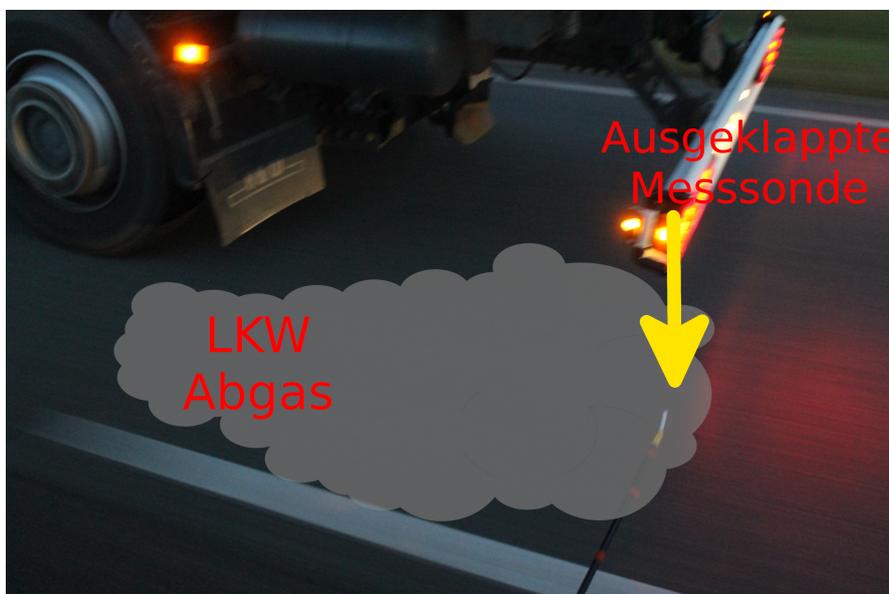


Abbildung 9: Messung mit seitliche Messlanze bei der Messfahrt am EURO V LKW

## 4.2.PEMS

### 4.2.PEMS

Zur Bestimmung der Referenzemissionswerte wurden die gemessenen Fahrzeuge mit dem PEMS der Empa (AVL M.O.V.E Gas PEMS iS) ausgerüstet. Das System wurde für die Fahrzeuge mit Wechselbrücke auf der Brücke aufgebaut, beim EURO II Fahrzeug direkt auf der Ladebrücke. Die Rohgasprobenahme erfolgte durch eine beheizte Leitung mit einer Messsonde, die direkt im Endrohr der Abgasanlage positioniert war. Da die Installation eines Abgasmassenstrommessgeräts (EFM) mit wechselnden Fahrzeugen aufwändig ist und durch die Installation eines EFM die Charakteristik der Abgasfahne verändern würde, erfolgte ein vereinfachter Messaufbau bei dem auf die Installation eines EFM verzichtet wurde.

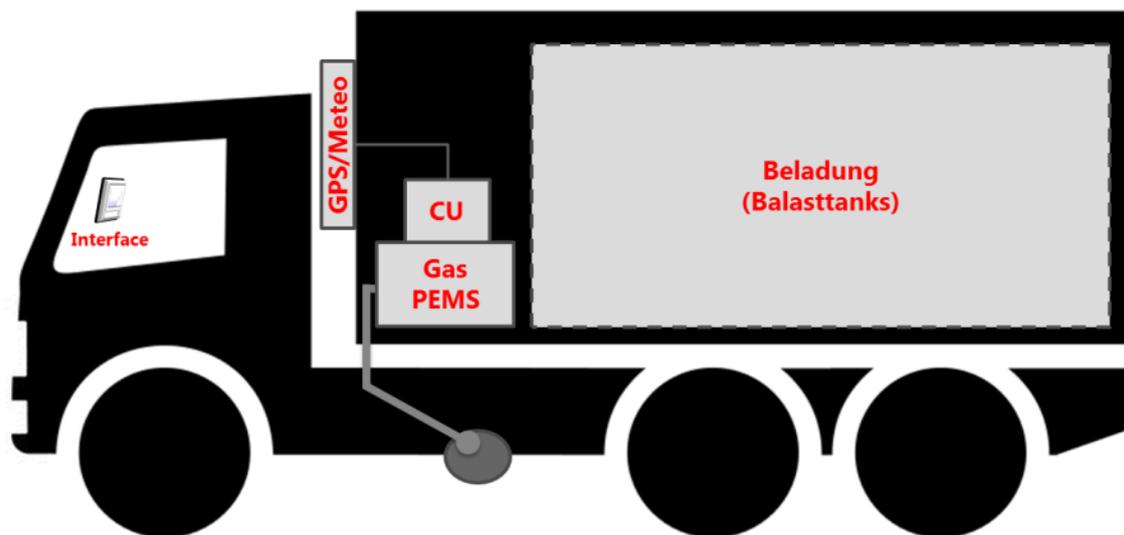


Abbildung 10: Schematischer Messaufbau des PEMS auf der Wechselbrücke mit den Ballasttanks.

Um trotzdem eine Bestimmung der absoluten Massemissionen (mg/kWh) machen zu können, wurde der teilweise verschlüsselte Antriebs-CAN mitgemessen, um später die entsprechenden Massenstrominformationen aus diesen Mitschnitten der Antriebsbotschaften extrahieren zu können. Leider hat sich herausgestellt, dass auf den unverschlüsselten Kanälen die benötigten Informationen (Luftmassenstrom, Abgasmassenstrom) nicht vorhanden waren. Aus den verschlüsselten Kanälen konnten leider keine

weiteren Informationen gewonnen werden. Daher wurde in den kommenden Auswertungen hauptsächlich die Konzentrationsverhältnisse von  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  herangezogen.



*Abbildung 11: Schematischer Messaufbau des PEMS auf der Wechselbrücke mit den Ballasttanks*

#### 4.3. Durchführung

### 4.3. Durchführung

Für die Durchführung wurden in 13 Runden drei verschiedene LKWs der EURO Normen II, V und VI gemessen. Um möglichst unter realen Bedingungen zu messen, wurden die Fahrzeuge mit Last beladen (vgl. Tabelle 4.3.2).

Messfahrt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
EURO Norm	VI	VI	VI	VI	VI	VI	V	V	V	V	II	II	II

*Tabelle 4.3.1: EURO Norm nach Runde*

	<b>EURO VI</b>	<b>EURO V</b>	<b>EURO II</b>
Hersteller	Mercedes Benz	Mercedes Benz	Volvo
Typ	Actros 2543	Actros 2544	FLC intercooler
NO <sub>x</sub> - Abgasreinigung	SCR	SCR	-
Baujahr	2016	2010	1999
Kilometerstand	94.181	572.155	305.170
Zul. Gesamtgewicht	25 t	25 t	7,49 t
PS	440	440	136
LKW/BDF	Wechselbrückenaufbau		Plane/Spiegel 7,45m (mit Hebebühne)
Beladung	ca. 7,0 t (Wechselbrücke Plane/Spiegel 7,45 m Leergewicht ca. 1,45 t, mit 5,25 t Ballasttank (5x1000 l), PEMS 0,25 t)		ca. 2,4 t (Ballasttank 2,1 t + PEMS 0,25 t)
HU	02.2019	08.2017	07.2017
AKZ	KH-TG 423	KH-MB 712	SIM-MT 76

*Tabelle 4.3.2: LKW Kenndaten*

Dabei wurde in Messfahrt 5, 9 und 12 mit erhöhtem Abstand (30-40m), statt den sonst verwendeten geringen Abstand (15-25m) zum jeweils zu untersuchenden LKW gemessen, um die Genauigkeit der Plume-Chasing-Messung bei Einhaltung des erhöhten Sicherheitsabstandes zu untersuchen.

### 4.3.1. Teststrecke

Damit die Testreihen möglichst reale Bedingungen widerspiegeln, wurden folgende verschiedene Fahrsituationen untersucht:

- wenig befahrene Landstraßen
- ebene Landstraße
- bergige Landstraße
- Autobahn eben bei möglichst konstanter Motorlast
- Autobahn bergig mit Steigungen und variierender Motorlast

Auf Landstraßen, bei entsprechender Streckenauswahl und vergleichsweise geringem Verkehrsaufkommen wird das Risiko von Störfaktoren durch andere Verkehrsteilnehmer reduziert. Diese Fahrsituation sollte die stabilsten Messergebnisse (beste Übereinstimmung der Messsysteme) liefern. Hierzu wurde sowohl ein ebenes wie auch ein bergiges Stück Landstraße in die Teststrecke eingebunden. Weitere Messwerte für sonstige Landstraßen konnten bei Hin- und Rückfahrt zur Teststrecke sowie bei durch Stau oder ähnliches bedingten Umwegen gemessen werden.

Auf Autobahnen wird die höchste Last erreicht, allerdings treten hier vermehrt Störfaktoren auf, beispielsweise durch andere Verkehrsteilnehmer oder durch erhöhte Turbulenzen hinter dem Fahrzeug durch die hohe Fahrgeschwindigkeit. Auch hier wurde ein ebener und ein Abschnitt mit Steigung in die Teststrecke eingebunden.

Obwohl die Untersuchung innerstädtischer Verkehrsabschnitte nicht Ziel der Studie war, wurden Hin- und Rückfahrt zur Teststrecke genutzt, um in Heidelberg innerstädtische Messungen durchzuführen.

### 4.3. Durchführung

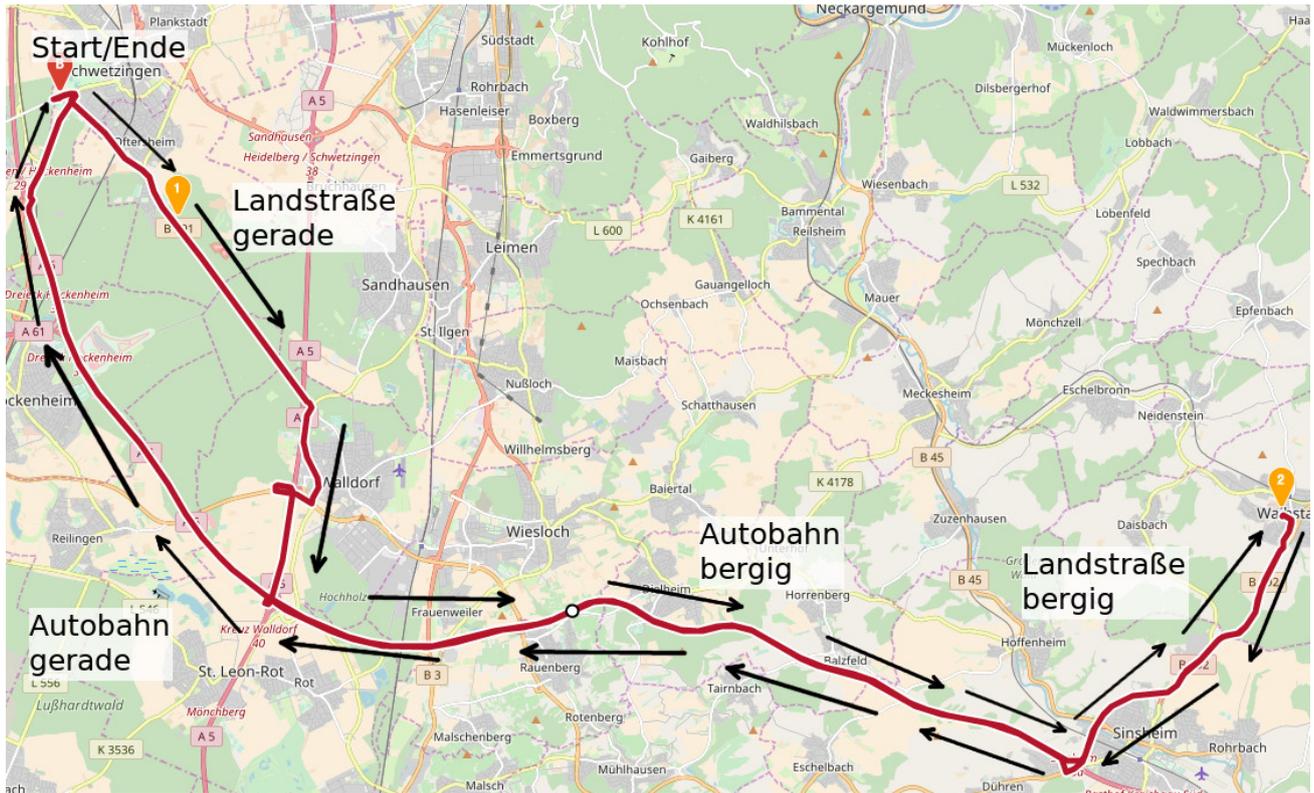


Abbildung 12: Teststrecke

Die ausgewählte Teststrecke, die den gewünschten Anforderungen entspricht befindet sich in der Umgebung von Heidelberg, ist ca. 80 km lang mit einer Fahrzeit von ca. 1,5 Stunden (siehe Abbildung 12; im Folgenden auch als Runde bezeichnet).

## 5. Datenauswertung Plume-Chasing

In diesem Abschnitt werden die Datenauswertung und Sensitivitätsstudien für das Plume-Chasing-Verfahren beschrieben. Die gewonnenen Messdaten sind die Grundlage für den Vergleich mit den PEMS Messungen.

### 5.1. Anpassung der CO<sub>2</sub>-Zeitreihe

Zu Beginn der Auswertung wurde die zeitliche Verschiebung zwischen der CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Messreihe eliminiert um synchrone Daten zu erhalten. Dabei wird die Ansprechzeit des CO<sub>2</sub>-Sensors im Vergleich zur Ansprechzeit des NO<sub>x</sub>-Messgerätes verglichen. Die CO<sub>2</sub>-Messreihe wurde zusätzlich mit einem Fourier-Transformations-Filter geglättet, damit die zeitlichen Dynamik von NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> besser übereinstimmen. Dargestellt ist dieser Vorgang in Abbildung 13.

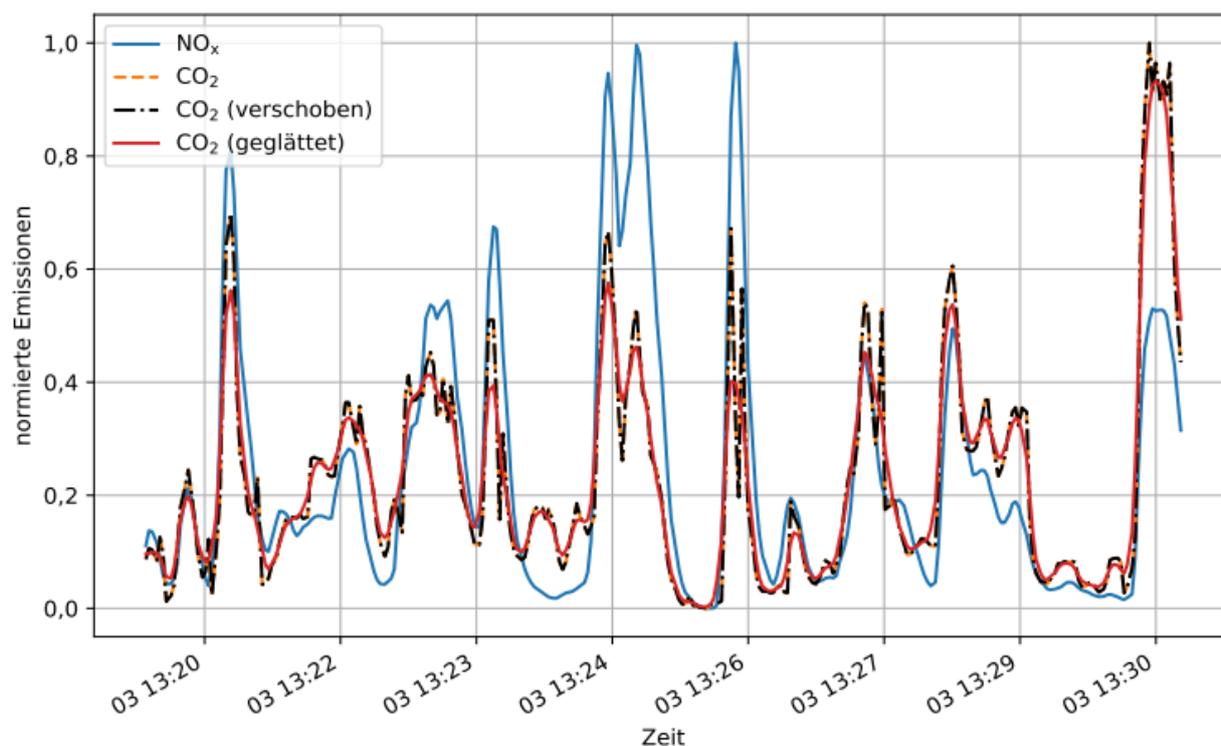


Abbildung 13: Verschiebung und Glättung der CO<sub>2</sub>-Messdaten relativ zu den NO<sub>x</sub>-Messdaten

## 5.1. Anpassung der CO<sub>2</sub>-Zeitreihe

### **5.1.1. Zeitliche Verschiebung zwischen Plume-Chasing und PEMS**

Bei der Plume-Chasing-Methode kommt es zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen tatsächlichem Ausstoß aus dem LKW und Messung. Diese Verzögerung entsteht durch das Ansaugen der Probe über die Messsonde durch den PTFE Schlauch bis zum Messinstrument. Diese Reaktionszeit wurde vor den Messfahrten bestimmt, und betrug 12 Sekunden. Die Zeit die die Abgase brauchen um vom LKW Auspuff bis zur Messsonde zu gelangen, wurde auf ca. 3 Sekunden bei typischer Fahrgeschwindigkeit geschätzt. In Konsequenz wurden alle Messdaten um 15 Sekunden verschoben, um sie mit den PEMS Daten zu vergleichen.

### **5.1.2. ICAD-Kalibration**

Für die Kalibration des ICAD Instrumentes wird der Absorptionslichtweg mit Helium nach der Methode von [Washenfelder et al. 2008] bestimmt. Die Kalibration erfolgte unmittelbar vor und nach den Messungen. Da es kurz vor Beginn der Messungen zu Komplikationen mit dem ICAD-Messgerät kam, wurde nur die Weglängenkalibration nach den Messungen benutzt.

### **5.1.3. NO-Konverter-Kalibration**

Vor der Durchführung der Messungen wurde der NO-Konverter des ICAD-Systems nur bis zu 500 ppb NO kalibriert (deutlich geringer als Konzentrationen, wie sie in dieser Studie auftraten). Bei der vorläufigen Auswertung, sowie im Zwischenbericht führte diese Kalibration zu deutlichen Abweichungen bei hohen NO-Konzentrationen. Das ließ vermuten, dass bei hohen NO-Konzentrationen nicht das komplette NO in NO<sub>2</sub> umgewandelt werden konnte (vgl. Abschnitt 3.4.1). Deswegen wurde im Nachhinein eine neue Kalibration durchgeführt, bei der höhere NO<sub>x</sub>-Konzentrationen berücksichtigt wurden.

Die daraus gewonnene Kalibrationskurve (Abbildung 14) wurde charakterisiert mit den zugehörigen Fit-parametern in Tabelle 5.1.1. Diese wurden im weiteren verwendet für die Datenauswertung in diesem Bericht.

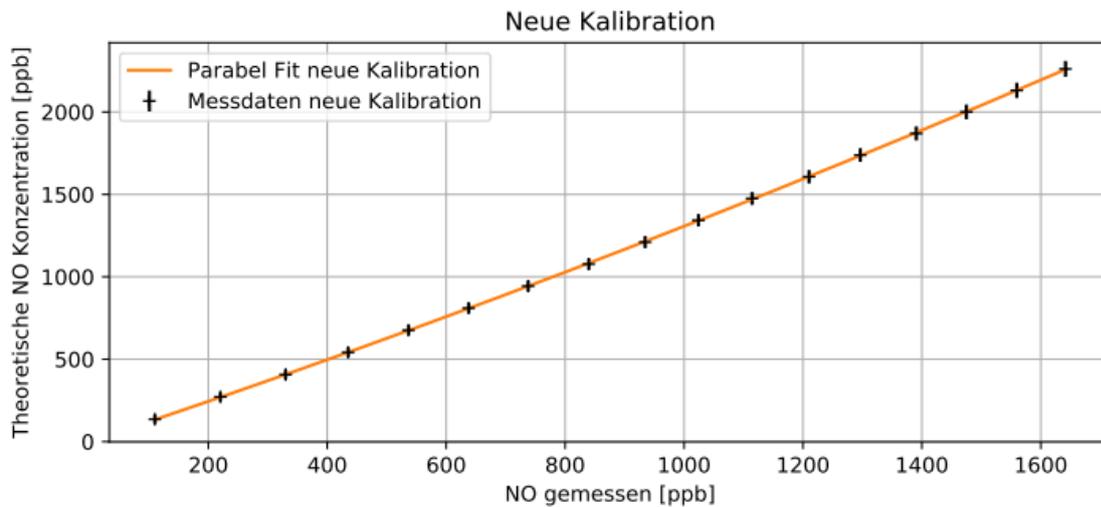


Abbildung 14: NO-Kalibrationskurve

	Kalibrationsparameter
Fit Funktion Parameter $f(x)=ax^2+bx$	$a=(1,08\pm 0,02)10^{-4}$ $b=1,199\pm 0,003$
R <sup>2</sup>	0,99998
Adjusted R <sup>2</sup>	0,99998

Tabelle 5.1.1: Kenndaten der NO-Kalibrationskurve

## 5.2. Mittelungsintervalle

Aus den Rohdaten mit ca. 1,18 Sekunden Zeitauflösung wurden Zwei-Minuten-Intervalle gebildet und über diese gemittelt. Zur Identifizierung eines Messpunktes in der Abgasfahne musste für jeden einzelnen Datenpunkt der CO<sub>2</sub>-Wert mindestens 30 ppm über dem Hintergrundwert liegen, ansonsten wurde der Datenpunkt nicht für das Mittelungsintervall berücksichtigt. So wurde sichergestellt, dass nur Messdaten aus der Abgasfahne gemittelt wurden. Die Bestimmung der Hintergrundwerte für die Hintergrundkorrektur ist in Abschnitt 5.4 beschrieben. Das Zwei-Minuten-Mittelungsintervall wurde gewählt um:

- einen ausreichend repräsentativen Wert zu erhalten, der mit dem PEMS Verfahren verglichen werden kann,

## 5.2. Mittelungsintervalle

- genügend Messdaten in einem Mittelungsintervall zu haben,
- den systematischen Unterschied durch Variation des Zeitversatzes zwischen PEMS und Plume-Chasing gering zu halten,
- den Einfluss der geringeren Konzentrationsdynamik in der verdünnten Abgasfahne im Vergleich mit dem PEMS am Auspuff gering zu halten,
- dynamische Unterschiede der Emissionen über mehrere Minuten trotzdem noch erkennen zu können,
- praktikable Emissionskontrollen mit dem Plume-Chasing-Verfahren zu prüfen die über vergleichbare Messzeiten erfolgen würden.

In der Studie konnten auch kürzere Intervalle für die Mittelung untersucht werden (Abschnitt 7.3), dabei stellte sich ebenfalls als bester Kompromiss das Zwei-Minuten-Intervall heraus, da dabei die resultierende Zeitauflösung nicht unnötig verringert wird.

Zu jedem Intervall wurde das  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis  $R$  mit Hintergrundkorrektur gebildet. Dieses Verhältnis wird für den Vergleich mit den PEMS Messungen herangezogen. Mit dem in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Vorgehen können aus dem  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis  $R$  die  $\text{NO}_x$ -Emissionen in  $\text{mg/kWh}$  nach Abschnitt 3.3.3 berechnet werden.

## 5.3. Qualitätsfaktor / Fehlerwert

Die Messgenauigkeit des ICAD- $\text{NO}_x$  Instrumentes ist hoch ( $\pm 0,5\text{ppb}$ ) und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet (vernachlässigbar), weil der Einfluss anderer Störfaktoren bei Messungen in der Abgasfahne im Straßenverkehr zu deutlich höheren Messfehlern der Emissionsbestimmung führt. Um trotzdem ein Maß für die Güte eines Emissions-Messwertes zu bestimmen, wurde der quantitative Qualitätsfaktor  $Q$  eingeführt. Dieser gibt anhand der Anzahl der verwendeten Messwerte (Datenpunkte) in einem Mittelungsintervall, sowie dem  $\Delta\text{CO}_2 = \text{CO}_{2, \text{gemessen}} - \text{CO}_{2, \text{Hintergrund}}$ , wie gut in der Abgasfahne gemessen wurde an.

### 5.3. Qualitätsfaktor / Fehlerwert

$$Q = 0,5 - 0,2 \cdot \left( \frac{\text{Anzahl verwendeter Messwerte}}{\text{Anzahl vorhandener Messwerte}/2} + \frac{\Delta \text{CO}_2}{10 \cdot \Delta \text{CO}_{2,\text{minimum}}} \right)$$
$$\approx 0,5 - 0,2 \cdot \left( \frac{\text{Anzahl verwendeter Messwerte}}{25} + \frac{\Delta \text{CO}_2}{300 \text{ ppm}} \right)$$

Dabei wurde ein Maximalwert von 300 ppm für  $\Delta \text{CO}_2$  und ein Anteil von 50 % der vorhandenen Messwerte im Mittelungsintervall als Richtwert eingeführt. Damit ergibt sich ein Qualitätsfaktor zwischen 0,5 und 0,1. Aus diesem Wert wurden die Fehlerbalken in allen folgenden Abbildungen berechnet. Der Qualitätsfaktor ist kein exakter Fehler, der sich bestenfalls sehr schwierig analytisch berechnen lässt. Ein kleiner Q-Wert/Fehlerbalken wird einerseits erreicht, wenn viele Datenpunkte in das Mittelungsintervall eingehen und somit der Mittelwert sehr repräsentativ für das ganze Intervall ist, und andererseits, wenn ein starkes  $\text{CO}_2$ -Signal vorhanden ist, und somit gut in der Abgasfahne gemessen wurde, wodurch Störeinflüsse wie andere Emittenten oder Schwankungen der Hintergrundkonzentration minimiert werden. Der Qualitätsfaktor zu einem Datenpunkt gibt dementsprechend an, wie gut das Emissionsverhältnis bestimmt werden konnte.

### 5.4. Bestimmung Hintergrundkonzentration

Für eine korrekte Berechnung des Emissionsverhältnisses  $R$  von  $\text{NO}_x$  zu  $\text{CO}_2$ , muss beim Plume-Chasing-Verfahren die Hintergrundkonzentration möglichst genau bestimmt und korrigiert werden. Die Unterschiede der Hintergrundkonzentrationen können u.U. zwischen verschiedenen Straßen in derselben Größenordnung liegen wie die Konzentrationserhöhung in der Abgasfahne. So sind Hintergrundkonzentrationen auf der Autobahn höher als auf einer ruhigen Landstraße, aber auch höher auf einer Autobahn zwischen Bäumen als auf einer Autobahn zwischen Feldern. Eine optimale Bestimmung der Hintergrundwerte erhöht die Genauigkeit der berechneten Emissionen. Eine zeitgleiche Messung der Hintergrundkonzentrationen, welche optimalerweise vor dem Auspuff des zu untersuchenden LKWs zu erfolgen hätte, ist für gewöhnliche Plume-Chasing-Messungen, also auch bei dieser

## 5.4. Bestimmung Hintergrundkonzentration

Studie, nicht praktikabel. Daher erfolgte die Bestimmung der Hintergrundkonzentrationen aus den vorhandenen Messdaten und zusätzlichen Messungen über die Ansaugleitung auf dem Dach (siehe Abschnitt 4.1) , im Folgenden als Dachmessung bezeichnet. Durch die Dachmessungen war es möglich, Emission und Hintergrund zeitlich nah zu messen.

In dieser Studie wurden drei verschiedene Methoden (M1 - M3) der Hintergrundbestimmung analysiert, um die Algorithmen für eine optimale Hintergrundkonzentrationsbestimmung zu verbessern. Die verschiedenen Überlegungen zur Hintergrundbestimmung führen zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen des Verhältnisses  $R$  und der  $\text{NO}_x$ -Emission. Methode 2 (M2) ist vergleichbar mit der Bestimmung der Hintergrundkonzentration anderer Emissionsstudien (Pöhler und Adler, 2017)

### **5.4.1. Methode 1 Minimum im Intervall (M1)**

Bei dieser Methode wurden die Dachmessungen nicht berücksichtigt. Es wurde nur nach dem  $\text{CO}_2$ -Minimum mit entsprechendem  $\text{NO}_x$ -Wert in jedem Zwei-Minuten-Intervall gesucht, und diese Werte wurden dann als Hintergrundkonzentration für das Mittelungsintervall angenommen.

### **5.4.2. Methode 2 Hintergrundmessung/Minimum (M2)**

M2 baut auf M1 auf, allerdings wurde noch zu jedem Zwei-Minuten-Intervall die nächste Dachmessung und die angrenzenden Zwei-Minuten-Intervalle, sofern sie zum selben Streckenabschnitt gehörten, auf das jeweilige  $\text{CO}_2$ -Minimum untersucht. Der niedrigste  $\text{CO}_2$ -Wert wurde dann mit zugehörigem  $\text{NO}_x$ -Wert als Hintergrundkonzentration zugewiesen.

### **5.4.3. Methode 3 Manuelle Bearbeitung der Hintergrundmessung (M3)**

Für M3 wurde die  $\text{NO}_x$ - und  $\text{CO}_2$ -Zeitreihe jeder Dachmessung zusammen mit den Dashcam-Aufnahmen betrachtet, um mögliche Fehler, bedingt durch die Verkehrssituation oder andere Fahrzeuge, zu eliminieren und damit die Genauigkeit zu erhöhen. Zusätzlich wurde analog zu M2 noch überprüft, ob das  $\text{CO}_2$ -Minimum im Intervall niedriger war, als der  $\text{CO}_2$ -Wert der geprüften

## 5.4. Bestimmung Hintergrundkonzentration

Dachmessung. Sofern das der Fall war, wurde das Minimum im Intervall als Hintergrundkonzentration zugewiesen.

### 5.4.4. Beispielauswertung einer Runde

In Abbildung 15 sind beispielhaft die Zeitreihen für die gemessene Runde 2 mit den jeweiligen Methoden der Hintergrundbestimmung dargestellt. Zusätzlich sind dort auch noch die Zeitverläufe für den bestimmten Hintergrund für CO<sub>2</sub> (Abbildung 16) und NO<sub>x</sub> (Abbildung 17) aufgetragen. In Tabelle 5.4.1 sind die durchschnittlichen Emissionswerte für die verschiedenen Methoden angegeben. Der angegebene Fehler ist der Fehler des Mittelwertes. Hier ist zu erkennen, dass alle Hintergrundbestimmungen sehr ähnliche Ergebnisse liefern, sowie dass die Emissionen des hier untersuchten EURO VI LKWs deutlich unter dem RDE-NO<sub>x</sub>-Grenzwert liegen. Zwar gibt es eine Variation der Hintergrundwerte im CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>, jedoch skalieren diese ähnlich, so dass es keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse gibt.

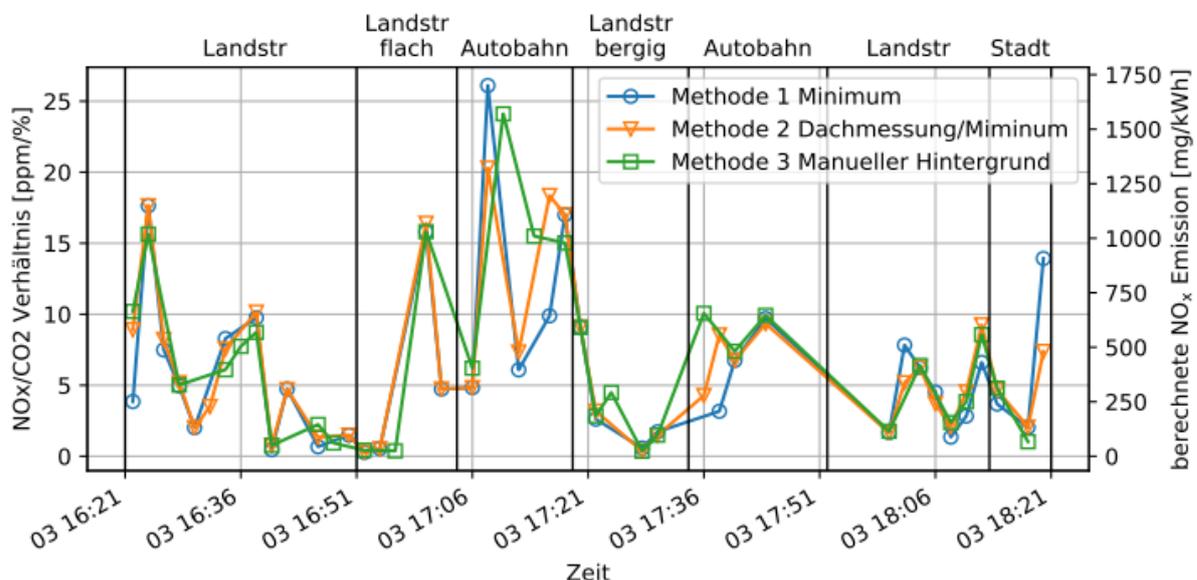


Abbildung 15: Bestimmte Emissionen des EURO VI LKW der gemessenen Runde 2 mit dem Plume-Chasing-Verfahren für verschiedene Methoden der Bestimmung der Hintergrundkonzentration.

## 5.4. Bestimmung Hintergrundkonzentration

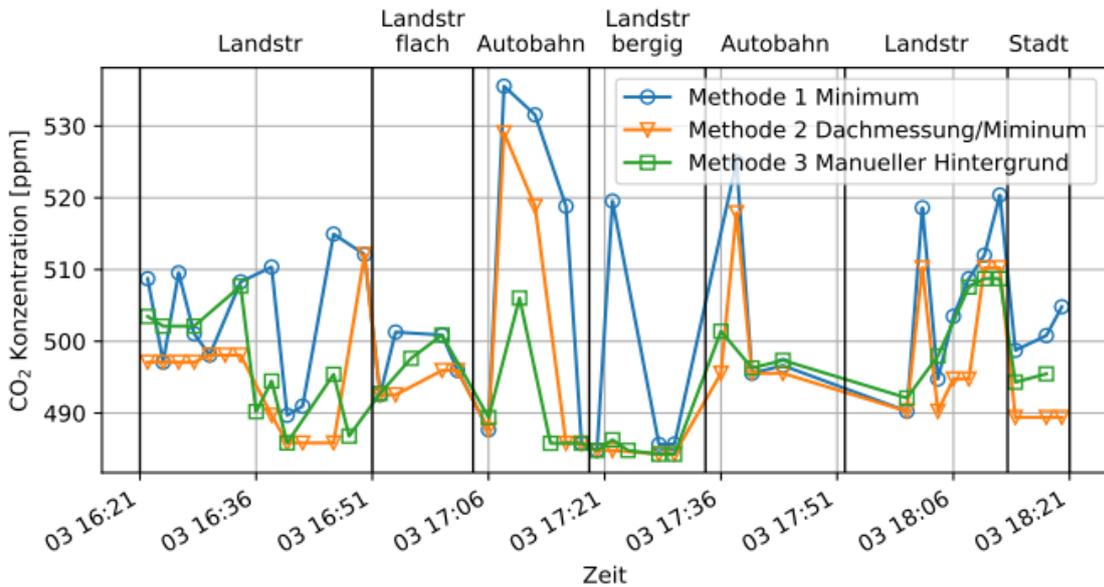


Abbildung 16: Bestimmte CO<sub>2</sub>-Hintergrundkonzentration für die Plume-Chasing-Messung der gemessenen Runde 2 bei den verschiedenen verwendeten Methoden der Bestimmung der Hintergrundkonzentration.

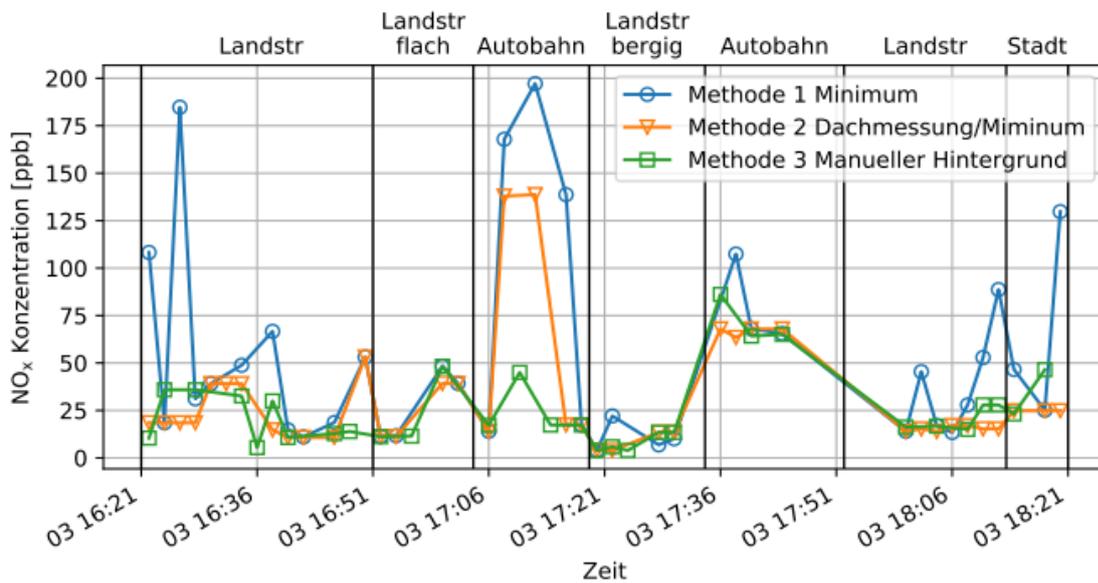


Abbildung 17: Bestimmte NO<sub>x</sub>-Hintergrundkonzentration für die Plume-Chasing-Messung der gemessenen Runde 2 bei den verschiedenen verwendeten Methoden der Bestimmung der Hintergrundkonzentration.

## 5.4. Bestimmung Hintergrundkonzentration

Hintergrund Methode	Mittlerer NO <sub>x</sub> -Emissionswert [mg/kWh]
M1	407 ± 62
M2	419 ± 55
M3	440 ± 68

*Tabelle 5.4.1: Bestimmte NO<sub>x</sub>-Emissionen für Runde 2 für verschiedene Methoden der Bestimmung der Hintergrundkonzentration.*

## 5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration

In diesem Abschnitt werden die Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration aus Abschnitt 5.4 analysiert und verglichen, um so die beste Methode zu bestimmen. Die Emissionsdaten der jeweiligen Methoden werden mit den Daten des PEMS verglichen. Die im nachfolgenden Abschnitt 7 erläuterten Filterungen der Mess- und Rohdaten finden hier schon Anwendung. Zusammenfassend zeigt dieser Abschnitt, dass die Methode der Hintergrundbestimmung kaum Einfluss auf die Ergebnisse hat. Da M2 gute Ergebnisse liefert und vergleichbar mit der sonst verwendeten Bestimmung der Hintergrundkonzentration in anderen Studien ist, wird in den folgenden Abschnitten nur noch Methode 2 betrachtet.

Das Ergebnis bestätigt die Theorie von Plume-Chasing, dass die Hintergrundmessung nicht absolut abgasfrei sein muss und somit nur einen geringen Einfluss auf die bestimmten Emissionswerte aufweist.

## 5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration

### 5.5.1. Vergleich der Emissionen

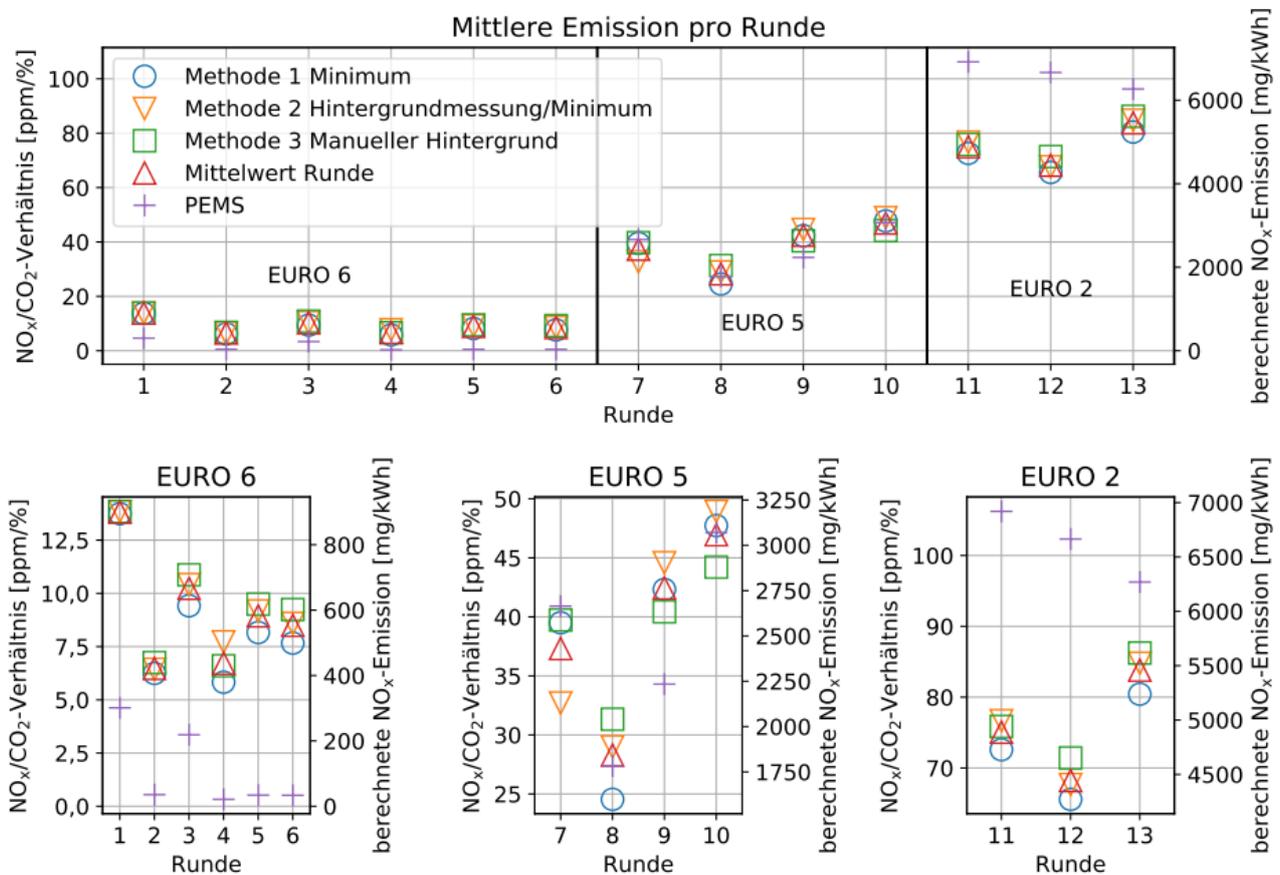


Abbildung 18:  $\text{NO}_x$ -Emissionen und  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Emissionsverhältnisse Zusammenfassung (Verschiedene Skala berücksichtigen)

In Abbildung 18 sind die  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnisse  $R$  aller Runden in ein Diagramm aufgetragen. Die zugehörigen Daten lassen sich Tabelle 5.5.1 entnehmen. Die Resultate der verschiedenen Methoden unterscheiden sich kaum voneinander, es zeigen sich allerdings große Unterschiede beim EURO VI und teilweise beim EURO II LKW zwischen PEMS und Plume-Chasing, was in Abschnitt 7 näher untersucht wird.

## 5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration

<b>Runde</b>	<b>EURO Norm</b>	<b>M1 [ppm/%]</b>	<b>M2 [ppm/%]</b>	<b>M3 [ppm/%]</b>	<b>PEMS [ppm/%]</b>
1	VI	13,74	13,85	13,84	4,62
2	VI	6,24	6,44	6,75	0,55
3	VI	9,41	10,41	10,87	3,56
4	VI	5,83	7,72	6,60	0,33
5	VI	8,16	9,18	9,50	0,52
6	VI	7,66	8,59	9,24	0,51
7	V	39,50	32,71	39,73	40,90
8	V	24,54	28,99	31,33	27,37
9	V	42,32	44,58	40,43	34,30
10	V	47,73	48,93	44,21	47,14
11	II	72,59	76,68	75,87	106,24
12	II	65,57	67,67	71,42	102,33
13	II	80,42	84,79	86,23	96,25

*Tabelle 5.5.1: NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis R in ppm/% Zusammenfassung*

Die Abweichungen beim EURO VI LKW sind sehr groß und mit großer Wahrscheinlichkeit auf Messfehler des PEMS zurückzuführen (siehe Abschnitt 7.1). Daher werden beim weiteren Vergleich der Methoden für die Bestimmung der Hintergrundkonzentration nur Messungen beim EURO V und EURO II LKW betrachtet.

### **5.5.2. EURO V**

Zur Bestimmungen der besten Methode zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration wird in diesem Abschnitt der EURO V LKW betrachtet. In der Tabelle 5.5.2 lassen sich kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Methoden erkennen. Allerdings variieren Streuung und relative Abweichung. Der Korrelationskoeffizient (R-Wert) und Steigung liefern sehr gute Werte bei diesem Vergleich für alle Methoden.

### 5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration

Method	Relative Abweichung [%]	Relative Streuung [%]	R-Wert	Steigung
M1	38,0	73,12	0,88	0,91
M2	38,6	74,21	0,87	0,94
M3	52,4	255,28	0,83	0,90

Tabelle 5.5.2: Vergleich der ermittelten Emissionswerte für die verschiedene Bestimmung der Hintergrundkonzentration für EURO V LKW

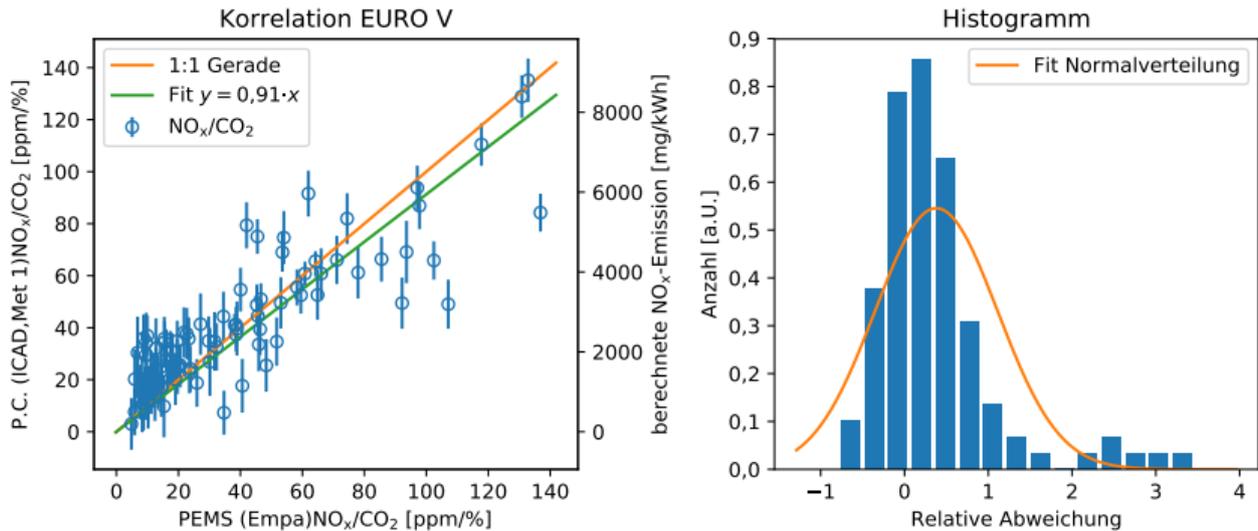


Abbildung 19:  $NO_x/CO_2$  EURO V Korrelation für Bestimmung der Hintergrundkonzentration nach Methode 1

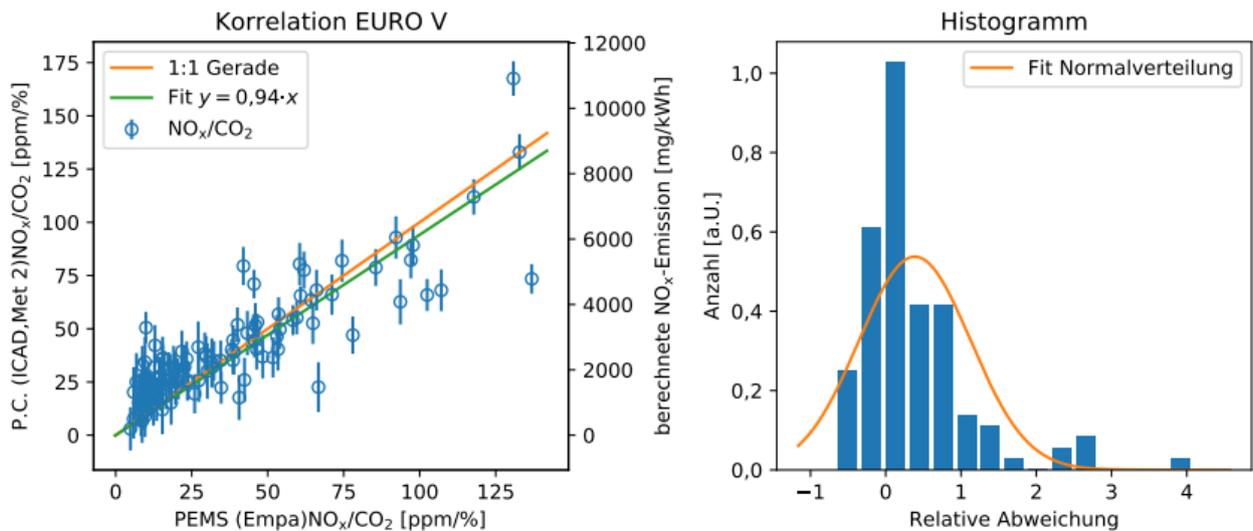


Abbildung 20:  $NO_x/CO_2$  EURO V Korrelation für Bestimmung der Hintergrundkonzentration nach Methode 2

## 5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration

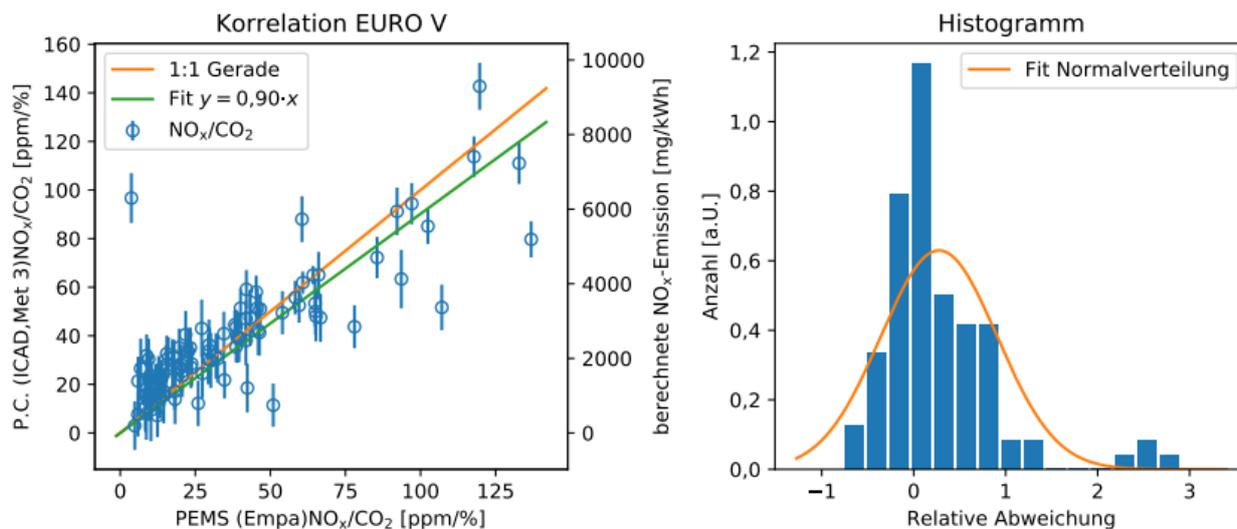


Abbildung 21:  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  EURO V Korrelation für Bestimmung der Hintergrundkonzentration nach Methode 3

### 5.5.3. EURO II

Bei analogen Vergleichen am EURO II LKW lassen sich ebenfalls geringe Unterschiede zwischen den Hintergrundmethoden feststellen. Man erkennt eine recht hohe relative Abweichung von ca. 20 % und im Vergleich mit dem EURO V LKW eine geringere Steigung der absoluten Werte. Zwar ist der Korrelationskoeffizient deutlich niedriger, dafür ist die relative Streuung der Messergebnisse besser. Die Ursache für die geringe Steigung liegt aber vor allem in der geringen Variation von  $R$ . Durch die konstant hohen Emissionen des LKWs, der über keine Abgasnachbehandlung verfügt, lässt sich die Steigung mathematisch nur schwer bestimmen und der Korrelations-R-Wert verschlechtert sich entsprechend.

Methode	Relative Abweichung [%]	Relative Streuung [%]	R-Wert	Steigung
M1	-22,6	16,3	0,41	0,77
M2	-19,8	17,0	0,33	0,79
M3	-18,6	17,2	0,30	0,80

Tabelle 5.5.3: Vergleich der ermittelten Emissionswerte für die verschiedene Bestimmung der Hintergrundkonzentration für EURO II LKW

## 5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration

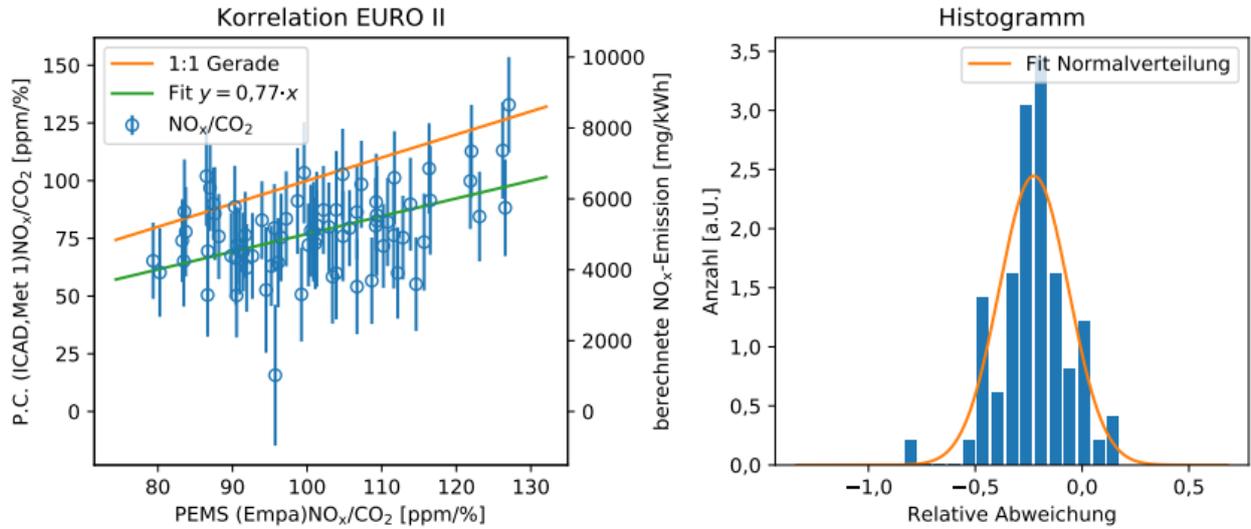


Abbildung 22:  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  EURO II Korrelation für Bestimmung der Hintergrundkonzentration nach Methode 1

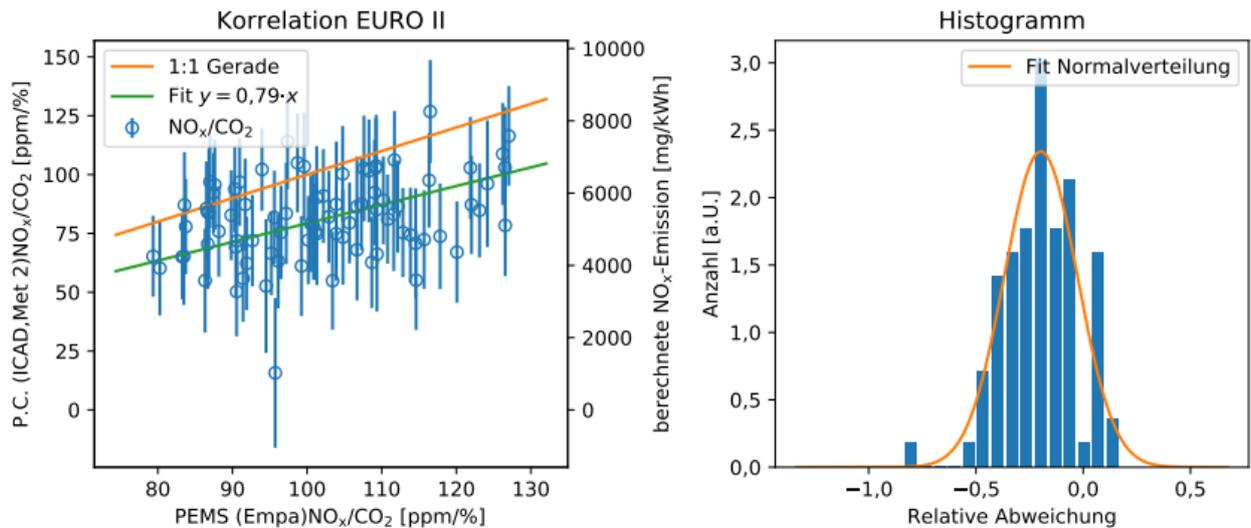


Abbildung 23:  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  EURO II Korrelation für Bestimmung der Hintergrundkonzentration nach Methode 2

## 5.5. Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration

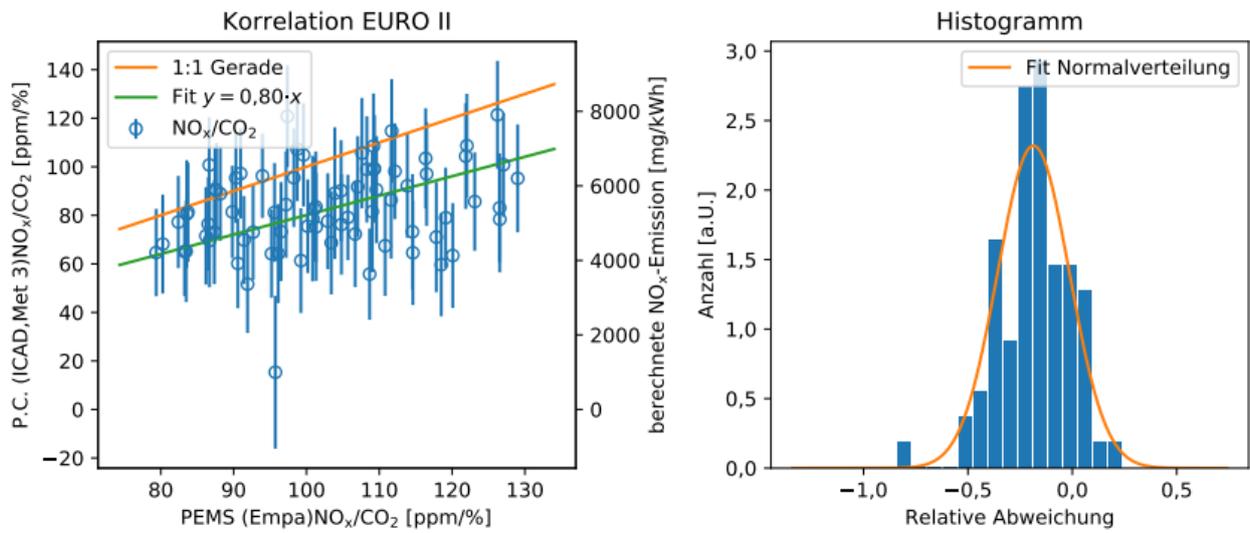


Abbildung 24: NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> EURO II Korrelation für Bestimmung der Hintergrundkonzentration nach Methode 3

## 6. Datenauswertung PEMS

### 6.1. Kalibration

Zu Beginn jeder Messung wurde das PEMS mit entsprechenden Kalibriergasen für CO, CO<sub>2</sub>, NO und NO<sub>2</sub> kalibriert. Für die Kalibrierung wurden die zugehörigen Routinen in der PEMS Software angewendet. Zuerst erfolgt eine Nullpunktkalibrierung mit Umgebungsluft, danach eine Endgaskalibrierung mit einem entsprechenden Kalibriergas. Alle Kalibriervorgänge erfüllten die Qualitätsvorgaben der PEMS Software. Nach den jeweiligen Tests wurde jeweils noch einmal eine Überprüfung des Endgaswertes durchgeführt, um einen allfälligen grösseren Drift des Analysators kompensieren zu können.

Komponente	Konzentration	Einheit	Trägergas
Kohlenmonoxid (CO)	3022	mol.ppm	Stickstoff
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	15.91	vol.%	Stickstoff
Stickstoffmonoxid (NO)	793	mol.ppm	Stickstoff
Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> )	1000	mol.ppm	Synth. Luft

*Tabelle 6.1.1: Kalibriergaskonzentrationen für die PEMS Messungen*

### 6.2. Zeitliche Korrektur der Emissionssignale (PEMS intern)

Für die Berechnung der NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnisse ist es wichtig, dass alle Zeitversätze die bei der Ermittlung der Rohwerte auftreten können, korrigiert werden. Zum einen ist dies der Zeitversatz von der Probenahmestelle bis zum Eingang des Messsystems und zum anderen ist es der Zeitversatz vom Eintritt des Messgases bis zum Analysierten Schadstoffwert. Hierzu wurden beim PEMS mittels einer Mischgasflasche (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) die Sprungantwortzeiten ermittelt und zwischen den einzelnen Analysatorsignalen verglichen. Aufgrund des Aufbaus des PEMS Systems ergeben sich für die beiden

## 6.2. Zeitliche Korrektur der Emissionssignale (PEMS intern)

Analysatoren (NDUV, NDIR) unterschiedliche Laufzeiten. Von der Probenahme bis zum NDUV zur Analyse der NO<sub>x</sub>-Konzentration wurde ein Versatz von 7 Sekunden ermittelt. Bis der NDIR ein entsprechendes CO<sub>2</sub>-Signal liefert vergingen 9.2 Sekunden. Um die Gaslaufzeiten zu kompensieren wurden die entsprechenden Signale gemäß den ermittelten Zeiten korrigiert, damit die jeweiligen Emissionssignale auch korrekt zu der erfassten Fahrsituation zugeordnet werden können.

Die aufgezeichneten Emissionssignale werden mit einem Zeitstempel versehen. Damit die PEMS Messwerte mit den des ICAD verarbeitet werden können, müssen diese auf derselben Zeitbasis beruhen. Daher wurde bei den Messungen der Zeitversatz zwischen den Signalen abgeglichen und in die zeitliche Zuordnung der PEMS Signale mit einbezogen (siehe Abschnitt 5.1.1).

## 6.3. Mittelungsintervalle

Für die zeitlich abgeglichenen Endrohremissionen wurden in denselben Zeitintervallen wie beim Plume-Chasing die jeweiligen Mittelwerte berechnet. Um leicht schwankende Signallaufzeiten, welche nicht durch die statische Laufzeitkorrektur abgefangen werden, auszugleichen, wurde für die Bestimmung des NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnisses zuerst die mittleren Konzentrationen der Gase im Zeitintervall berechnet und anschließend aus diesen Mittelwerten das mittlere Emissionsverhältnis gebildet.

Da das Plume-Chasing-Verfahren keine Emissionsbestimmung bei sehr geringen oder gar keinen CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmen kann (d.h. wenn nur eine sehr geringe Motorleistung vorliegt), werden auch im PEMS Messpunkte mit sehr geringen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für das Mittelungsintervall verworfen. Die Grenze für die CO<sub>2</sub>-Konzentration wurde entsprechend Abschnitt 7.2.3 auf 1% CO<sub>2</sub> im Abgas bestimmt.

## 6.4. Auffälligkeiten

Bei der Gegenüberstellung der Messdaten der beiden Messsysteme zeigten sich bei den EURO VI Werten grössere Auffälligkeiten. Nach der

## 6.4. Auffälligkeiten

Kaltstartphase wurden vom PEMS nur noch sehr niedrige  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen ermittelt. Dieser Zustand blieb über alle Messungen mit dem EURO VI Fahrzeug konstant. Auch bei erhöhter Fahrdynamik (Beschleunigungen, Bergauffahrten) konnten keine, oder wenn dann nur sehr geringe,  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Abgas bestimmt werden.

Da ein Messfehler bei diesen PEMS Messungen nicht ausgeschlossen werden kann, wurden die Resultate der EURO VI Messungen nicht in die finale Auswertung übernommen (siehe Abschnitt 7.1).

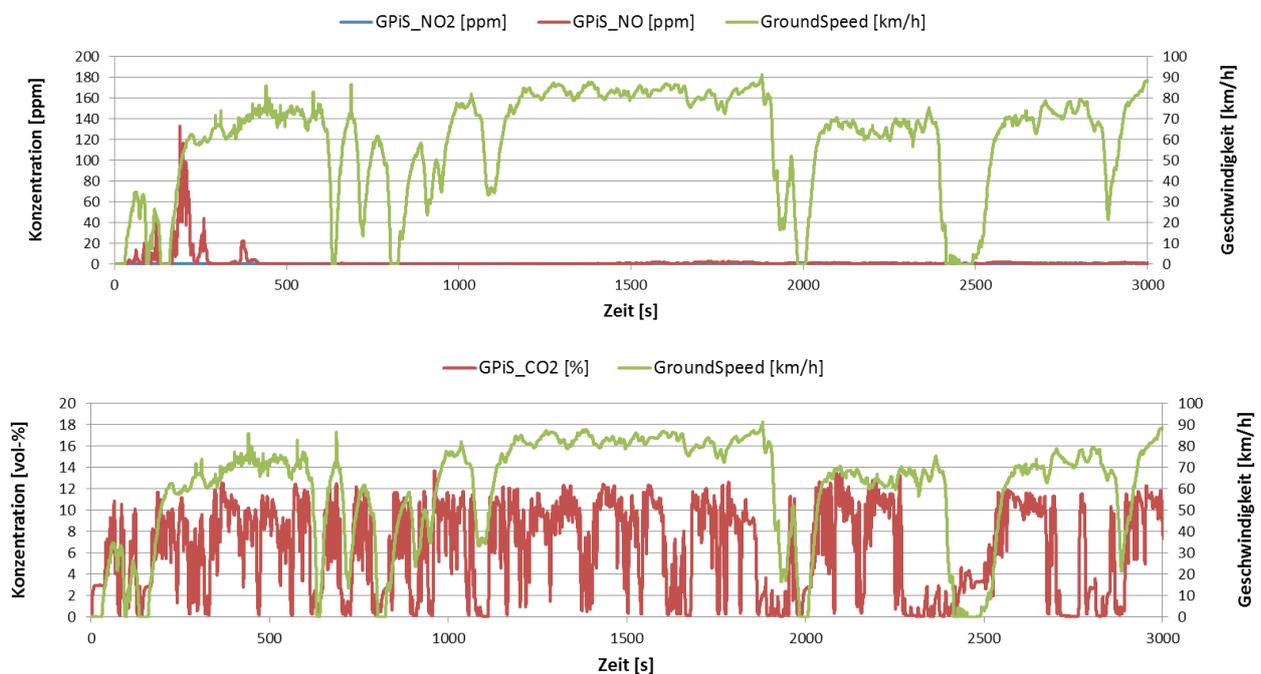


Abbildung 25: Auszug aus den Messdaten einer Messfahrt mit dem EURO VI LKW

## 6.5. Fehleranalyse

Vor jeder Messung wurde der Analysator mit einem entsprechenden Endgas kalibriert. Weicht während des Kalibriervorgangs der Messwert einer Komponente vom Sollwert zu stark ab, wird die Kalibrierung abgebrochen und eine Messung ist so nicht möglich. Konnte die Kalibrierung erfolgreich abgeschlossen werden, wird nach der Messung zur Überprüfung der

Analysatorfunktion ein sogenannter Span-Check durchgeführt. Dabei wird nochmals eine Überprüfung der Null- und Endgas-Werte mit Kalibriergas durchgeführt, um zu prüfen, ob der Analysatorwert über die Messzeit weg gedriftet ist. Alle durchgeführten Span-Checks wurden erfolgreich und ohne Fehlermeldungen abgeschlossen.

Eine weitere Fehlermöglichkeit wäre eine zu stark verdünnte Probenahme. Dabei wäre die Abgasprobenahmesonde nicht tief genug in der Abgasanlage positioniert und die Probe könnte dadurch durch angesaugte Umgebungsluft verdünnt worden sein. Diese Möglichkeit kann aber ausgeschlossen werden, da sich die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen während der entsprechenden Messungen in einem plausiblen Bereich bewegen.

Da eine fehlerhafte Kalibrierung, resp. fehlerhafte Probenahmesonde ausgeschlossen werden kann, könnte auch eine Querempfindlichkeit (additiv oder subtraktiv) auf eine andere Schadstoffkomponente zu einem fehlerhaften Messsignal führen. Für die eingesetzte Analysatortechnologie (NDUV) kommen mehrere Komponenten in Frage. H<sub>2</sub>O absorbiert in einem breiten Wellenlängenbereich die UV-Strahlung und kann so das Messresultat beeinflussen. Durch die eingebauten Kühler im PEMS wird die Rohgasprobe entfeuchtet, um die entsprechenden Querempfindlichkeitseffekte zu minimieren. Auch gewisse Kohlenwasserstoffverbindungen können sich auf das NDUV-Messsignal auswirken. Dieselmotoren weisen jedoch sehr tiefe HC Emissionen auf, wodurch dieser Effekt auch eher minimal sein dürfte. Auch gegenüber SO<sub>2</sub>-Emissionen weisen die per NDUV ermittelten NO<sub>x</sub>-Emissionen eine stärkere Querempfindlichkeit auf. Da der Schwefelanteil im Kraftstoff aber aufgrund der Kraftstoffspezifikationen sehr tief ist (<10ppm), können auch diese Effekte vernachlässigt werden. Am wahrscheinlichsten wäre ein Querempfindlichkeitseinfluss durch NH<sub>3</sub>, welches als Zwischenprodukt bei der SCR-Reaktion entsteht. Dies wäre die plausibelste Möglichkeit. Dabei würde grundsätzlich ein eher verstärkendes Messsignal der NO<sub>x</sub>-Konzentrationsmessung erwartet. Jedoch kann durch die anti-korrelierte Überlappung der Spektren von NH<sub>3</sub> und NO auch eine negative

## 6.5. Fehleranalyse

Querempfindlichkeit auftreten, was die sehr tiefen Stickoxidwerte des NDUV-Systems erklären könnte.

Nach den LKW-Messungen wurden an der Empa im Rahmen des Emissionsfaktorenprojekts mehrere EURO 6b Diesel Lieferwagen mit PEMS und auf dem Prüfstand vermessen. Das PEMS-Messgerät wurde zwischen den Messreihen weder verändert noch gewartet. Ausgehend davon, dass die Schadstoffzusammensetzung bei Fahrzeugen mit SCR sich nicht stark von der Emissionscharakteristik des EURO VI LKW unterscheiden dürfte, wurden die Korrelationsmessungen auf dem Prüfstand (PEMS vs. Stationäre Abgasmessanlage) von drei der Fahrzeuge detaillierter betrachtet.

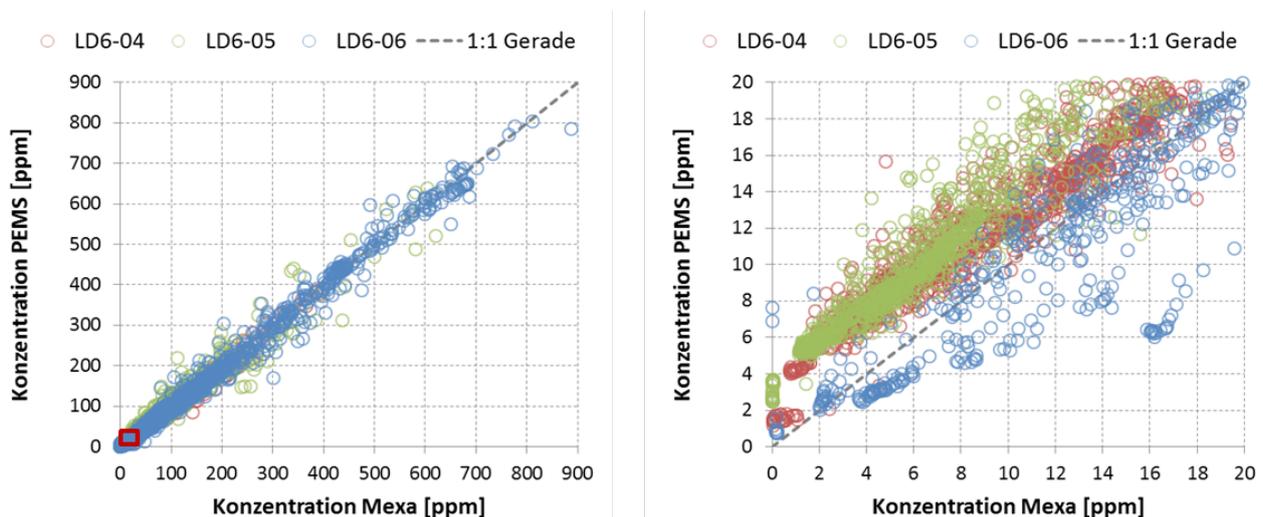


Abbildung 26: Vergleich der NO<sub>x</sub>-Emissionsmessung von EURO 6b Diesel Lieferwagen zwischen dem PEMS und der stationären Abgasmessanlage (Horiba Mexa 7400); links: gesamter Messbereich, rechts: Detailausschnitt

Obwohl bei tiefen Konzentrationen Abweichungen auftreten, werden die tiefen Emissionswerte eher überbewertet und nicht wie bei LKW-Messungen unterbewertet. Eine Rücksprache mit dem technischen Dienst von AVL brachte keine weiteren Erkenntnisse, sodass schlussendlich keine plausible Erklärung für die tiefen Messwerte beim EURO VI Fahrzeug gefunden werden konnte. Weitere Untersuchungen insbesondere der Querempfindlichkeit zu anderen Stoffen des NDUV-Systems müssten erfolgen.

## 7. Vergleich Rohdaten PEMS- und Plume-Chasing / Datenfilterung

In diesem Abschnitt werden die Messdaten für das  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis aus dem Plume-Chasing-Verfahren (Abschnitt 5) und dem PEMS (Abschnitt 6) direkt verglichen. Alle Messdaten beider Systeme gehen dabei ohne Datenfilterung ein. In diesem Abschnitt werden fehlerhafte Messungen identifiziert und eine passende Datenfilterung abgeleitet. Für den Vergleich wurden beide Datensätze auf Zwei-Minuten-Intervalle gemittelt. Für die Korrektur der Hintergrundkonzentration wurde beim Plume-Chasing-Verfahren die Methode 2 (M2) angewendet (siehe Abschnitt 5.4).

In Abbildung 27 ist eine Korrelation aller Messdaten dargestellt. Die verschiedenen EURO-Normen sind farblich gekennzeichnet.

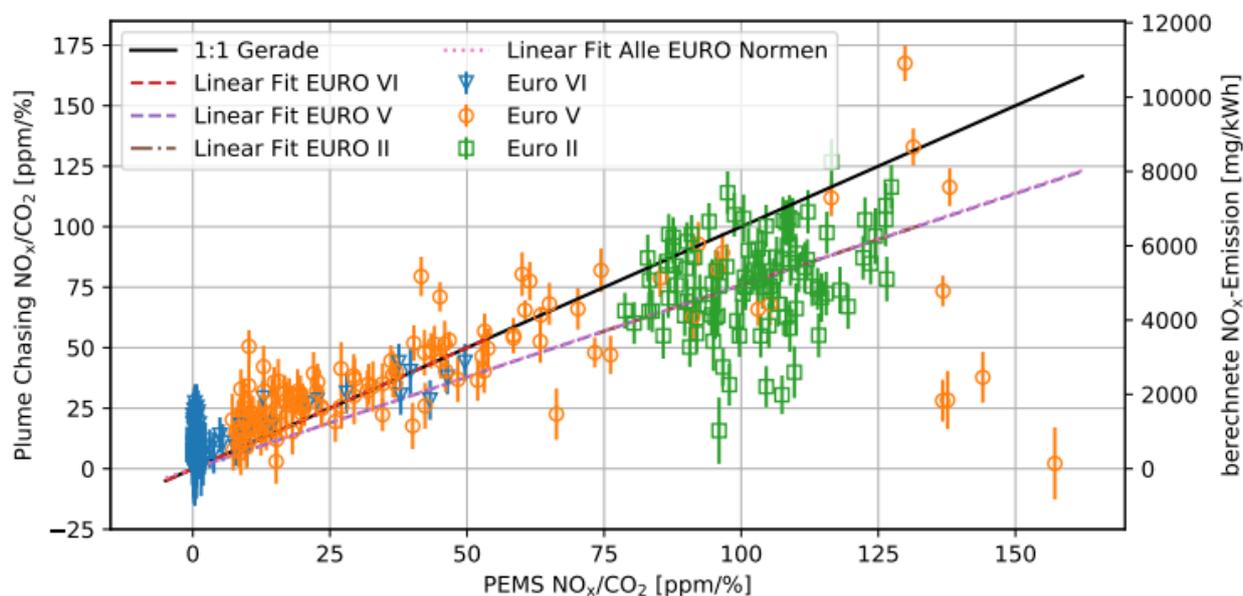


Abbildung 27: Korrelation des  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnisses aller Messdaten ohne Datenfilter.

Erwartungsgemäß umspannen die Messdaten niedrige Emissionsverhältnisse (EURO VI) und hohe Emissionsverhältnisse (EURO II). Die gesamte Korrelation liefert mit  $R=0,89$  und einer Steigung von  $0,76$  eine gute

## 7. Vergleich Rohdaten PEMS- und Plume-Chasing / Datenfilterung

Übereinstimmung zwischen den beiden Messsystemen. Es lassen sich große Abweichungen bei EURO VI und teilweise EURO II erkennen, während die Übereinstimmung für EURO V sehr gut ist. Die Korrelationen einzelner EURO-Normen fällt schlechter aus, da hier die Emissionswerte (abgesehen vom EURO V) nur wenig variieren und sich somit keine aussagekräftigen Korrelationsfaktoren bestimmen lassen.

Die gemessenen Emissionswerte liegen im Mittel für das Plume-Chasing-Verfahren leicht niedriger. Ausnahme ist der EURO VI LKW, bei dem mit dem PEMS extrem geringe Emissionen, deutlich geringer als erwartet, gemessen wurden. Das PEMS scheint hier keine verlässlichen Messdaten geliefert zu haben, worauf in Abschnitt 7.1 näher eingegangen wird. In Abschnitt 7.2 wird auf Messdaten des EURO II und EURO V eingegangen. Abschnitt 7.2.2 und 7.2.3 befassen sich mit der Datenfilterung der beiden Messsysteme, die für einen abschließenden Vergleich nötig sind.

EURO-Norm	Korrelationsparameter	
	R-Wert	Steigung
Alle Daten	0,89	0,76
EURO VI	0,69	1,00
EURO V	0,68	0,76
EURO II	0,27	0,76

*Tabelle 7.1: Korrelationsdaten nach EURO Norm*

### 7.1. EURO VI LKW

In den Zeitreihen des EURO VI LKWs zeigt sich, dass das PEMS sehr niedrige, eher unrealistische Werte liefert. Trotz weiterer Untersuchungen am PEMS konnte die Ursache nicht genau festgestellt werden (siehe Abschnitt 6).

#### 7.1.1. Zeitreihen

In diesem Abschnitt wird auf die einzelnen Zeitreihen nach Rundenummer eingegangen. Die Berechnung der Emissionen (Skala auf der rechten Seite) in den Abbildungen folgt der Umrechnung nach Abschnitt 3.3.3.

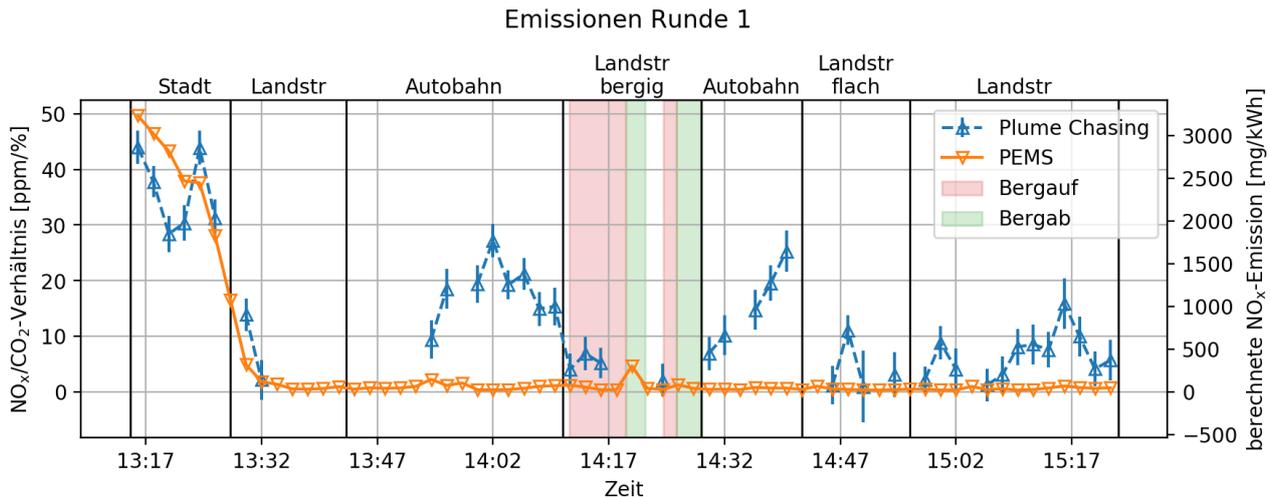


Abbildung 28: Emissionen Runde 1, EURO VI

Am Anfang der Runde wurden sehr hohe Werte gemessen, die auf Kaltstarteffekten des Motors zurückzuführen sind. SCR Abgasnachbehandlungssysteme, wie sie beim EURO VI LKW eingesetzt werden, benötigen eine gewisse Betriebstemperatur, die erst nach einer gewissen Zeit erreicht wird. Der Kaltstarteffekt ist bei beiden Emissionsdaten zu sehen. Nach ca. 15 Minuten scheint das PEMS kaum noch Emissionen (nahe 0 ppm/%) zu messen, wohingegen Plume-Chasing geringe, aber doch höhere Emissionen misst. Grund für die Lücke ca. 13:35 bis 13:53 in Abbildung 29 ist ein Stau, weil das Plume-Chasing-Verfahren in dieser Situation keine verlässlichen Daten liefert.

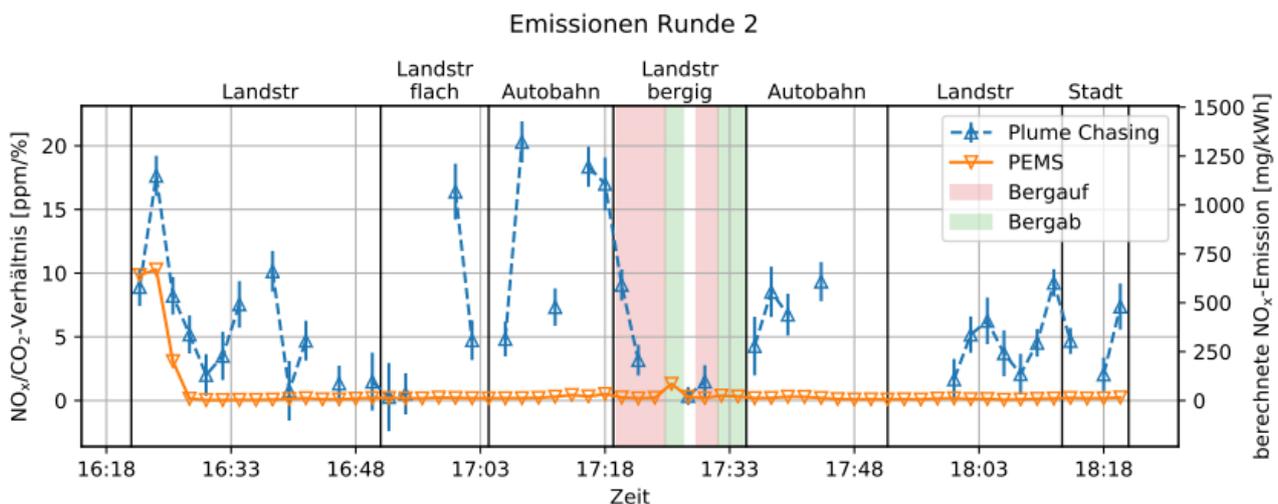


Abbildung 29: Emissionen Runde 2, EURO VI

## 7.1. EURO VI LKW

Bei der in Abbildung 29 dargestellten Runde 2 des selben LKWs, sind die Kaltstarteffekte deutlich geringer, da das Abgasnachbehandlungssystem von der vorherigen Runde 1 noch warm war. Auch hier zeigt das PEMS nur anfangs Emissionen an. Dieses Verhalten zieht sich über die kompletten Messreihen des EURO VI LKWs durch.

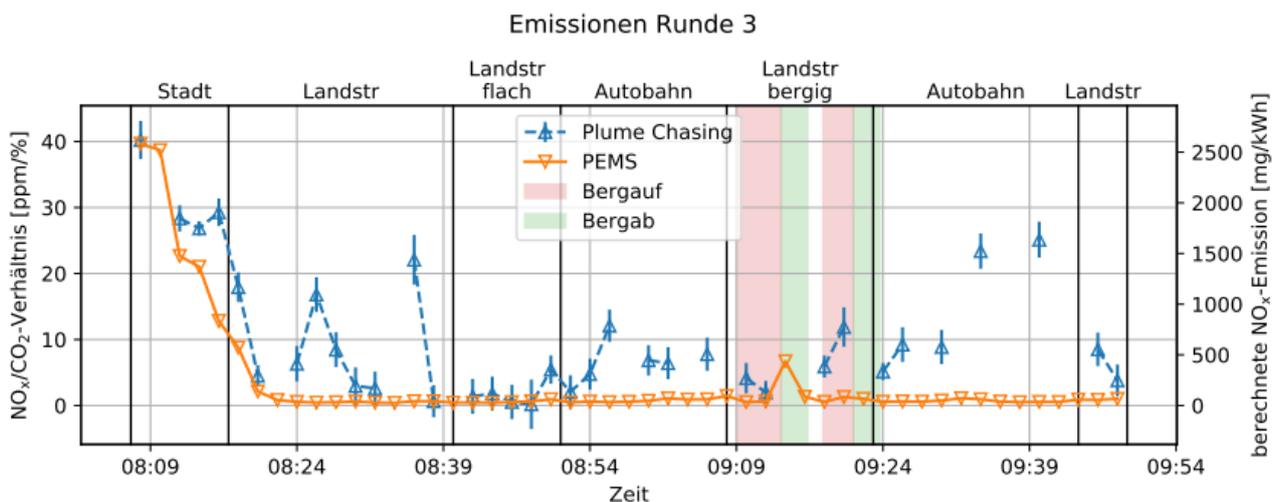


Abbildung 30: Emissionen Runde 3, EURO VI

Bei der dritten Runde, gezeigt in Abbildung 30, sind zu Beginn wieder deutlich Kaltstarteffekte zu erkennen. Dies liegt daran, dass in Runde 3 mit kaltem Abgasnachbehandlungssystem gestartet wurde.

In Runde 4 (siehe Abbildung 31) sind am Ende erhöhte Werte im Plume-Chasing zu erkennen. Grund dafür könnte sehr hohes Verkehrsaufkommen (belegt durch Dashcam-Aufnahmen) sein, und die erhöhten Werte könnten somit durch den Einfluss von anderen Fahrzeugen, fehlerhaft sein.

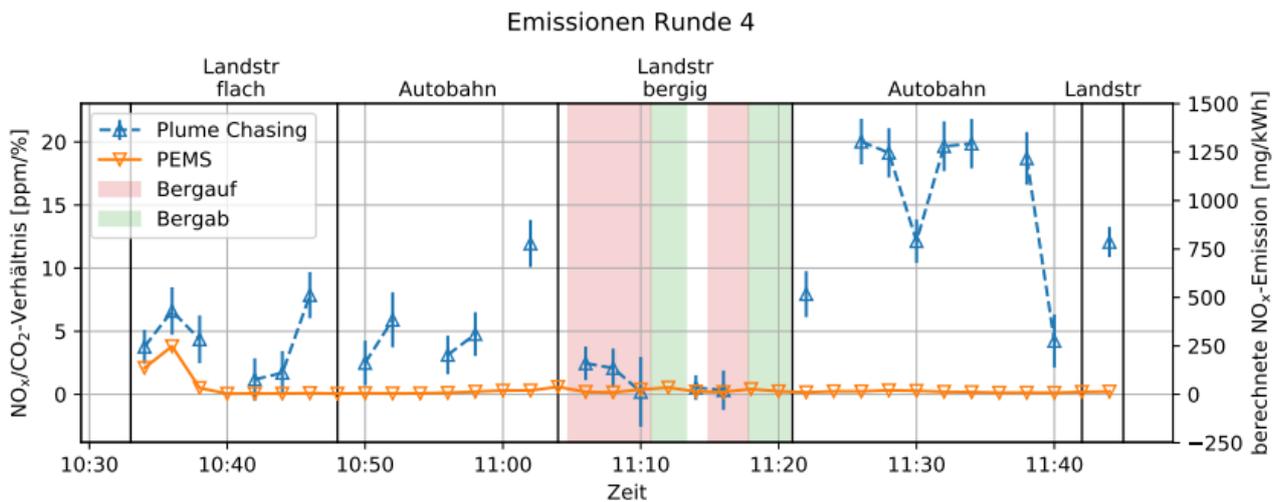


Abbildung 31: Emissionen Runde 4, EURO VI

In der fünften Runde (vgl. Abbildung 32) wurde mit größerem Abstand zwischen Messfahrzeug und LKW gemessen. Die geringe Anzahl der Messpunkte zeigt, dass hier seltener ausreichend gut in der Abgasfahne gemessen wurde. Ansonsten sind die Ergebnisse mit den anderen Runden des EURO VI LKW vergleichbar.

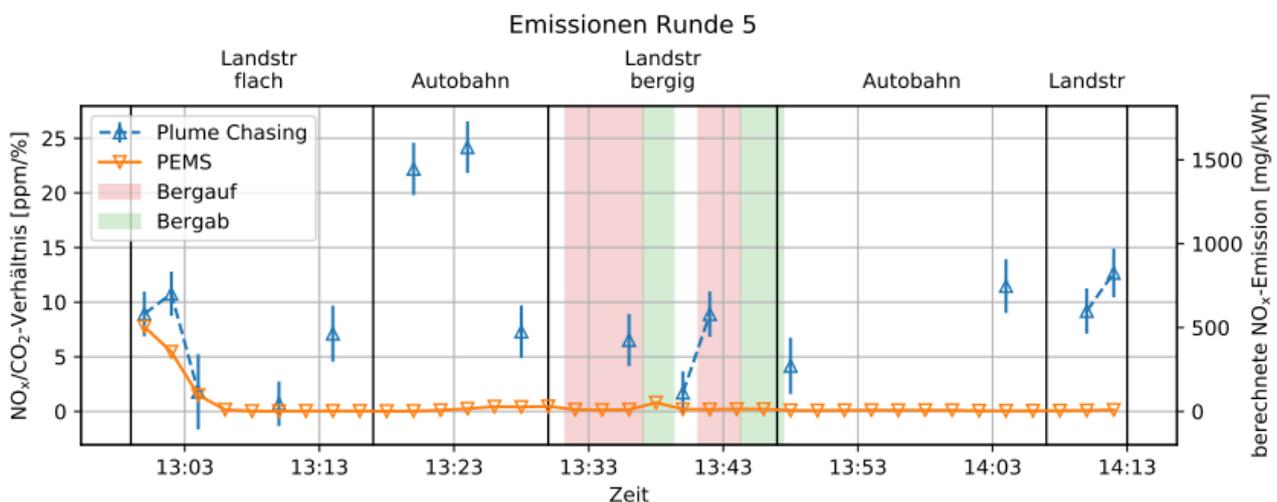


Abbildung 32: Emissionen Runde 5, EURO VI, erhöhter Fahrabstand (30- 40m) Plume-Chasing

Abbildung 33 zeigt die letzte Messfahrt, Runde 6, mit dem EURO VI LKW.

## 7.1. EURO VI LKW

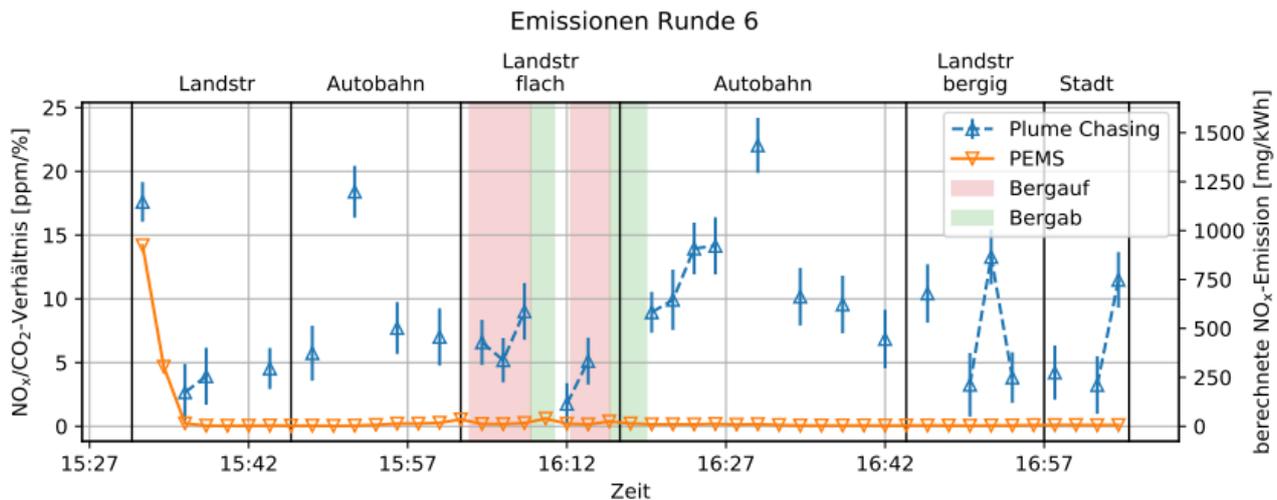


Abbildung 33: Emissionen Runde 6, EURO VI

### Zusammenfassung:

Wie in Abschnitt 6 erläutert, misst das PEMS beim EURO VI LKW nach Erreichen der Betriebstemperatur der Abgasnachbehandlung nur noch sehr geringe, unplausible Emissionswerte. Die in diesen Runden mit dem Plume-Chasing bestimmten Emissionsdaten entsprechen Werten, wie sie für einen EURO VI LKW erwartet werden (im Mittel 400-600 mg/kWh). Deshalb werden die Messdaten des EURO VI LKW im abschließenden Vergleich (Abschnitt 8) nicht weiter berücksichtigt.

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

Im Folgenden werden die Messdaten des EURO V und EURO II betrachtet. Ziel ist es, systematische Abweichungen zwischen beiden Messverfahren zu erkennen, die aufgrund der verschiedenen Messmethoden entstehen und nicht auf Messfehler des einen oder anderen Systems beruhen. Daraus werden Datenfilter abgeleitet, die technisch erklärbar sind, und im Anschluss auf die Messdaten angewendet werden. Außerdem wird überprüft ob die Abweichungen auf Grund von systematischen Eigenschaften und Messfehlern des einen oder anderen Systems entstehen. Abschließend werden im darauf folgenden Abschnitt 8 beide Messreihen verglichen.

### 7.2.1. EURO V und EURO II LKW Zeitreihen

Das Beispiel einer Zeitreihe des EURO V LKWs (Abbildung 34, Runde 10) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen PEMS und Plume-Chasing. Auch kurzzeitige dynamische Änderungen des  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnisses werden vom Plume-Chasing gut dargestellt. Es sind nur wenige Abweichungen und Ausreißer zu sehen.

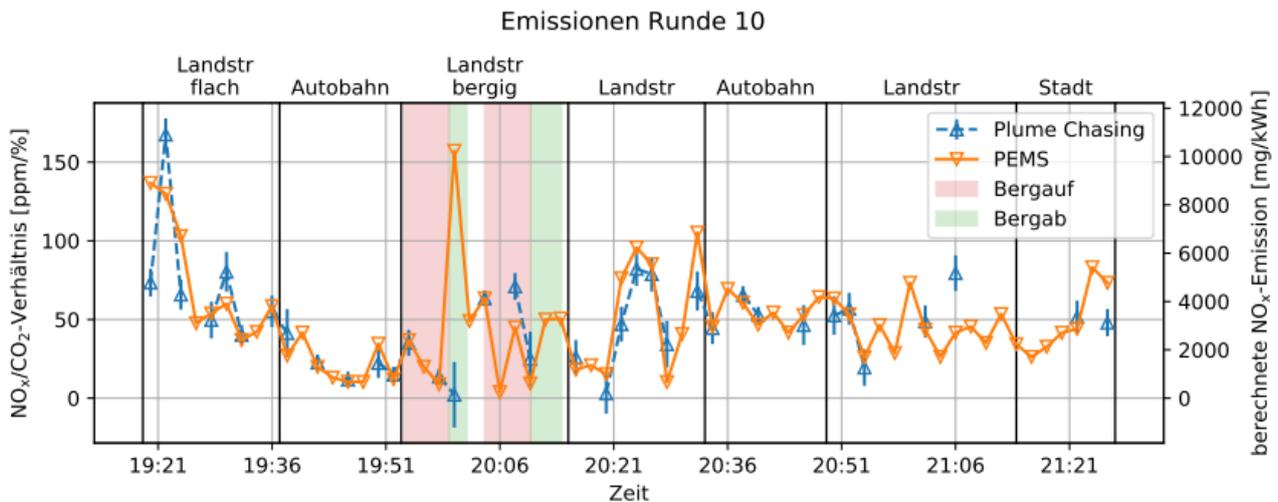


Abbildung 34: Emissionen Runde 10, EURO V

Abbildung 35 zeigt ein Beispiel einer Zeitreihe des EURO II LKWs. Hier ist zu sehen, dass das Plume-Chasing-Verfahren die Emission unterschätzt, wobei dennoch eine gewisse Übereinstimmung von dynamischen Emissionsschwankungen erkennbar ist.

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

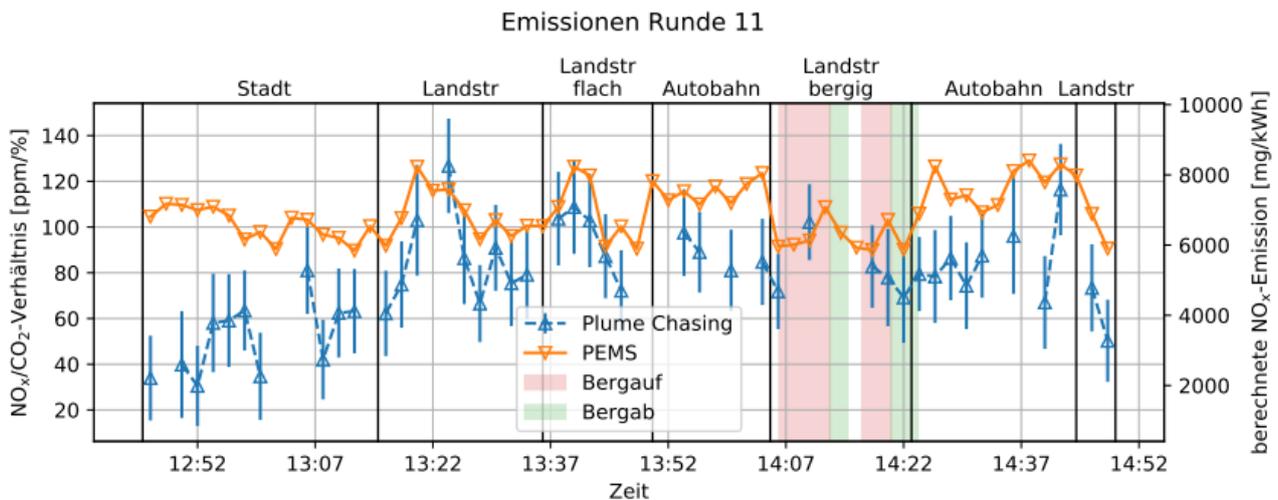


Abbildung 35: Emissionen Runde 11, EURO II

### 7.2.2. Untersuchungen der Plume-Chasing-Messwerte

In diesem Abschnitt werden weitere Untersuchungen mit den Messdaten des Plume-Chasing-Verfahrens durchgeführt. Hierbei wurde die Abweichung zwischen PEMS zu Plume-Chasing insbesondere im Bezug zu den gemessenen Rohdaten von  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ , bzw.  $\Delta\text{CO}_2$  untersucht. Um systematische Abweichungen zu erkennen, wurde in die Korrelationsplots zwischen beiden Messsystemen eine Farbkodierung für den jeweils betrachteten Messwert eingeführt (Abbildung 37).

#### Betrachtung hohe $\text{NO}_x$ -Messwerte:

Um eventuelle Probleme bei hohen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im ICAD-Messgerät zu untersuchen, wurden in den Rohdaten des ICAD Messpunkte entfernt die verschiedene Schwellenwerte überschreiten (500, 1000, 1500, 2000, 2500 oder 3000 ppb  $\text{NO}_x$ ) und anschließend ausgewertet.

In Abbildung 37 sind kaum Zusammenhänge zu erkennen, und auch die Filter (siehe Tabelle 7.2.1 bzw. Abbildung 36) haben keinen nennenswerten positiven Einfluss auf die Korrelation beider Datensätze. Potentielle Messfehler bei höheren  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im ICAD System sind nicht der Grund für die unterschiedlichen Resultate aus beiden Verfahren. Daher erfolgt keine Datenfilterung aufgrund der gemessenen  $\text{NO}_x$ -Konzentration.

	NO <sub>x</sub> -Filter [ppb]	Kein Filter	500	1000	1500	2000	2500	3000
EURO V und II	R-Wert	0,89	0,75	0,90	0,91	0,90	0,90	0,88
	Steigung	0,76	0,50	0,71	0,75	0,77	0,77	0,76

*Tabelle 7.2.1: Korrelationswerte für verschiedene NO<sub>x</sub>-Filter*

Betrachtung CO<sub>2</sub>-Messwerte:

Die CO<sub>2</sub>-Werte zeigten keine systematischen Abhängigkeiten.

Betrachtung ΔCO<sub>2</sub>-Messwerte:

Ein hohes ΔCO<sub>2</sub>-Signal beim Plume-Chasing-Verfahren deutet darauf hin, dass die Messung gut in der Abgasfahne erfolgte. Ein geringer ΔCO<sub>2</sub>-Wert zeigt ein geringes Signal von der Abgasfahne und deutet somit eher auf mögliche höhere Einflüsse durch andere Fahrzeuge bzw. Schwankungen in der Umgebungskonzentration hin. Eine untere Schwelle von 30 ppm für den ΔCO<sub>2</sub>-Messwert wurde bereits berücksichtigt, um ein zu schwaches Messsignal auszuschließen.

Es zeigt sich, dass beim EURO II LKW schlechter in der Abgasfahne gemessen wurde (Abbildung 37), da die Werte für ΔCO<sub>2</sub> vergleichsweise niedrig sind (dargestellt durch die Farbskalierung). Datenpunkte, bei denen Plume-Chasing zu geringe NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnisse bestimmt, sind eher durch geringe ΔCO<sub>2</sub>-Signale gekennzeichnet. Eine höhere Schwelle würde daher zu einer leicht besseren Korrelation führen. Wenn eine bessere Messung in der Abgasfahne in Zukunft erreicht wird, sollte dann möglichst eine größere ΔCO<sub>2</sub>-Schwelle angewendet werden. Bei den hier durchgeführten Messungen würde dies nur zu einer zu hohen Reduktion von Messdaten führen, weshalb die Schwelle von 30ppm beibehalten wurde.

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

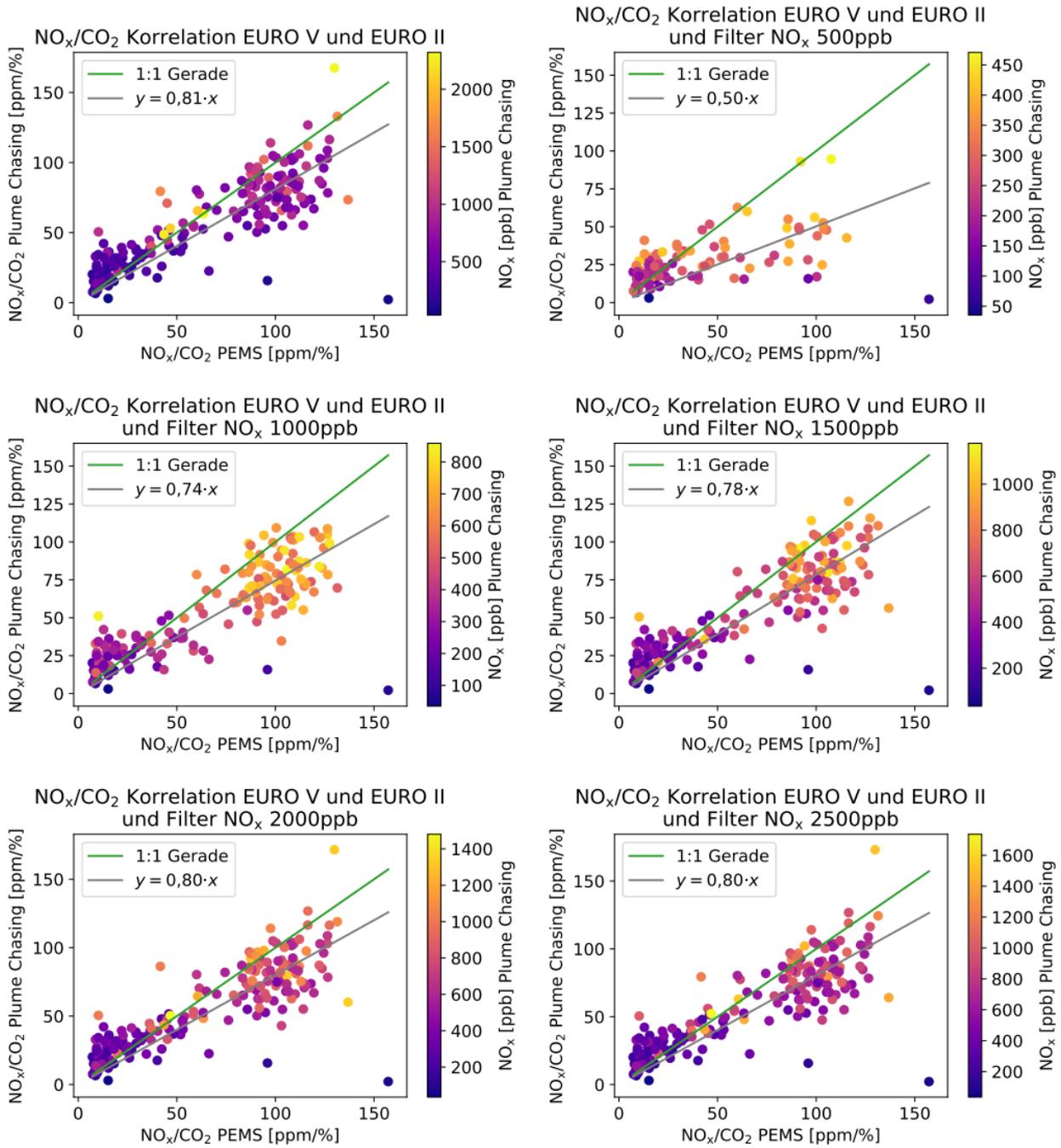


Abbildung 36: Korrelationen mit verschiedenen  $\text{NO}_x$ -Filtern

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

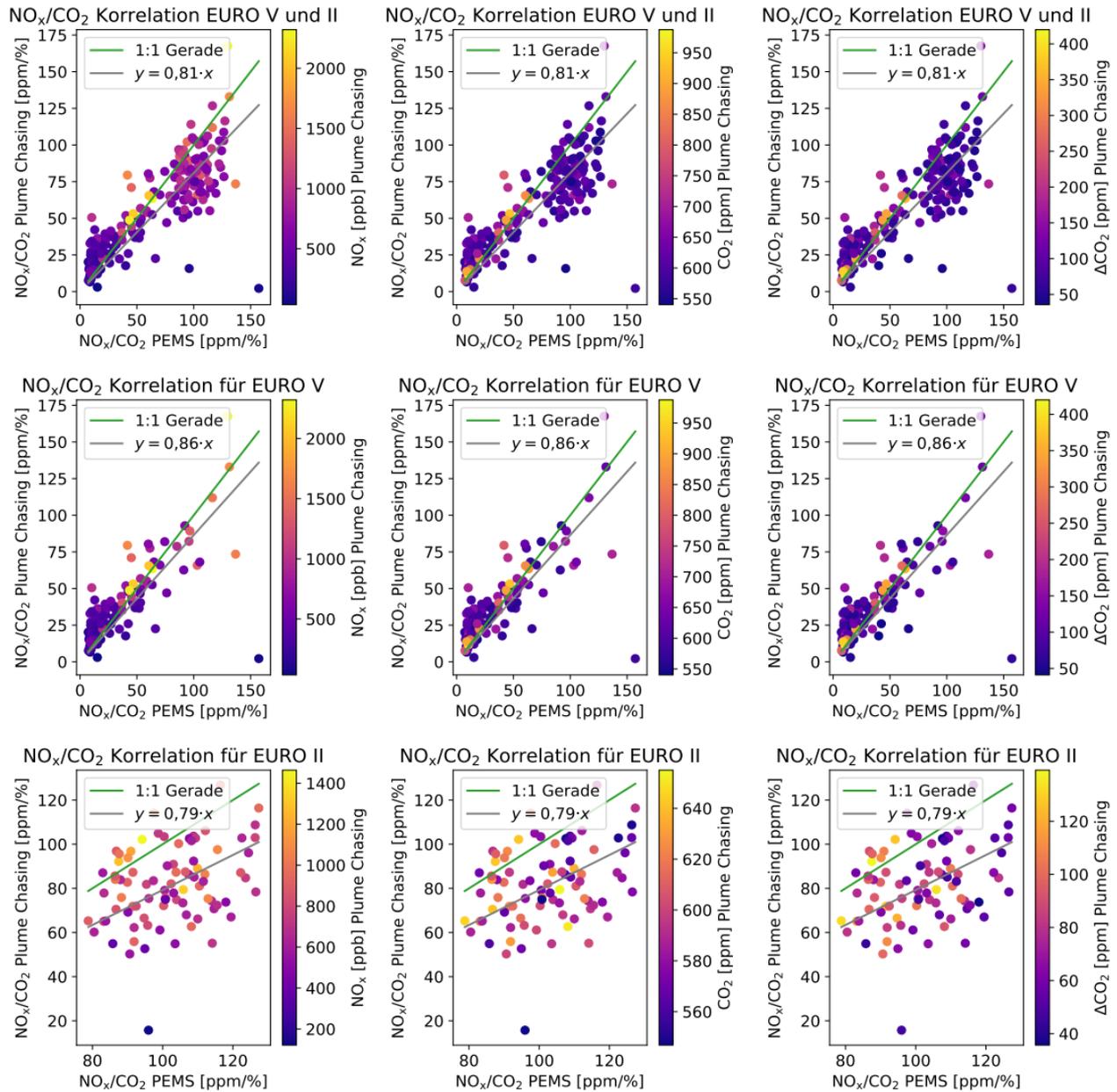


Abbildung 37: Korrelation mit NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, bzw. ΔCO<sub>2</sub> Farbkodierung (von links nach rechts) in erster Reihe für EURO V und EUR II gemeinsam, in Zeile 2 und 3 getrennt nach EURO Klasse.

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

### 7.2.3. Untersuchungen Messwerte PEMS

Analog zu den Untersuchungen der Plume-Chasing-Messdaten (Abschnitt 7.2.2) werden die Messdaten des PEMS in diesem Abschnitt untersucht. Auch hier wurde eine Farbkodierung für die gemessenen  $\text{NO}_x$ - und  $\text{CO}_2$ -Werte in die Korrelationsgraphen (Abbildung 38) eingefügt, um systematische Abweichungen zu erkennen.

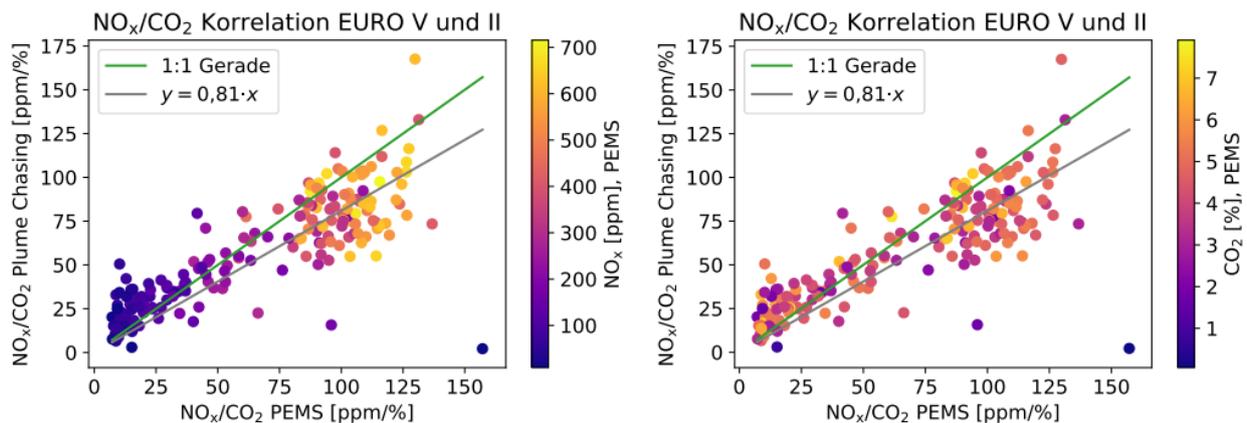


Abbildung 38: Korrelation für EURO V und EURO II, mit Farbkodierung für  $\text{NO}_x$  bzw.  $\text{CO}_2$  der PEMS Daten

#### Betrachtung $\text{NO}_x$ -Messwerte:

Größere Ausreißer in den Korrelationen (Abbildung 38, links) scheinen mit geringen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen beim PEMS zusammenzufallen. Ein möglicher Zusammenhang könnte darin bestehen, dass in diesem Fall nur ein schwaches Signal im Plume-Chasing gemessen wurde, was durch andere Emittenten stärker beeinträchtigt worden sein kann. Es lässt sich jedoch kein eindeutiger systematischer Zusammenhang feststellen. Daher erfolgt keine Datenfilterung aufgrund der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen.

#### Betrachtung $\text{CO}_2$ -Messwerte:

Grundsätzlich scheinen Abweichungen zwischen den beiden Systemen (Abbildung 38, rechts) hauptsächlich mit niedrigen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen beim

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

PEMS im Zusammenhang zu stehen. Eine geringe CO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas bedeutet, dass der Motor zu diesem Zeitpunkt einen geringen Kraftstoffverbrauch hat, das bedeutet, es wird eine geringe Motorleistung abgerufen. Im Leerlauf oder im Schubbetrieb bergab kann es sogar vorkommen, dass fast gar keine Emissionen stattfinden und dann in der Abgasfahne nur sehr geringe Konzentrationen an CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> mit dem Plume-Chasing-Verfahren gemessen werden können. Wegen der Mindestschwelle für ΔCO<sub>2</sub> im Plume-Chasing-Verfahren, werden derartig geringe Emissionen bei der Mittelung in Zwei-Minuten-Intervalle nicht berücksichtigt.

Eine geringe Emission bedeutet jedoch nicht ein geringes NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis, das in den Korrelationen betrachtet wird (Abbildung 38). Für die gesamten Emissionen spielen diese Zeitpunkte jedoch keine Rolle, da sie nur einen unwesentlichen Anteil ausmachen (dies ist vergleichbar mit der ΔCO<sub>2</sub>-Schwelle beim Plume-Chasing). Diese werden dominiert von den Zeitpunkten mit hohen Emissionen bei hoher Motorleistung. Es ist daher sinnvoll, Datenpunkte mit sehr geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bestimmung des NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis nicht zu berücksichtigen. Daher wurde bei den PEMS-Rohdaten vor dem Mitteln zu Zwei-Minuten-Intervallen die Messpunkte die eine CO<sub>2</sub>-Konzentration unter einem bestimmten Grenzwert aufweisen gefiltert (Tabelle 7.2.2). Dabei wurden Filter gewählt mit unter 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, oder 5 % CO<sub>2</sub> in den Messdaten.

	CO <sub>2</sub> -Filter [%]	-	1%	2%	3%	4%	5%
EURO V und II	R-Wert	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91
	Steigung	0,76	0,77	0,78	0,78	0,78	0,80
nur EURO V	R-Wert	0,68	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75
	Steigung	0,76	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77
nur EURO II	R-Wert	0,27	0,27	0,33	0,36	0,43	0,46
	Steigung	0,76	0,76	0,77	0,77	0,78	0,81

*Tabelle 7.2.2: Korrelationskoeffizient (R-Wert) und Steigung vom linearen Fit (Lineare Gerade durch den Ursprung) für verschiedene CO<sub>2</sub>-Filter (PEMS)*

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

In Tabelle 7.2.2 lässt sich für EURO II und V zusammengenommen eine leichte Verbesserung der Korrelation mit größeren CO<sub>2</sub>-Filter erkennen. Deutlich wird die Verbesserung bei der individuellen Betrachtung des EURO V LKWs. Bei einem CO<sub>2</sub>-Filter von 1 % kann bereits eine deutliche Verbesserung erreicht werden. Bei größeren Filtern gibt es kaum noch Verbesserungen der Korrelation. Bei dem EURO II LKW hingegen lässt sich erst ab 2 % eine Verbesserung erkennen, die dann kontinuierlich zunimmt, jedoch werden auch immer mehr Datenpunkte verworfen.

Um nicht zu viele Daten zu verlieren, wurden für die weiteren Betrachtungen alle PEMS-Messwerte unter einem CO<sub>2</sub>-Wert von 1 % gefiltert. Dadurch werden nur die Zeitpunkte mit sehr geringen Emissionen aus der Bestimmung des NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnisses entfernt, was etwa 16 % der hochaufgelösten Rohdaten (0,1 Sekunden) vor dem Mitteln in Zwei-Minuten-Intervalle entspricht.

### Weitere Spurengasabhängigkeiten:

Da das PEMS noch weitere Kenngrößen gespeichert hat, wurden auch noch Zusammenhänge zwischen Abweichung der Messsysteme und NO, NO<sub>2</sub>, Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff (O<sub>2</sub>), und Fahrtgeschwindigkeit in Abbildung 39 für EURO II und EURO V untersucht. Hier konnten keine wesentlichen neuen systematischen Abweichungen erkannt werden. Die O<sub>2</sub>-Abhängigkeit ist erwartet, da diese direkt anti-korreliert mit CO<sub>2</sub>.

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

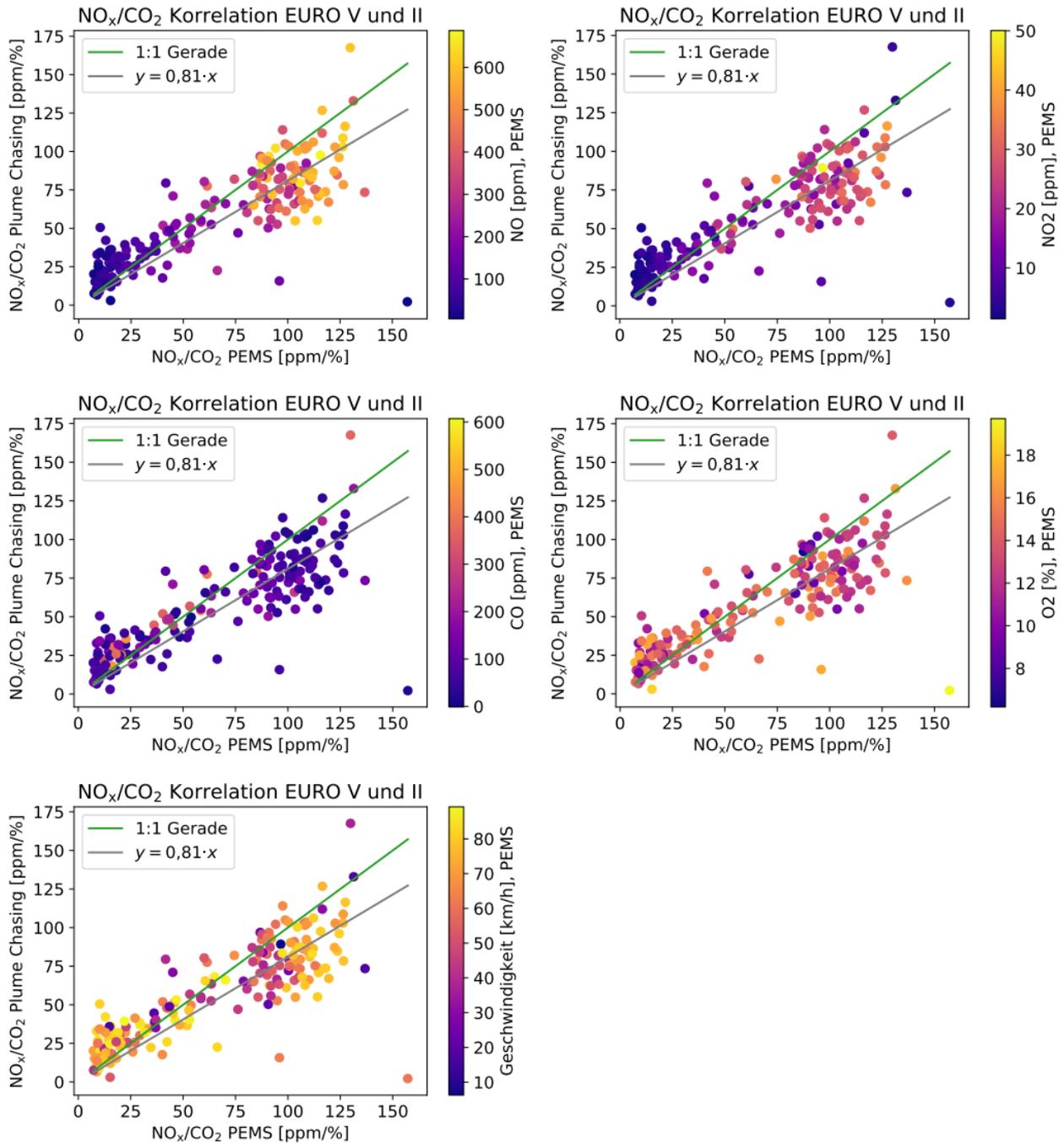


Abbildung 39: Korrelation weiterer PEMS Daten für EURO V und II

## 7.2. EURO V und EURO II LKW

### 7.2.4. Weitere Untersuchungen der Rohdaten-Zeitreihen

Untersucht wurde auch noch eine mögliche Verschiebung zwischen der NO<sub>x</sub>- und CO<sub>2</sub>-Zeitreihe im PEMS-Messgerät. Es wurde eine Differenz von etwa 0,6 Sekunden festgestellt, die aber bei Mittelungsintervallen von zwei Minuten kaum Einfluss haben sollte. Trotzdem wurde die Verschiebung für den abschließenden Vergleich durchgeführt.

Auch wurde festgestellt, dass das PEMS in den Rohdaten öfter „aufhänger“ aufweist und über einen gewissen Zeitraum konstante Werte liefert, obwohl eigentlich Emissionsvariationen vorhanden sein müssten. Die Entfernung dieser vielfachen Daten wurde durchgeführt, hat aber kaum zu einer Veränderung der Ergebnisse beigetragen. Da es technisch jedoch keinen Sinn ergibt, diese Werte mit einzubeziehen, wurden sie dennoch für den abschließenden Vergleich entfernt.

## 7.3. Einfluss verschiedener Mittelungsintervalle

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie die Dauer der Zeitfenster zur Mittelwertbildung die Messergebnisse beeinflusst. In allen bisherigen Analysen wurden Zwei-Minuten-Intervalle betrachtet und dann zwischen den Messmethoden verglichen. In Abbildung 40 sind die Korrelationen für verschiedene Mittelungsintervalle von 1 bis 10 Minuten zu finden, in Abbildung 41 Histogramme zur absoluten Abweichung, und in Tabelle 7.3.1 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

<b>Mittelungsintervall [Minuten]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
R-Wert	0,84	0,88	0,88	0,84
Steigung	0,84	0,83	0,80	0,78
Mittlere Abweichung NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	-6,6	-7,1	8,4	-10,0
Mittlere Streuung NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	21,9	20,0	19,7	20,8

*Tabelle 7.3.1: Korrelationsdaten NO<sub>x</sub> zu CO<sub>2</sub> Verhältnis für verschiedene Mittelungsintervalle aller Daten*

### 7.3. Einfluss verschiedener Mittelungsintervalle

Bei der Korrelation aller Daten lässt sich eine sehr geringe Verbesserung der Streuung bei einer Mittelungsdauer von fünf Minuten erkennen. Ansonsten wird die Korrelation mit größeren Mittelungsintervallen eher schlechter. Ursachen können einerseits sein, dass dann über sehr unterschiedliche Emissionen der LKW gemittelt wird (hohe Variation innerhalb eines gemittelten Datenpunktes) und andererseits sich die Anzahl der Datenpunkte für die Korrelation verringern.

In Tabelle 7.3.2 sind die Korrelationsdaten nach EURO Norm aufgeschlüsselt. Hier lässt sich für den EURO V LKW eine deutliche Verbesserung der Streuung sowie der Steigung erkennen, Korrelationskoeffizient und mittlere Abweichung verschlechtern sich aber leicht. Für den EURO II LKW zeigen die Zwei-Minuten-Intervalle die besten Korrelationsdaten.

<b>EURO Norm</b>	<b>Mittelungsintervall [min]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
nur EURO V	R-Wert	0,84	0,87	0,86	0,82
	Steigung	0,97	0,94	0,98	1,00
	Mittlere Abweichung NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	2,9	3,0	2,9	3,8
	Mittlere Streuung NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	17,1	15,0	12,6	11,5
Nur EURO II	R-Wert	0,28	0,33	0,13	-0,03
	Steigung	0,80	0,79	0,76	0,74
	Mittlere Abweichung NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	-19,8	-20,7	-24,8	-26,4
	Mittlere Streuung NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	21,1	17,8	16,2	17,1

*Tabelle 7.3.2: Korrelationsdaten NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis für verschiedene Mittelungsintervalle aufgeschlüsselt nach EURO Norm*

Insgesamt hat eine längere Mittelungsdauer nur einen geringen Effekt auf den Vergleich der Emissionsverhältnisse. Daher ist eine Mittelung über zwei Minuten ein guter Kompromiss zwischen ausreichender Mittelungsdauer der Messdaten (und damit guter Korrelation) und genügend hoher Zeitauflösung.

### 7.3. Einfluss verschiedener Mittelungsintervalle

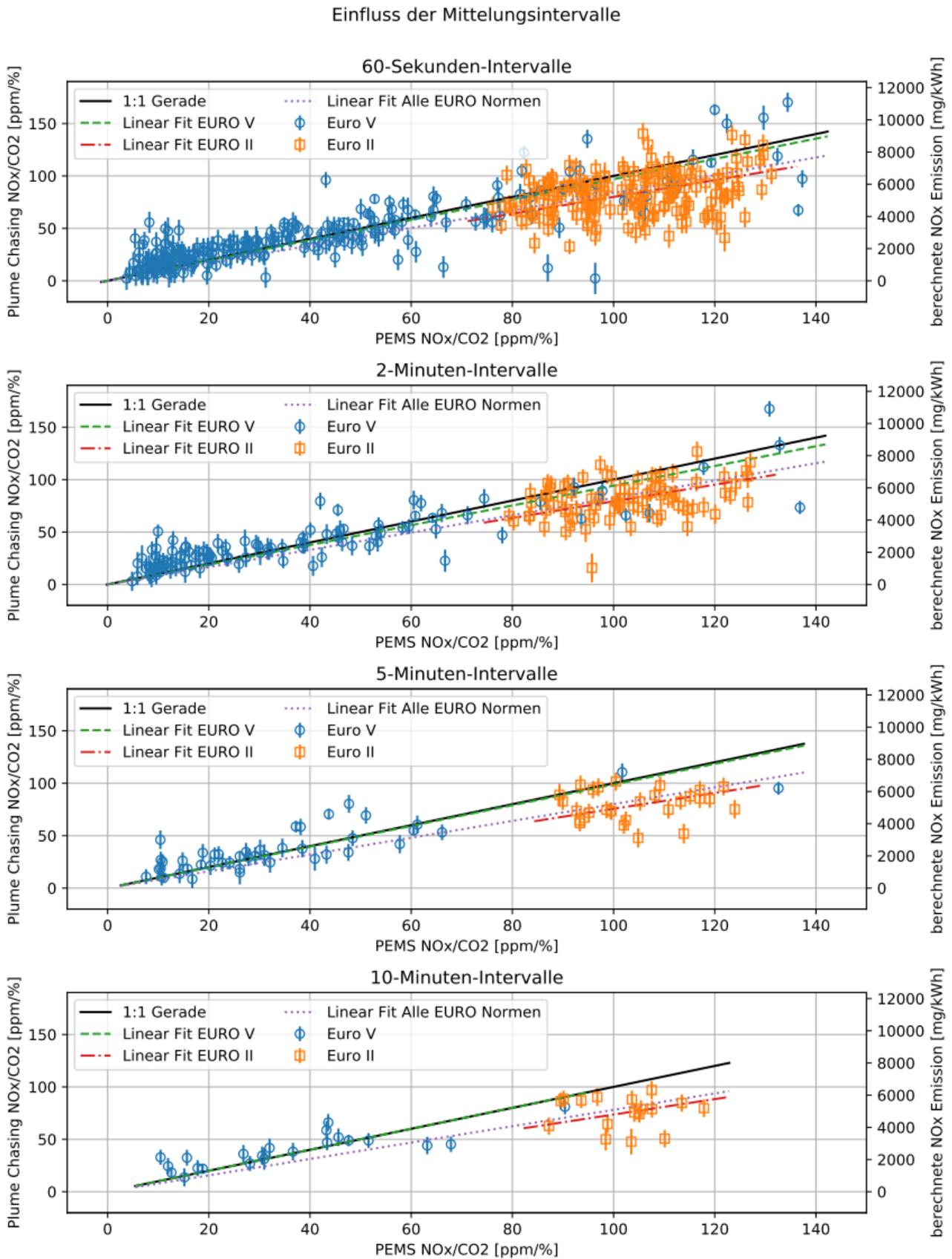


Abbildung 40: Korrelation für verschiedene Mittelungsintervalle

### 7.3. Einfluss verschiedener Mittelungsintervalle

Histogramme der absoluten Abweichung

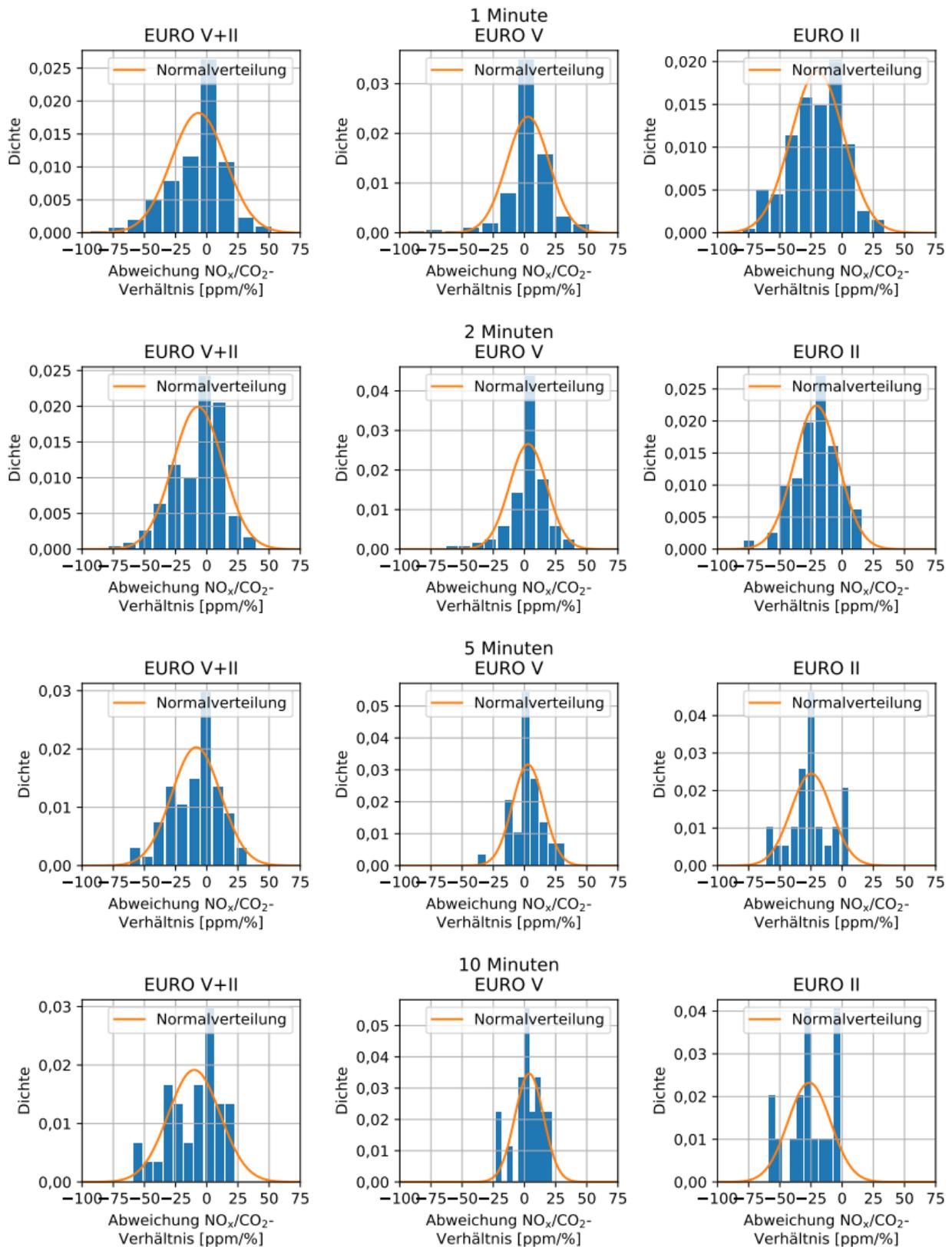


Abbildung 41: Histogramme der Abweichung der bestimmten Emissionsverhältnisse (NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>) für verschiedene Mittelungsintervalle

## 8. Abschließender Vergleich PEMS - Plume-Chasing

Die finalen Emissionsmessdaten vom PEMS und Plume-Chasing-Verfahren werden in diesem Abschnitt verglichen. Diese basieren auf dem gemessenen  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Emissionsverhältnis, welches auch in einen  $\text{NO}_x$ -Emissionswert [mg/kWh] umgerechnet werden kann (siehe Abschnitt 3.3.3). Durch Korrelationen werden dabei die Übereinstimmung beider Messmethoden unter unterschiedlichen Bedingungen betrachtet. Für die Datenauswertung beider Messsysteme wurden für diesen abschließenden Vergleich folgende Datenauswerteparameter und Filter angewendet:

- Messungen am EURO VI LKW wurden verworfen (siehe Untersuchung und Begründung Abschnitt 7.1)
- Die Untersuchung des Streckenabschnitts Stadt war nicht Ziel dieser Studie, trotzdem wurden, wenn sich die Gelegenheit ergab, Messwerte aufgenommen, diese werden in den Korrelationen aber nicht berücksichtigt (siehe Abschnitt 8.3.5)
- In den Rohdaten des PEMS wurden alle Messpunkte, die weniger als 1 %  $\text{CO}_2$  aufweisen, gefiltert (siehe Abschnitt 7.2.3), Dopplungen und Verschiebung eliminiert (siehe Abschnitt 7.2.4)
- Bei den Plume-Chasing-Messungen erfolgte die Bestimmung der Hintergrundkonzentration nach Methode 2 (M2), die vergleichbar mit der bisherigen Standardmethode ist (siehe Abschnitt 5.4.2 und 5.5).
- Beim Plume-Chasing-Verfahren erfolgte eine Datenfilterung für ein Mindestsignal in der Abgasfahne von  $\Delta\text{CO}_2 = 30$  ppm.
- Die Messdaten beider Systeme werden auf Zwei-Minuten-Intervalle gemittelt (siehe Abschnitt 7.3)

Die Korrelation aller Messwerte beider Systeme liefert eine gute Übereinstimmung mit ähnlichen Emissionsdaten trotz der sehr unterschiedlichen Messmethoden, der recht kurzen Messzeit von je zwei

## 8. Abschließender Vergleich PEMS - Plume-Chasing

Minuten und der sehr großen Variation an Messbedingungen (Abbildung 42 und Tabelle 8.1).

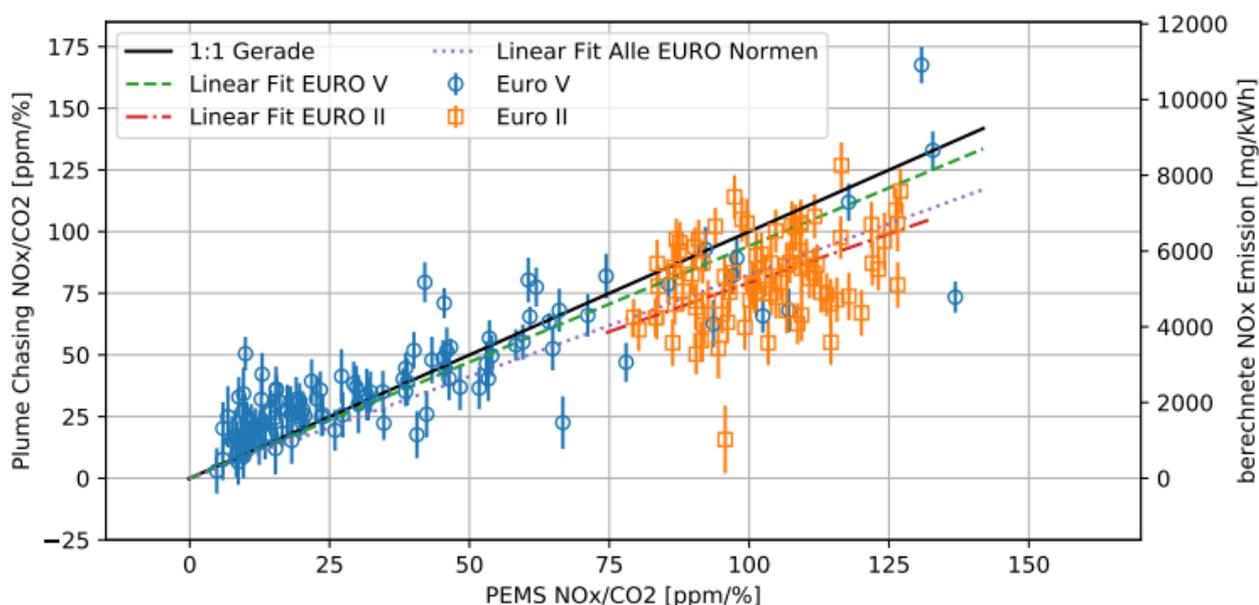


Abbildung 42: Korrelation der gemessenen  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnisse aller Messdaten (Zwei-Minuten-Intervalle) zwischen den beiden Messmethoden.

EURO-Norm	Korrelationsparameter	
	R-Wert	Steigung
Alle Daten (EURO V und II)	0,88	0,83
nur EURO V	0,87	0,94
nur EURO II	0,33	0,79

Tabelle 8.1: Korrelation des  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnisses aller Messdaten und nach EURO-Norm getrennt. Aufgrund der geringen Streuung der Messwerte für eine einzelne EURO Klasse ergeben sich hierfür scheinbar schlechtere Korrelationen.

Die gute Korrelation mit hohem R-Wert zeigt, dass mit Plume-Chasing niedrige und hohe Emissionswerte verlässlich ermittelt werden können. Die Werte sind mit den Ergebnissen des PEMS vergleichbar. Es erfolgte zu keinem Messpunkt eine deutliche Überschätzung der Emission durch das Plume-Chasing-Verfahren. Einzelne Ausreißer, die vor allem die Emissionen

## 8. Abschließender Vergleich PEMS – Plume-Chasing

unterschätzen, sind auf schwache Messsignale im Plume-Chasing und somit auf mögliche Einflüsse anderer Abgasfahnen zurückzuführen (Abschnitt 7.2.2).

Die Steigung von 0,83 ( $< 1$ ) deutet im Mittel auf eine leichte Unterschätzung der Emission beim Plume-Chasing im Vergleich zu PEMS hin. Bei sehr geringen Emissionswerten ( $\text{NO}_x/\text{CO}_2 < 30 \text{ ppm}/\%$ ) liefert Plume-Chasing leicht höhere Emissionswerte. Dies könnte durch eine Unterschätzung durch das PEMS entstehen (ähnlich zu EURO VI LKW siehe Abschnitt 6.4). Eine Überschätzung durch Plume-Chasing ist jedoch nicht auszuschließen, da die Emissionen von anderen Fahrzeugen, vor allem mit im Mittel höheren Emissionsverhältnissen, die Messung beeinflussen. Bei hohen Emissionen ( $\text{NO}_x/\text{CO}_2 > 70 \text{ ppm}/\%$ ) weist Plume-Chasing geringere Emissionen auf, evtl. ebenfalls durch andere Abgasfahnen oder durch eine Überschätzung der Emissionswerte durch Querempfindlichkeiten anderer Stoffe beim PEMS (vor allem beim EURO II LKW). Die Schlussfolgerungen aus diesen Abweichungen für die Emissionsmessungen sind in Abschnitt 10 diskutiert.

Die Korrelationsparameter einer einzelnen EURO-Norm liefern, vor allem für den EURO II, deutlich schlechtere Übereinstimmungen. Ursache ist, dass in diesem Fall die Emissionswerte wenig variieren, und sich deswegen durch die geringe Streuung der Werte kein verlässlicher R-Wert bestimmen lässt. In Tabelle 8.2 sind die aus dem  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Emissionsverhältnis berechneten  $\text{NO}_x$ -Emissionen (Abschnitt 3.3.3) nach EURO-Norm zusammenfassend aufgetragen. Die Emissionswerte liegen für diese Fahrzeuge im Rahmen der Erwartungen. Für den EURO V LKW ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen die innerhalb der Kalibriergenauigkeiten der Systeme liegt. Plume-Chasing liefert entsprechend im Mittel die gleichen Emission wie das PEMS. Während beim EURO II LKW der mittlere Plume-Chasing-Emissionswert um ca. 25% geringer liegt. Dies wird im Abschnitt 8.2.2 detaillierter diskutiert.

## 8. Abschließender Vergleich PEMS – Plume-Chasing

EURO-Norm	Emission	Mittlere Emission Plume-Chasing	Mittlere Emission PEMS	Grenzwert Zulassung
EURO V	NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	38,8	37,4	30,7
	entspricht NO <sub>x</sub> [mg/kWh]	2527	2438	2000
EURO II	NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	75,6	101,6	107,5
	entspricht NO <sub>x</sub> [mg/kWh]	4975	6618	7000

Tabelle 8.2: NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis und berechnete NO<sub>x</sub>-Emissionen (Abschnitt 3.4.3) nach EURO-Norm, über alle Messungen gemittelt.

### 8.1. Histogramm Abweichungen

Eine Betrachtung der absoluten Abweichungen der Messwerte im Histogramm ist in Abbildung 43 dargestellt und in Tabelle 8.1.1 zusammengefasst.

Absolute Abweichung Histogramme

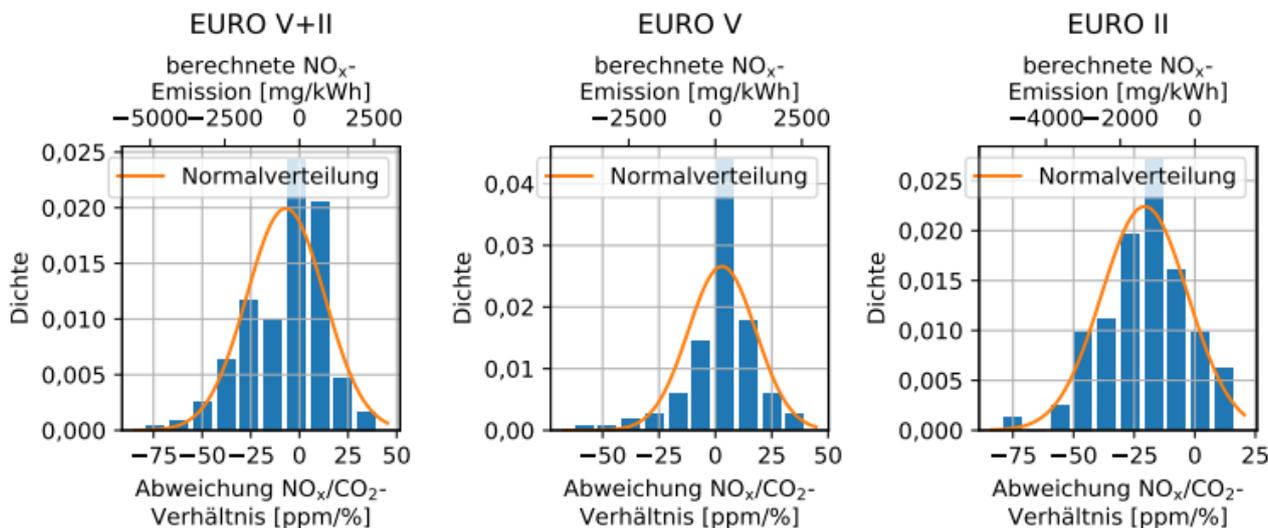


Abbildung 43: Histogramme der absoluten Abweichung zwischen PEMS und Plume-Chasing in NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> [ppm/%]

## 8.1. Histogramm Abweichungen

EURO-Norm	Mittlere Abweichung		Mittlere Streuung	
	NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	entspricht NO <sub>x</sub> [mg/kWh]	NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> [ppm/%]	entspricht NO <sub>x</sub> [mg/kWh]
EURO V + EURO II	-7,1	-460	±20,0	±1303
nur EURO V	+3,0	+193	±15,0	±976
nur EURO II	-20,7	-1346	±17,8	±1159

*Tabelle 8.1.1: Korrelationsdaten der Histogramme*

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Mittelwerte, vor allem beim EURO V LKW mit nur minimaler Überschätzung vom Plume-Chasing mit 2,97 ppm/% im NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis. Beim EURO II LKW tritt im Mittel eine Unterschätzung vom Plume-Chasing auf, was jedoch ebenfalls durch eine Überschätzung vom PEMS durch die erwähnten Querempfindlichkeiten verursacht sein kann.

Die mittlere Streuung zwischen den Messwerten beider Messsysteme für einen einzelnen Datenpunkt beträgt 20 ppm/%, für EURO V LKW alleine betrachtet 15 ppm/% und EURO II LKW 17,8 ppm/%. Dies entspricht einer Streuung im berechneten Emissionswert von 1303 mg/kWh, für den EURO V LKW alleine betrachtet 976 mg/kWh und EURO II LKW 1159 mg/kWh.

Die relative Streuung eines einzelnen Datenpunktes im Verhältnis zum Mittelwert liegt dadurch für den EURO V LKW durch dessen geringere Emission bei 74 %, beim EURO II LKW bei 17 %.

Die nahezu gaußverteilte Streuung um den Mittelwert zeigt eine gute statistische Verteilung. Weitere Analysen zum Fehler bei verschiedener Dauer der Mittelungsintervalle finden sich in Abschnitt 7.3. Ein systematischer Fehler in der Plume-Chasing-Messmethode ist hier nicht zu erkennen. Die unterschiedlichen Streuungen für EURO V und EURO II deuten jedoch auf andere zusätzliche Einflüsse bei der Messung, z.B. mögliche Querempfindlichkeiten zu anderen Stoffen im Abgas beim PEMS Messverfahren.

## 8.2. Messzeitreihen

Im Folgenden werden die EURO V und EURO II LKW-Zeitreihen genauer betrachtet.

### 8.2.1. Zeitreihen EURO V LKW

In den Runden 7 bis 10 erfolgten Messungen am EURO V LKW.

In Runde 7 sind zu Beginn Kaltstarteffekte zu erkennen (Abbildung 44). Ähnliches konnte beim EURO VI LKW (Abschnitt 7.1.1, Abbildung 28) beobachtet werden. Nach einem ca. zehnmütigen Warmlaufen pendeln sich die Emissionswerte bei 25 ppm/%  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  ein, was einem berechneten Emissionswert von knapp 2000 mg/kWh entspricht.

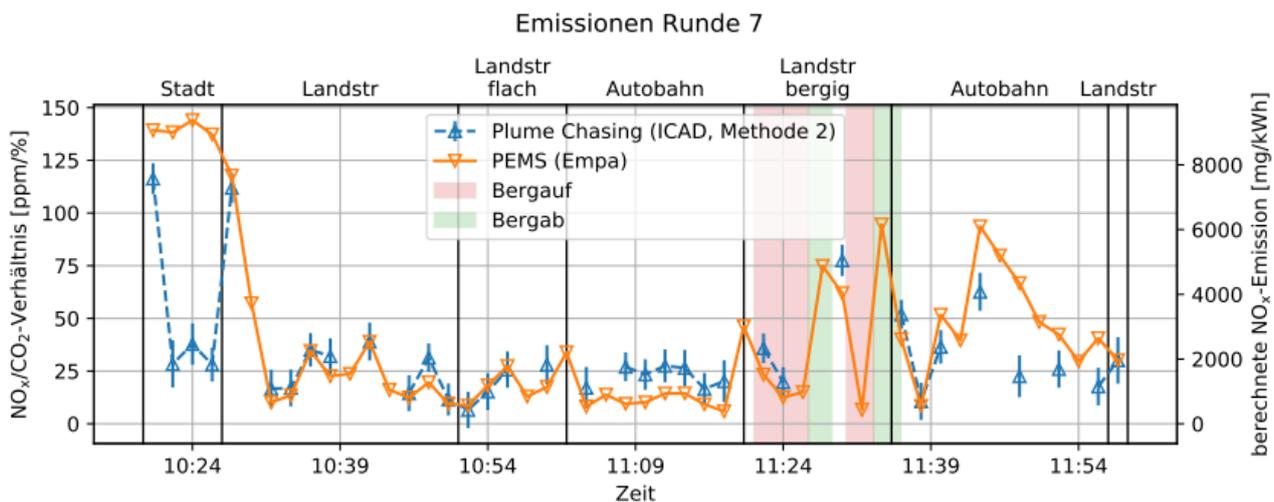


Abbildung 44: Emissionen Runde 7, EURO V

Eine gute Übereinstimmung der Zeitverläufe ist sichtbar. Im anfänglichen Stadtverkehr kann das Plume-Chasing-Verfahren die hohen Emissionswerte wegen des dichten Verkehrs, der geringen Fahrgeschwindigkeit im Stop-and-Go und der damit verbundenen Einflüsse anderer Verkehrsteilnehmer nicht verlässlich bestimmen. Hier kommt die Emissionsfahne des LKW kaum bis zum Plume-Chasing-Messfahrzeug. Während der eigentlichen Messfahrt (ab Landstraße) spiegeln beide Systeme die Dynamik der Emissionen im  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis gut wider.

## 8.2. Messzeitreihen

Es sei darauf hingewiesen, dass relative Emissionen im  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis mit der Absoluten  $\text{NO}_x$ -Emission in  $\text{mg}/\text{kWh}$  korrelieren, jedoch nicht mit den absoluten Emissionen in  $\text{mg}/\text{km}$ . So kann die relative Emission bei einer Bergabfahrt hoch liegen, da  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei sehr geringen  $\text{CO}_2$ -Emissionen auftreten (kaum Kraftstoffverbrauch), die  $\text{NO}_x$ -Emission in  $\text{mg}/\text{kWh}$  sind dementsprechend ebenfalls hoch, während die absolute Emission in  $\text{mg}/\text{km}$  gering sind.

In Runde 8 (Abbildung 45) wurde die gleiche Messung wiederholt jedoch mit direkten Start an der Landstraße.

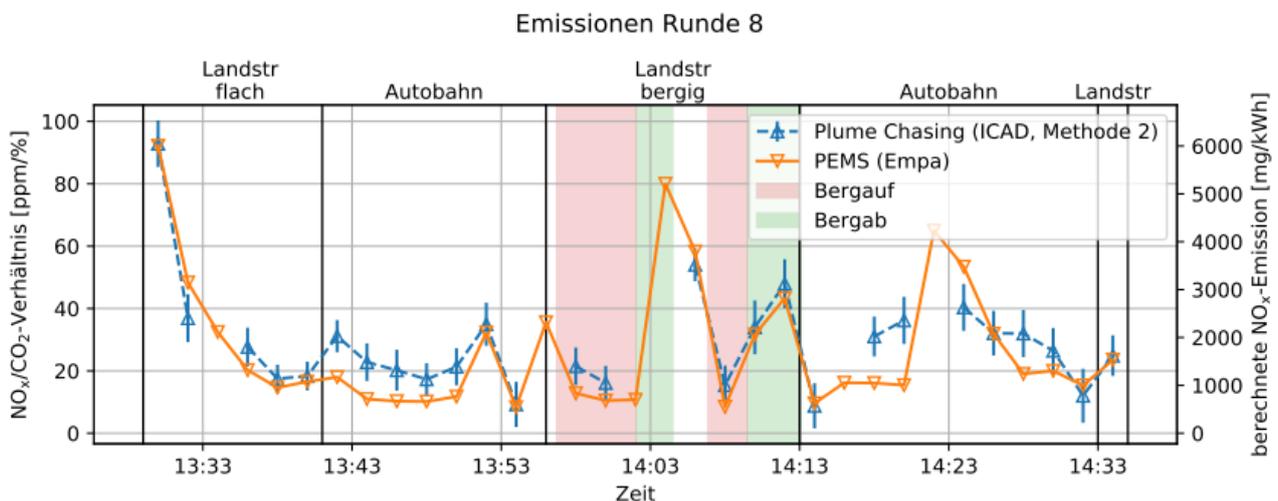


Abbildung 45: Emissionen Runde 8, EURO V

Wieder sind erhöhte Emissionen durch Kaltstarteffekte zu Beginn der Fahrt zu erkennen, die in diesem Fall auf dem Abschnitt Landstraße liegen. Hier liegt eine gute Übereinstimmung, auch für diesen Teil der Messungen vor. Es zeigt sich ein ähnlicher Verlauf vom  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis zu der vorherigen Runde 7. Für beide Messmethoden lassen sich in den einzelnen Streckenabschnitten gute Übereinstimmungen erkennen.

In Abbildung 46 ist die Runde 9 mit erhöhtem Fahrabstand zum EURO V LKW, ca. 30 bis 40 m, für die Plume-Chasing-Messung dargestellt.

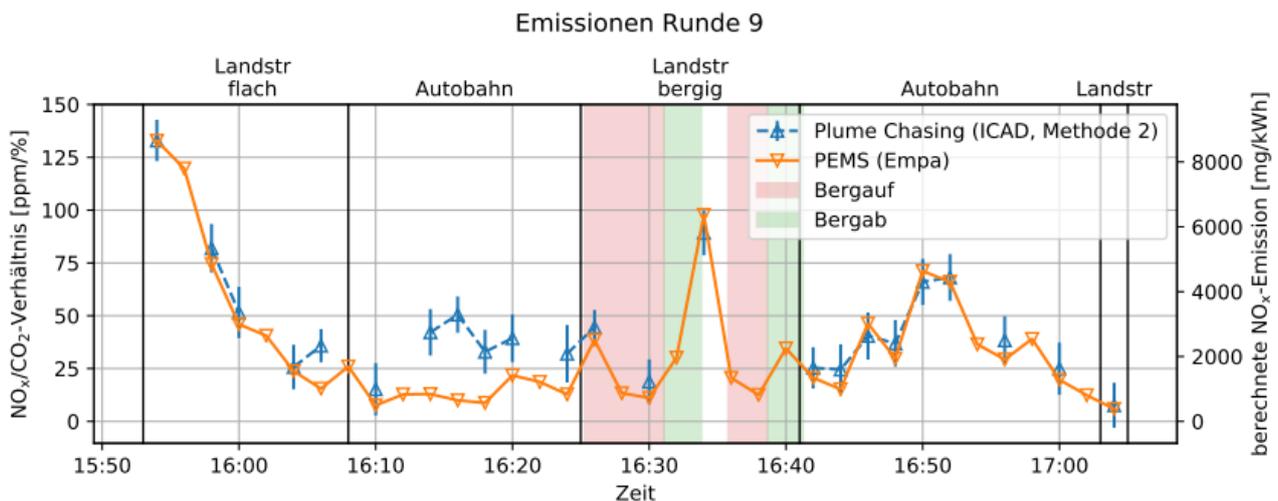


Abbildung 46: Emissionen Runde 9, EURO V, erhöhter Fahrabstand (30- 40m) Plume-Chasing

Im Vergleich zu den beiden vorherigen Runden 7 und 8 sind weniger Datenpunkte für die Plume-Chasing-Messung verfügbar, da durch das schwächere Messsignal weniger gültige Datenpunkte über dem Schwellwert von  $\Delta\text{CO}_2 = 30\text{ppm}$  detektiert werden. Es können trotzdem für ausreichend viele Zeitpunkte Emissionswerte bestimmt werden.

Zu Beginn sind auch bei dieser Runde wieder Kaltstarteffekte erkennbar. Trotz des vergrößerten Abstandes liefern das PEMS und Plume-Chasing vergleichbare Ergebnisse. Die Unterschiede für größeren Abstand werden in Abschnitt 8.5 analysiert.

Bei der letzten Messung mit einem EURO V LKW, Runde 10, wurden nach Möglichkeit seitliche Messungen durchgeführt (siehe Abschnitt 8.4). Auch hier scheinen beide Messgeräte ähnliche Werte zu liefern mit guter Übereinstimmung zwischen PEMS und Plume-Chasing. Die Dynamik der Messwerte wird ebenfalls von beiden Geräten gut wiedergegeben.

## 8.2. Messzeitreihen

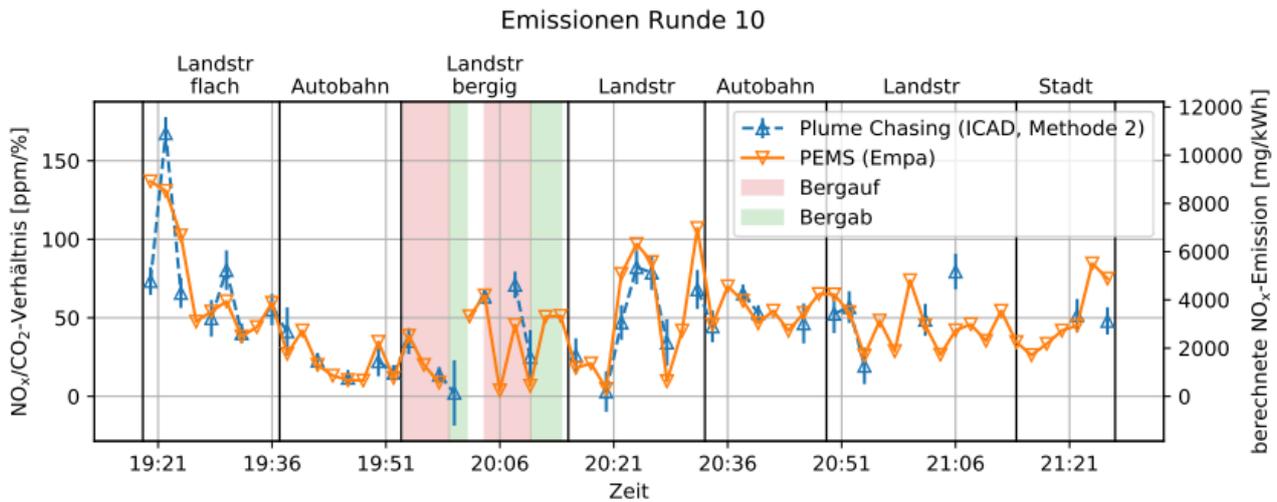


Abbildung 47: Emissionen Runde 10, EURO V. Zwischendurch wurden bei dieser Runde seitliche Messungen nahe am Auspuff mit Plume-Chasing durchgeführt (siehe Abschnitt ).

### 8.2.2. Zeitreihen EURO II LKW

In Abbildung 48 bis Abbildung 50 sind die Zeitreihen des LKWs der EURO II Norm dargestellt, der keine  $\text{NO}_x$ -Abgasreinigung aufweist. Es sind hier deutlich mehr Messwerte für das Plume-Chasing als noch bei EURO V (und EURO VI) in den Zeitreihen zu finden. Ein Grund hierfür könnte die geringere Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Leerlauf und die kürzere Baulänge des LKWs sein. Die großen Fehlerbalken an den Plume-Chasing-Messdaten, deuten einen höheren Fehler an (siehe Abschnitt 5.3). Grund ist ein meist nur schwaches  $\Delta\text{CO}_2$ -Signal der Abgasfahne bedingt durch die deutlich geringere Leistung dieses LKW. Generell gab es mit dem durchgeführten Plume-Chasing Aufbau in allen Runden des EURO II LKW Schwierigkeiten gut in die Abgasfahne zu gelangen, daher ergaben sich unter anderem die wenigen Messpunkte bei der Runde mit erhöhtem Abstand sowie die vergleichsweise großen Fehlerbalken, die durch den Qualitätsfaktor berechnet werden (siehe Abschnitt 5.3)

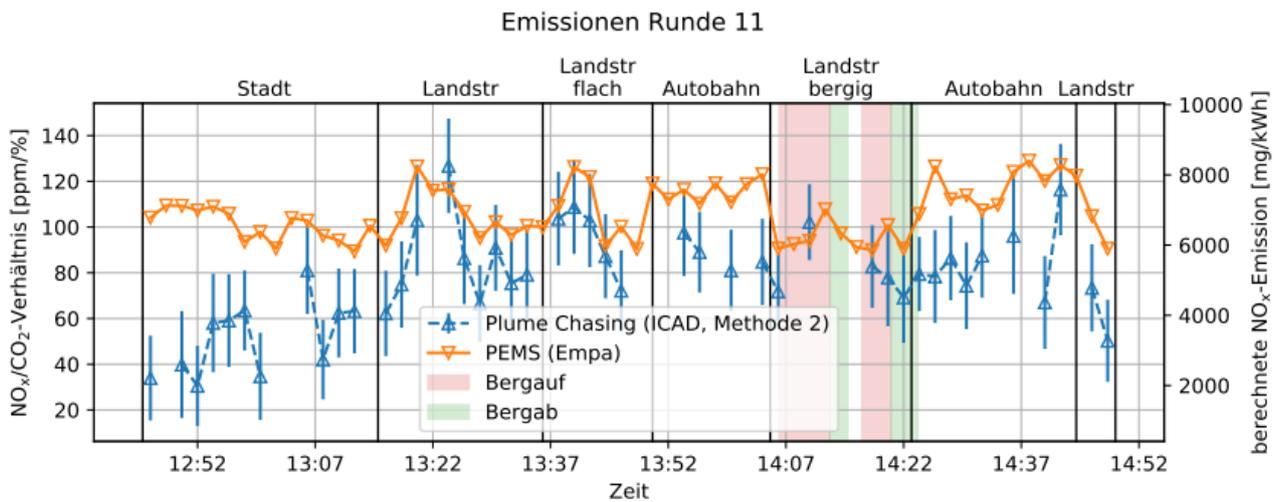


Abbildung 48: Emissionen Runde 11, EURO II

In der Messreihe in Runde 11 (Abbildung 48), ermittelte das PEMS recht konstante, jedoch hohe, Werte für das  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Emissionsverhältnis. Wie zu erwarten, sind hier keine Kaltstarteffekte zu erkennen, da keine  $\text{NO}_x$ -Abgasreinigung vorhanden ist.

Bei dem bestimmten  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Emissionsverhältnis ist hier eine Unterschätzung vom Plume-Chasing gegenüber dem PEMS zu erkennen. Hohe Abweichungen treten im Stadtverkehr bei sehr dichtem Verkehr (mit viel Stau) auf. Auf der eigentlichen Teststrecke mit Landstraße und Autobahn ist der Unterschied zwar geringer aber trotzdem liegen die mit Plume-Chasing ermittelten Werte konstant unter denen des PEMS. Untersuchungen an beiden Geräten konnten keinen Aufschluss hierzu liefern. Einerseits kann es zu einer Unterschätzung im Plume-Chasing durch andere Emissionen in der Umgebung kommen, die tendenziell geringere Emissionsverhältnisse (weniger  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ ) aufweisen. Dem widerspricht jedoch, dass auf der Landstraße über größere Abschnitte kein weiterer Verkehr anzutreffen war, und auch für diese Strecken die Messungen eine ähnliche Diskrepanz aufweisen. Andererseits ist eine Überschätzung der Emissionen im PEMS ebenfalls denkbar (siehe Abschnitt 6).

## 8.2. Messzeitreihen

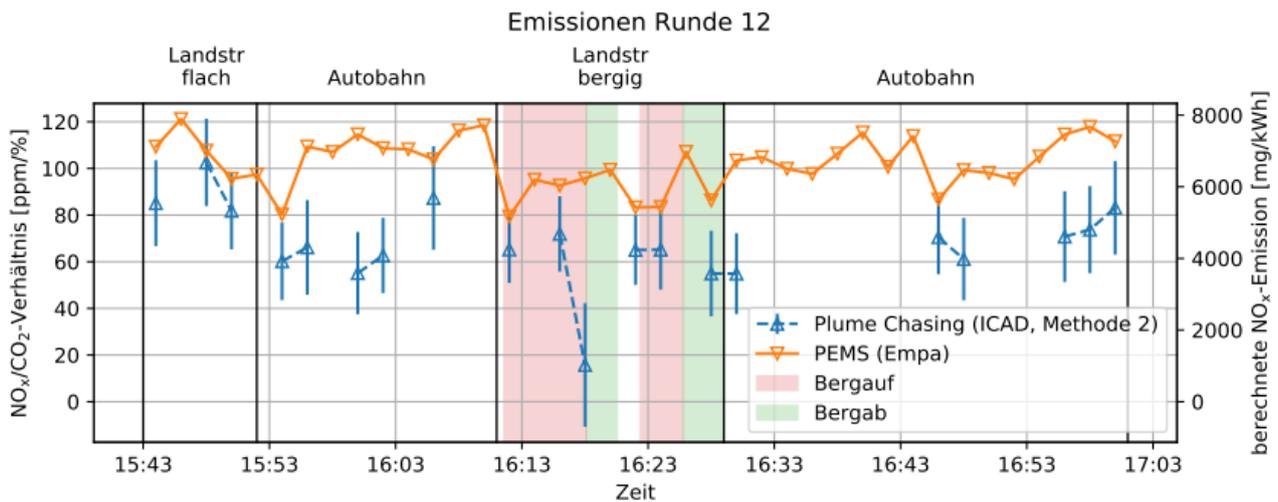


Abbildung 49: Emissionen Runde 12, EURO II, erhöhter Fahrabstand (30-40m) Plume-Chasing

In Runde 12 (Abbildung 49) erfolgte eine weitere Messung des EURO II LKW mit erhöhtem Abstand von ca. 30 bis 40 m für die Plume-Chasing-Messung. Dabei konnten deutlich weniger gültige Datenpunkte bestimmt werden. Die große Lücke zwischen 16:30 und 16:45 kam durch einen Stau zustande. Ansonsten ergibt sich ein ähnlicher Verlauf mit vergleichbaren Abweichungen beider Messmethoden, jedoch treten durch das schwächere Messsignal im Plume-Chasing eher Ausreißer mit geringeren  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis auf.

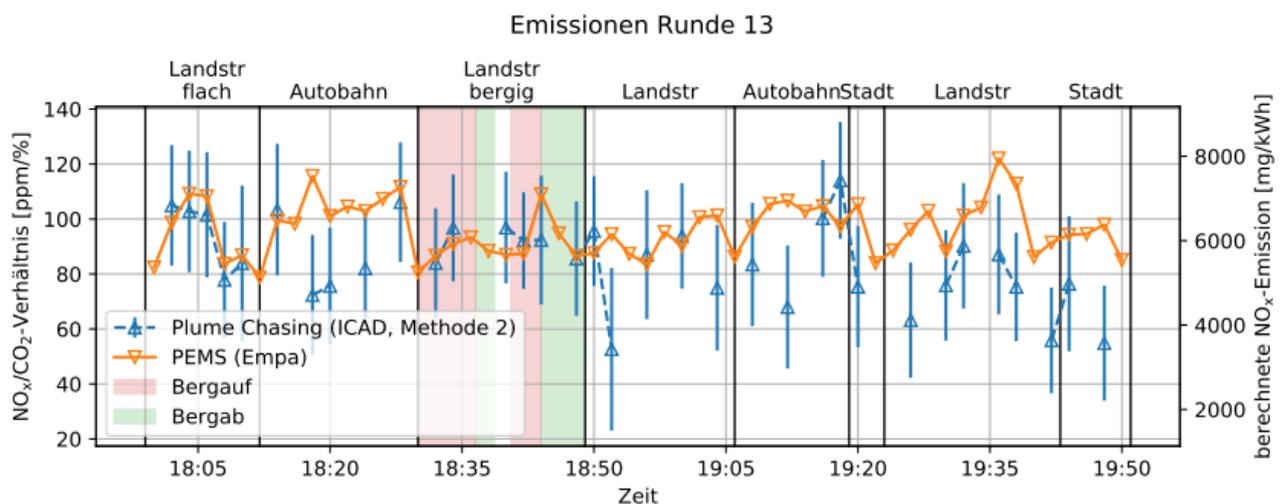


Abbildung 50: Emissionen Runde 13, EURO II

Bei der letzten Messfahrt, Runde 13, konnten wieder bei normalem Abstand (15-25 m) mehr Messwerte für das Plume-Chasing bestimmt werden (Abbildung 50). Allerdings sind die Fehlerbalken vergleichsweise groß. Die Unterschiede beider Messverfahren scheinen bei dieser Fahrt geringer zu sein. Mögliche Ursachen können hier nur vermutet werden. Einerseits könnte durch den geringeren Verkehr der Einfluss anderer Emissionen auf das Plume-Chasing-Verfahren geringer sein. Dem widerspricht jedoch der größere Unterschied zum Ende der Runde 13, bei der der Verkehr aber weiter abgenommen hatte (ersichtlich aus Dashcam-Aufnahmen). Daher ist ein ändernder Einfluss von Querempfindlichkeiten beim PEMS naheliegend (siehe Abschnitt 6).

### **8.3. Vergleich nach Streckenabschnitt**

Hier wird auf die Korrelation und Übereinstimmung nach Streckenabschnittstyp eingegangen, um so den Einfluss auf die Messgenauigkeit für verschiedene Straßentypen mit unterschiedlichem Verkehr und Geschwindigkeiten untersuchen zu können. So soll aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen die beste Genauigkeit für Plume-Chasing-Messungen an LKW erreicht wird. Die zu den Abbildungen gehörenden Korrelationsdaten sind in Tabelle 8.3.2 beziehungsweise Tabelle 8.3.3 aufgetragen.

#### **8.3.1. Landstraße (sonstige)**

Dieser Abschnitt betrachtet den Streckentyp Landstraßen ohne die Streckenabschnitte bergige und ebene Landstraße (siehe dazu Abschnitt 8.3.2 bzw. 8.3.3).

Bei der Landstraße sind die Messbedingungen geprägt von mäßigen Fahrgeschwindigkeiten. Die Datenpunkte liegen recht gut um die Winkelhalbierende (siehe Abbildung 51).

### 8.3. Vergleich nach Streckenabschnitt

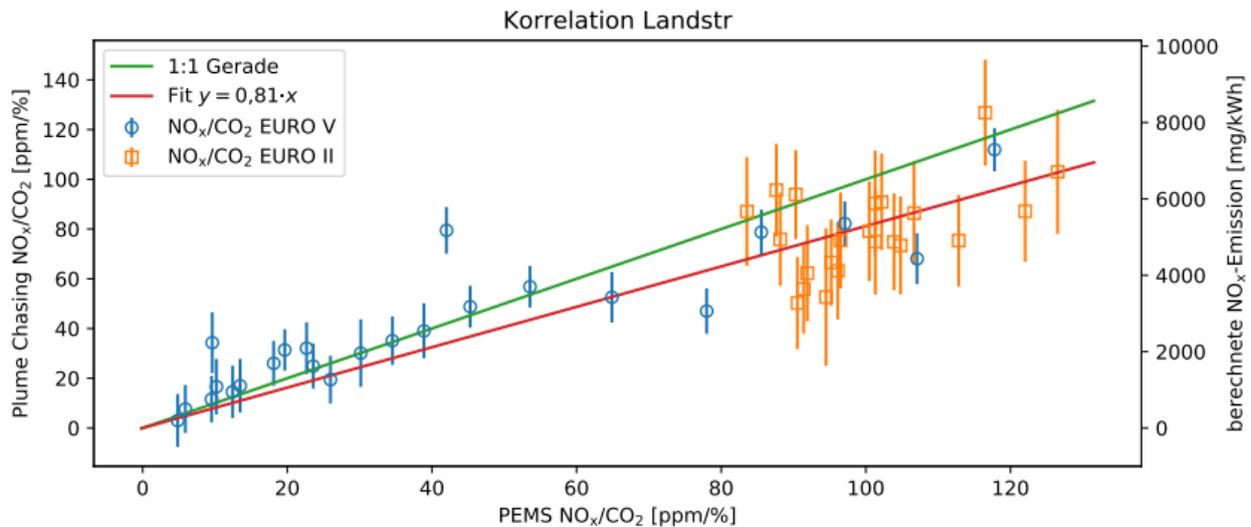


Abbildung 51: Korrelation für Streckenabschnitt Landstraße (sonstige)

Es sind keine wesentlichen Ausreißer und Abweichungen der Messungen zu sehen. Im Vergleich zu den folgenden Streckenabschnitten scheinen hier aber vor allem für den EURO II LKW die Emissionen durch Plume-Chasing noch etwas stärker unterschätzt zu werden. Insgesamt kann Plume-Chasing auf der Landstraße sehr gut die Emissionsdaten bestimmen. In beiden Messdaten zeigt sich, dass auf der Landstraße die Emissionsverhältnisse beim EURO V LKW bereits über einen großen Bereich variieren (von unter 5 ppm/% bis 120 ppm/%).

#### 8.3.2. Landstraße (bergig)

Hier wird der Streckenabschnitt der bergigen Landstraße untersucht (Abbildung 52). Die bergige Landstraße wurde nochmal unterteilt, in einen Bereich, in dem bergauf, und einen Bereich, in dem bergab gefahren wurde. Die Messung am EURO V LKW liefert hier sehr gute Übereinstimmungen.

Die Korrelation für den EURO II LKW wird durch einen Ausreißer (Unterschätzung durch das Plume-Chasing) bei einer Bergabfahrt gestört (mit Stern markierter Wert in Abbildung 52; Runde 12; 16:18 bis 16:20, stammt aus der Zeitreihe in Abbildung 49).

### 8.3. Vergleich nach Streckenabschnitt

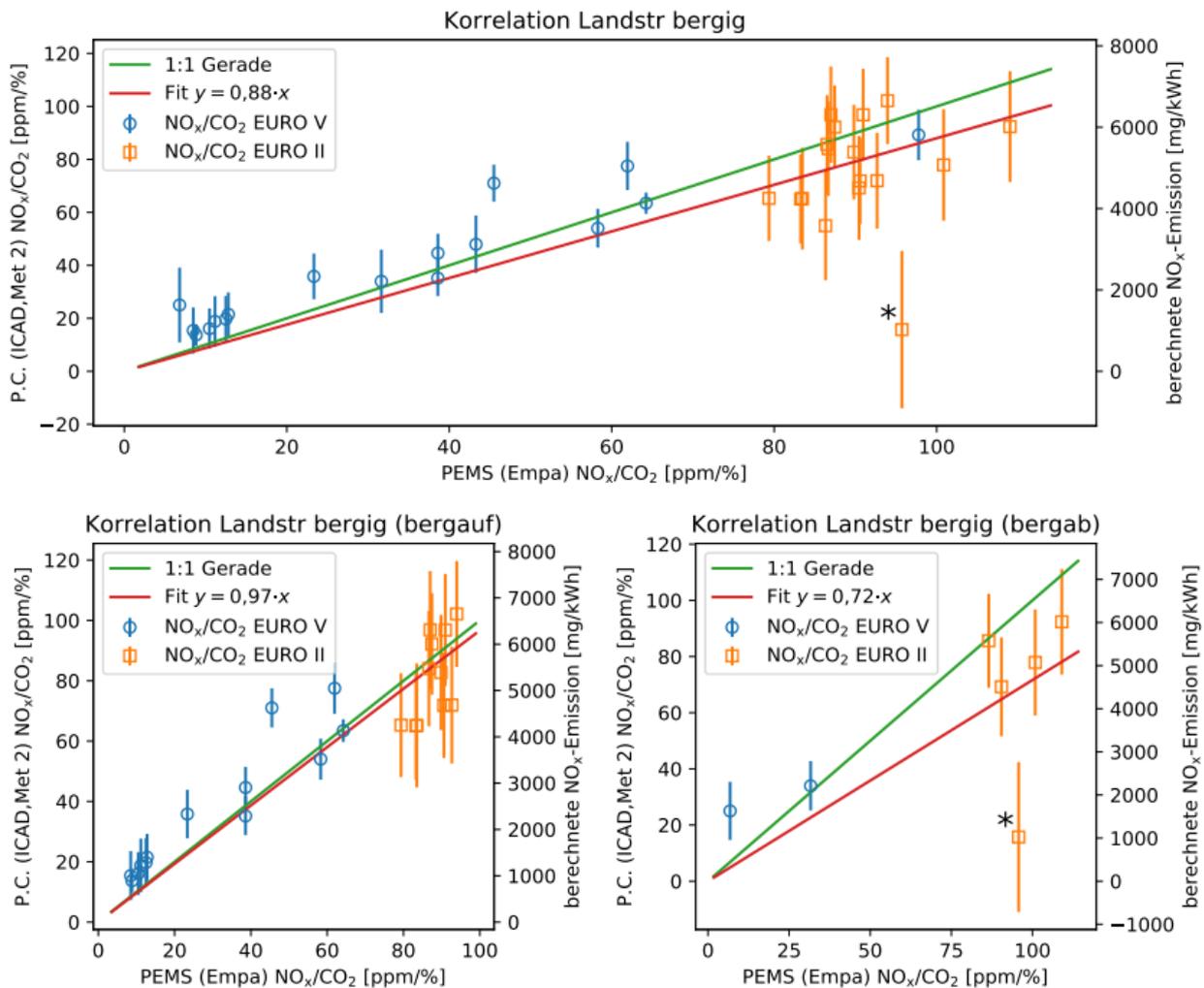


Abbildung 52: Korrelation für Streckenabschnitt Landstraße (bergig). Untere Korrelationsplots zeigen die Fahrt bergauf (links) und bergab (rechts).

Abweichungen zwischen PEMS und Plume-Chasing traten bei Bergabfahrten häufiger auf, allerdings wurden diese Werte, bis auf den markierten Messwert, gewöhnlich vom CO<sub>2</sub>-Filter (siehe Abschnitt 7.2.3) als ungültig bewertet und nicht beachtet. Der kurzzeitige CO<sub>2</sub>-Peak, der durch kurzzeitiges Gasgeben (bestimmt aus PEMS-Daten) bei dieser Bergabfahrt entstand führt hier auch zu keiner Filterung dieses Datenpunktes durch die  $\Delta\text{CO}_2 = 30 \text{ ppm}$  Anforderung an das Plume-Chasing.

Bei Bergauffahrten sollte durch den hohen Kraftstoffverbrauch und dementsprechend hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen eine gute Messung in der

### 8.3. Vergleich nach Streckenabschnitt

Abgasfahne durch das Plume-Chasing möglich sein. Die Korrelation zeigt hier wie erwartet eine sehr gute Übereinstimmung ohne Ausreißer.

#### 8.3.3. Landstraße (flach)

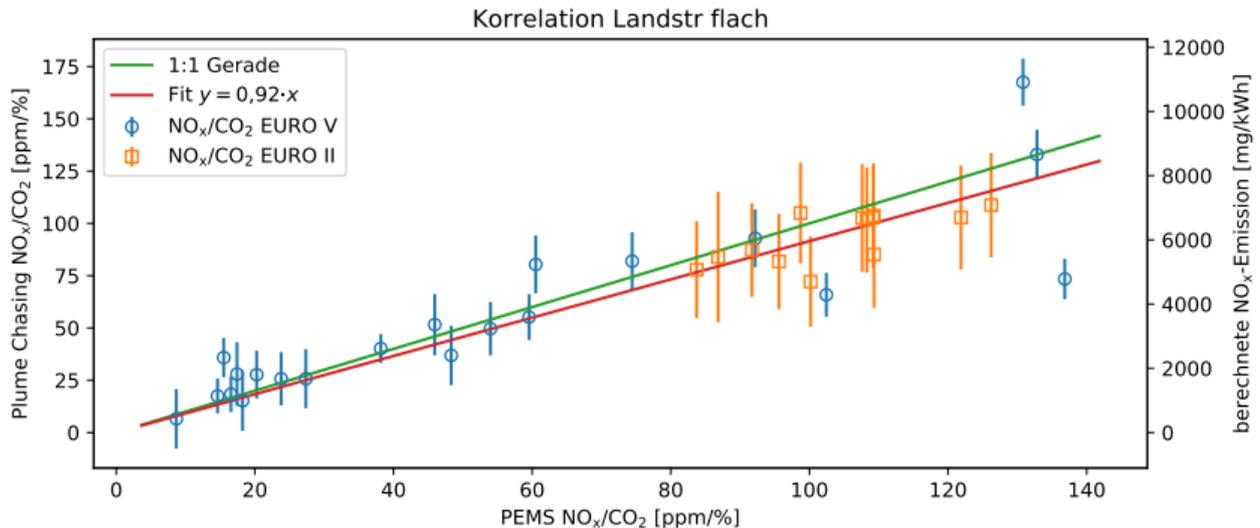


Abbildung 53: Korrelation für Streckenabschnitt Landstraße (flach)

Zusätzlich zur bergigen Landstraße wurden auch noch die Emissionen auf einem separaten, flachen Abschnitt Landstraße mit geringem Verkehrsaufkommen untersucht. Hier konnte erwartungsgemäß auch eine sehr gute Übereinstimmung erreicht werden, da auf Landstraßen der Einfluss der Störfaktoren durch andere Verkehrsteilnehmer vergleichsweise gering ist.

Die Korrelation zeigt nur wenige Ausreißer bei hohen Emissionen. Ansonsten liegen die Messwerte gut um die 1:1 Gerade, insbesondere lässt sich hier auch eine sehr gute Korrelation bei dem EURO II LKW erkennen, was evtl. auch durch die sehr konstante Fahrt auf diesem Abschnitt, und damit ein anderes Emissionsverhalten zurückzuführen ist.

### 8.3.4. Autobahn

Auf der Autobahn kommt es zu größeren Abweichungen (siehe Abbildung 54), weil hier verstärkt Störfaktoren auftreten, wie Abgasfahnen anderer Fahrzeuge oder Turbulenzen hinter dem Fahrzeug, die die Plume-Chasing-Messung erschweren. Gerade bei niedrigen Konzentrationen zeigt sich auch beim EURO V LKW eine leichte Überschätzung durch die Plume-Chasing-Messung. Dies könnte aber auch auf die Probleme des PEMS bei niedrigen Konzentrationen zurückzuführen zu sein (siehe EURO VI in Abschnitt 7.1).

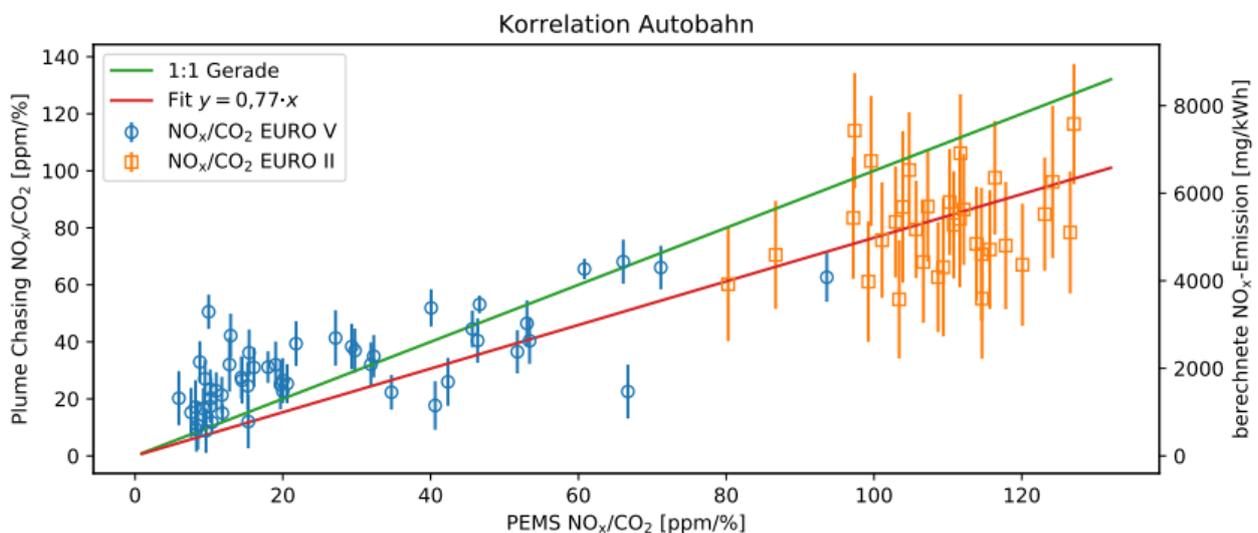


Abbildung 54: Korrelation für Streckenabschnitt Autobahn

### 8.3.5. Stadt (außerhalb der Untersuchung)

Da es beim Innenstadtverkehr schwierig ist, mit dem Plume-Chasing-Verfahren gut in der Abgasfahne zu messen, war der Stadtverkehr nicht Teil der Teststrecke. Dennoch wurde die Gelegenheit bei Hin- und Rückfahrt zur Teststrecke genutzt, um Messwerte für den Stadtverkehr in Heidelberg aufzunehmen. Erwartungsgemäß zeigt der Vergleich eine sehr schlechte Übereinstimmung der Messsysteme (siehe Abbildung 55 und Tabelle 8.3.1). Probleme tauchen hier wegen geringer Motorleistung (geringen Emissionen pro Zeit) und geringer Geschwindigkeit bei ständigem Stop-and-Go-Verkehr (Stau) auf, wodurch nur schwer in der Abgasfahne des LKWs gemessen

### 8.3. Vergleich nach Streckenabschnitt

werden konnte. Auch andere Störfaktoren, beispielsweise das hohe Verkehrsaufkommen mit mehrspurigen Straßen in Heidelberg, haben Einfluss auf die Messergebnisse, da so Emissionen anderer Fahrzeuge auf der Nebenspur mit in die Abgasfahne einstreuen.

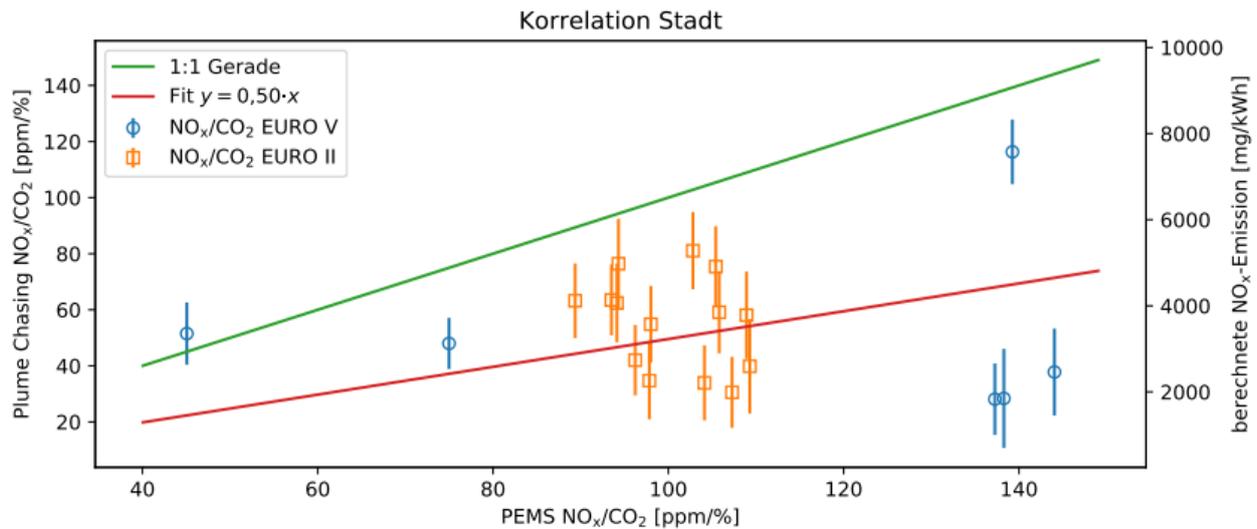


Abbildung 55: Korrelation für Streckenabschnitt Stadt

EURO-Norm	Korrelationsparameter	
	R-Wert	Steigung
V+II	0,66	0,52
V	0,93	0,95
II	0,04	0,41

Tabelle 8.3.1: Korrelationsdaten für Streckenabschnitt Stadt

Die Werte werden daher hier nur der Vollständigkeit halber gezeigt und für die sonstigen Korrelationen in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt.

### 8.3.6. Zusammenfassung Streckenabschnitte

Streckenabschnitt		R-Wert	Steigung
Landstraße		0,89	0,81
Landstr. (bergig)	gesamt	0,83	0,88
	bergauf	0,93	0,97
	bergab	0,62	0,72
Landstr. (flach)		0,91	0,92
Autobahn		0,89	0,77

Tabelle 8.3.2: Korrelationsdaten der Streckenabschnitte für EURO V und EURO II. .

Streckenabschnitt		EURO Norm	R-Wert	Steigung
Landstraße		V	0,90	0,89
		II	0,48	0,79
Landstr. (bergig)	gesamt	V	0,95	1,07
		II	0,11	0,84
	bergauf	V	0,94	1,15
		II	0,59	0,93
	bergab	V	*	1,19
		II	0,19	0,71
Landstr. (flach)		V	0,88	0,94
		II	0,70	0,90
Autobahn		V	0,72	0,94
		II	0,20	0,74

Tabelle 8.3.3: Korrelationsdaten der Streckenabschnitte, aufgeschlüsselt nach EURO Norm. Die Korrelation aufgeschlüsselt nach EURO Norm ist mitunter gering, da nur eine sehr geringe Variation der Emission vor lag. \*Bei Bergabfahrt für EURO V sind nur zwei Messwerte vorhanden, daher kann kein sinnvoller Korrelationskoeffizient bestimmt werden.

## 8.4. Seitliche Messungen (nahe am Auspuff)

In Runde 10 wurden bei dem EURO V LKW mit einer Konstruktion (vgl. Abschnitt 4.1.1) seitliche Messungen durchgeführt, um so durch Nebenherfahren besser in die Abgasfahne nahe am Auspuff des zu untersuchenden LKWs zu gelangen. Da nun das Plume-Chasing-Messsignal

#### 8.4. Seitliche Messungen (nahe am Auspuff)

sehr stark ist, wurden hier bei der seitlichen Messung die Mittelungsintervalle von zwei Minuten auf 30 Sekunden verkürzt. Die Konzentrationen bei diesen Messungen lagen zwischen 217 und 3871 ppb NO<sub>x</sub> sowie zwischen 60 und 666 ppm ΔCO<sub>2</sub> (im Mittel 308 ppm) und damit ca. 200 ppm über den sonst üblichen Werten. In Abbildung 56 erkennt man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen PEMS und Plume-Chasing, die Messdaten liegen gut um die 1:1 Gerade verteilt. Auch die Korrelationsdaten mit einem Korrelationskoeffizienten von etwa 0,92 und einer Steigung von ca. 1,08 sind sehr zufriedenstellend, wobei das Plume-Chasing leicht höhere Emissionen bestimmt.

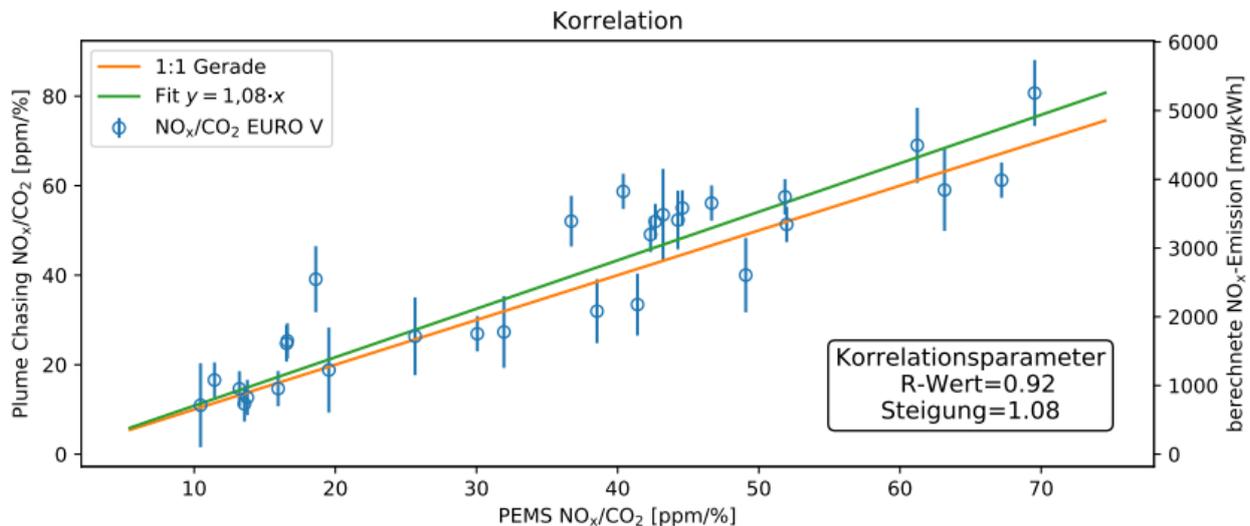


Abbildung 56: Korrelation Seitliche Messung

#### 8.5. Vergleich nach Fahrabstand

Im Rahmen der Messfahrten wurde auch der Fahrabstand zum LKW untersucht. Dazu wurde in Runde 9 (EURO V) und Runde 12 (EURO II) mit erhöhtem Abstand (30 bis 40 m) und in den sonstigen Runden eher mit kurzem Abstand (ca. 15 bis 25 m) zum LKW gemessen.

## 8.5. Vergleich nach Fahrabstand

EURO Norm	Größe	Kurzer Abstand (15 -25m)	Vergrößerter Abstand (30 - 40m)
V+II	R-Wert	0,88	0,80
	Steigung	0,83	0,76
Nur V	R-Wert	0,86	0,94
	Steigung	0,91	1,05
Nur II	R-Wert	0,32	0,27
	Steigung	0,83	0,68

Tabelle 8.5.1: Korrelationsdaten nach Abstand

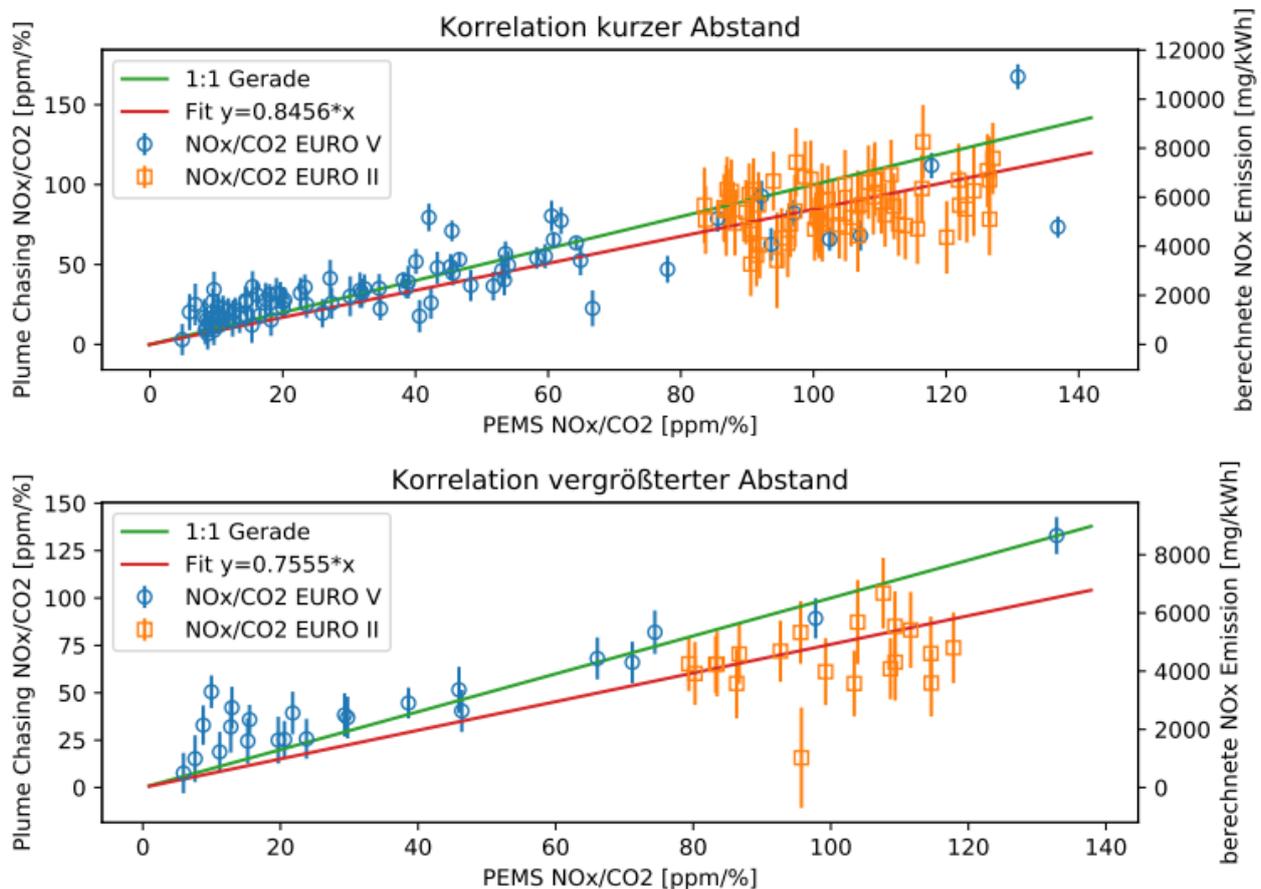


Abbildung 57: Korrelationsplots bei zwei Verschiedenen Fahrabständen der Plume-Chasing Messung; kurzer Abstand (15- 25m) und vergrößerter Abstand (30- 40m).

In Abbildung 57 ist der Vergleich graphisch dargestellt. Aus Tabelle 8.5.1 lässt sich für die Korrelation aller Daten sowie für die des EURO II LKWs erkennen,

## 8.5. Vergleich nach Fahrabstand

dass die Genauigkeit mit größerem Abstand (30- 40m) leicht abgenommen hat. Dies war zu erwarten, da es bei größerem Abstand schwieriger ist, in die Abgasfahne des LKWs zu gelangen. Die Abgasfahne des LKWs könnte sich zusätzlich bei größerem Abstand noch mit der Abgasfahne anderer Fahrzeuge vermischen.

Beim EURO V LKW hingegen lassen sich bei vergrößertem Abstand bessere Korrelationsdaten entnehmen. Dies könnte damit zusammenhängen, dass durch den vergrößerten Abstand nur  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei starken  $\text{CO}_2$ -Emissionen (und somit bei großer Leistung des LKWs) gemessen werden können, und insbesondere die Überschätzung bei niedrigen Emissionen weniger ins Gewicht fällt. Dies kann jedoch auch aufgrund der wenigen Datenpunkte zufällig sein. Denn es fällt auf, dass bei geringem Abstand bei kleineren  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnissen, Plume-Chasing vergleichbare Werte wie PEMS bestimmt, jedoch bei erhöhtem Abstand mehr Werte in diesem Bereich vom Plume-Chasing überschätzt werden.

Durch den vergrößerten Abstand konnten jedoch auch weniger gültige Emissionswerte mit dem Plume-Chasing-Verfahren bestimmt werden. Lag der Anteil an Messdaten bei kurzem Abstand bei 64 %, so lag dieser bei vergrößertem Abstand etwas tiefer bei 57 %. Insgesamt lässt sich keine wesentliche Verschlechterung der Übereinstimmung des Messdaten bei erhöhtem Fahrabstand feststellen.

## 9. Analyse Messdauer für die Bestimmung von repräsentativen Emissionswerten

Die absoluten Stickoxidemissionen sowie das Emissionsverhältnis  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  von Fahrzeugen unterliegen starken Schwankungen. Bei ersteren ist dies erwartet, da Emissionen vor allem bei hoher Motorleistung auftreten. Beim Emissionsverhältnis zeigen sich jedoch ebenfalls starke zeitliche Variationen, wie dies auch noch bei Zweiminutendaten (Abbildungen 45, 46, 47, 34) für einen EURO V LKW ersichtlich ist. Bei höherer Zeitauflösung sind noch deutlich stärkere Variationen möglich. Dies bedeutet, dass bei einem LKW, welcher im Mittel eine  $\text{NO}_x$ -Emission von 2438 mg/kWh bzw.  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältniss von 37,4 ppm/% aufweist, kurzzeitig die  $\text{NO}_x$ -Emission bzw. das  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältniss bis zu 10 mal höher liegen kann. Je kürzer eine Emissionsmessung, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der bestimmte Emissionswert stark von der mittleren Emission abweicht. Im Umkehrschluss ist die Frage, wie lange eine Emissionsmessung sein muss, um eine gewisse Genauigkeit für dem Emissionswert zu erhalten. Hierzu wurden die PEMS Messdaten aus dieser Studie verwendet, um für den EURO V und EURO II LKW dies genauer zu untersuchen. Betrachtet wird die Abweichung der bestimmten Emissionswerte gegenüber dem Mittelwert der Emission, wobei die einzelnen Emissionswerte über verschiedenen Mittelungsdauern berechnet werden. Genauer wird statistisch die Streuung der Emissionswerte um den Mittelwert analysiert wie in Abbildung 58 aufgetragen. Hieraus kann abgelesen werden, dass der bestimmte Emissionswert zu kurzen Mittelungsdauern einer starken Streuung unterliegt. Wird der Kaltstart ausgeschlossen (wo hohe Emissionen vorliegen), verringert sich die Streuung. Für den EURO V ist die Streuung deutlich größer als für den EURO II, da letzterer konstant hohe Emissionen aufweist, wohingegen die Abgasreinigungsanlage des EURO V keine konstante Emissionsreduktion erreicht.

## 9. Analyse Messdauer für die Bestimmung von repräsentativen Emissionswerten

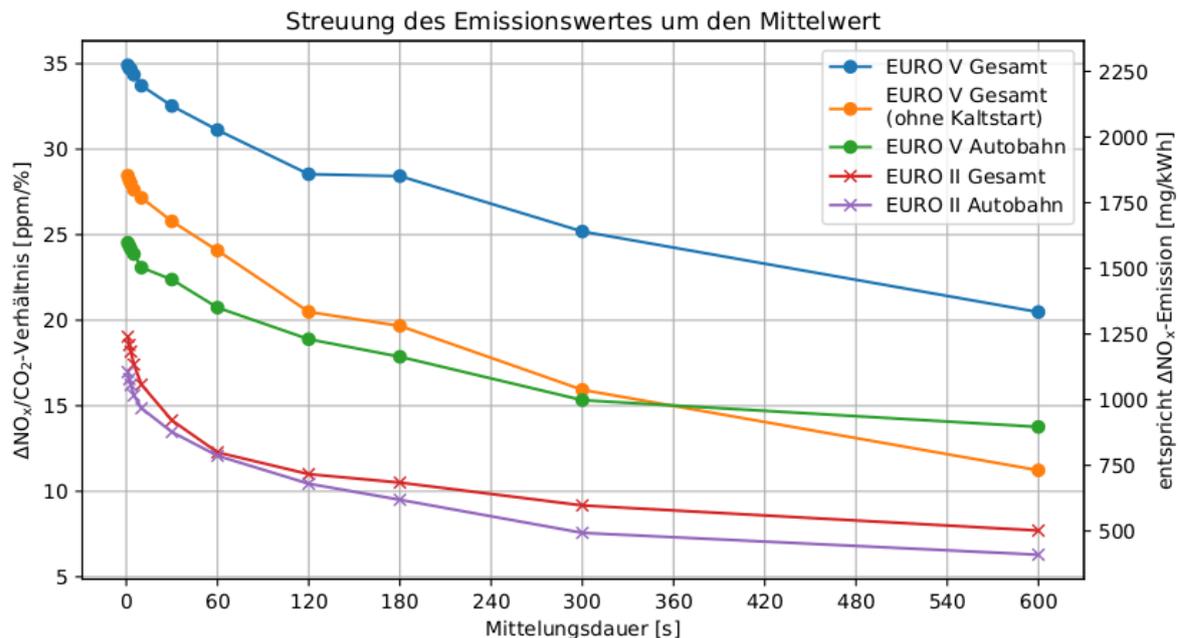


Abbildung 58: Streuung des aktuellen Emissionswertes ( $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältniss) zur Mittleren Emission des Fahrzeuges in Abhängigkeit von der Mittelungsdauer eines einzelnen Datenpunktes.

Bei sehr kurzen Mittelungsdauern (1s), wie sie z.B. für Remote Sensing üblich sind, liegt eine besonders hohe Streuung vor. Für den EURO V LKW weist in diesem Fall der Emissionswert einen statistischen Fehler von 35 ppm/% bzw. 2250 mg/kWh auf (zu berücksichtigen ist, dass der einzelne Messwert noch deutlich stärker abweichen kann). Eine eindeutige Emissionsbestimmung eines einzelnen LKW scheint dementsprechend bei 1 Sekunden-Messung einen sehr großen Fehler zu unterliegen, wodurch die eindeutige Identifikation eines LKW mit erhöhten Emissionen schwierig ist.

Bei Plume-Chasing-Messungen beträgt die Messdauer in der Regel zwischen 3 und 10 Minuten und kann durch ihren Messort Kaltstarteffekte ausschließen (z.B. Messungen von LKW nachdem diese bereits auf der Autobahn unterwegs sind). Somit lässt sich für den EURO V LKW ein statistischer Emissionsfehler von ca. 15 ppm/% bzw. 1000 mg/kWh erreichen, ausreichend um einen hohen Emmitter verlässlich zu identifizieren.

## 10. Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Emissionsmessungen von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) an LKWs mittels der Plume-Chasing-Methode mit einem ICAD- $\text{NO}_x$ -Messinstrument und einem Portable Emission Measurement Instrument (PEMS) verglichen. Die LKWs gehörten der EURO Norm II, V oder VI an und wurden jeweils mehrfach auf der gleichen Teststrecke im realen Verkehr untersucht. Die PEMS-Emissionsmessungen des EURO VI LKWs lieferten keine sinnvollen Ergebnisse (siehe Abschnitt 7.1), diese sind daher verworfen worden und es wurde kein Vergleich für den EURO VI LKW durchgeführt. Der Vergleich basiert daher auf den Messungen über vier Testrunden des EURO V und drei Runden des EURO II LKWs. Der untersuchte Emissionswert ist das Verhältnis von Stickoxid pro Kohlendioxid ( $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  in ppm/%). Dies ermöglicht die Berechnung der Stickoxid-Emissionen pro Leistung (siehe Abschnitt 3.3.3), wobei Zweiminuten-Mittelwerte für den Vergleich herangezogen wurden (Abschnitt 7.3). Bei der Auswertung der Emissionswerte des PEMS wurde die aus dem  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Verhältnis berechnete Emission in mg/kWh (Abschnitt 3.3.3), wie beim Plume-Chasing üblich, angegeben.

Es konnte eine gute Übereinstimmung beider Messverfahren (Korrelation  $R=0,88$ , Abschnitt 8) über den gesamten, recht großen Bereich an Emissionswerten von 0 mg/% bis 168 mg/% festgestellt werden. Im Mittel kommt es zu einer leichten Unterschätzung der Emissionswerte beim Plume-Chasing (-17,5%) im Vergleich zum PEMS. Die mittlere Abweichung bei den Zwei-Minuten-Messdaten beträgt -460 mg/kWh (Tabelle 8.1.1). Die mittleren Emissionen über alle Messdaten zeigen vor allem beim EURO V LKW eine sehr hohe Übereinstimmung, die Werte liegen nahezu gleich auf (38,8 ppm/% gegen 37,4 ppm/%, Tabelle 8.2). Hieraus folgt, dass das Plume-Chasing-Verfahren sich gut für die prinzipielle Bestimmung von realen Emissionen eines LKW eignet. Niedrige als auch hohe Emissionswerte werden verlässlich bestimmt. Im Gegensatz zum PEMS ist kein komplexer Aufbau am

## 10. Schlussfolgerung

zu untersuchenden Fahrzeug nötig, es muss nur dem zu untersuchenden Fahrzeug hinterher gefahren werden. Die Abweichungen und Variationen von Plume-Chasing-Emissionswerten bei 2-Minuten Mittelungsdaten sind jedoch deutlich höher als sie für RDE-Prüfungen nötig sind. Es ist daher ersichtlich, dass sie PEMS Messungen nicht ersetzen. Dies bedeutet auch, dass mit einer kurzen (2-Minuten) Plume-Chasing-Messung noch keine verlässliche Aussage über eine nur geringe Emissionserhöhung (z.B. wegen Alterung oder unzureichender Dosierung von Adblue) getroffen werden kann, sondern nur über eine signifikante Emissionserhöhung. Geringe Emissionserhöhungen benötigen eine deutlich längere Messung, damit Plume-Chasing-Emissionsmessungen eine ausreichende Übereinstimmung mit PEMS liefern.

Es konnte aber eindeutig gezeigt werden, dass das Plume-Chasing-Verfahren, hohe Emissionen an LKWs z.B. bei älteren LKWs oder bedingt durch Manipulationen oder Defekte an der Abgasreinigungsanlage zuverlässig bestimmen kann.

Betrachtet man den Vergleich der Emissionsdaten getrennt nach EURO-Norm, so ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung für den EURO V LKW und eine etwas weniger gute Übereinstimmung für den EURO II LKW. Beim EURO V LKW ist der Messunterschied geringer als 200 mg/kWh, eine Abweichung kleiner als 6 % zum PEMS (vgl. Tabelle 8.1.1). Beim EURO II LKW waren die mit dem Plume-Chasing-Verfahren ermittelten Emissionen 1346 mg/kWh geringer als die des PEMS, dies entspricht -20,7 %. In der Dynamik der Emissionen konnte jedoch eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Untersuchungen an beiden Geräten lieferten keinen Aufschluss zu der Abweichung. Hierfür kann eine Unterschätzung im Plume-Chasing ebenso wie eine Überschätzung des PEMS verantwortlich sein, da Querempfindlichkeiten zu anderen emittierten Stoffen bei diesem Fahrzeug ohne Abgasreinigung nicht auszuschließen sind.

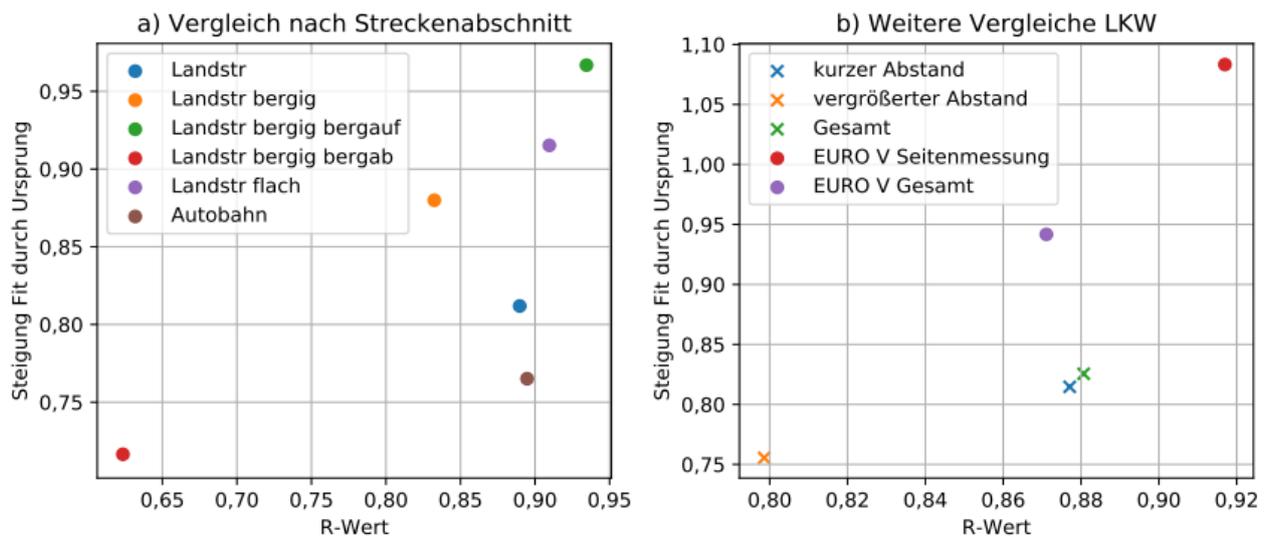


Abbildung 59: Vergleich Korrelation der Emissionen (EURO II und V zusammen). a) nach Streckenabschnitt; b) nach Abstand zum LKW

In Abbildung 59 sind die Ergebnisse der detaillierteren Korrelationen des Abschnittes 8 zusammengefasst. Bei der Betrachtung des Vergleiches getrennt nach Straßentyp ((Abbildung 59, a), Tabelle 8.3.2) lässt sich feststellen, dass die Messungen auf Landstraßen flach ( $R=0,91$ , Steigung 0,92; Abschnitt 8.3.3) und Landstraße bergauf ( $R=0,93$ , Steigung 0,97; Abschnitt 8.3.2) am besten korrelieren. Die Abweichung der Emission liegt im Mittel unter 4 %. Bei Bergauffahrt auf Landstraßen ist dies auf den hohen Kraftstoffverbrauch und der daraus resultierenden starken  $\text{CO}_2$ -Messsignal im Plume-Chasing-Verfahren zurückzuführen. Bei der flachen Landstraße ist dies durch eine konstante Fahrweise und wenig anderen störenden Verkehr bedingt. Auf den Autobahnen treten größere Abweichungen durch Störfaktoren auf, die Messungen liefern aber immer noch eine sehr zufriedenstellende Korrelation ( $R=0,89$ , Steigung 0,77; Abschnitt 8.3.4). Für den EURO V wurde hier eine Unterschätzung geringer als 10 % und für den EURO II geringer als 30 % festgestellt (siehe Tabelle 8.3.3).

## 10. Schlussfolgerung

Die Messungen für das Plume-Chasing wurden bei zwei verschiedenen Fahrabständen durchgeführt, um deren Einfluss zu bestimmen (Abbildung 59 b), Abschnitt 8.5). Die Messungen bei geringem Abstand (15 bis 25 m) führen zu einer leicht besseren Übereinstimmung ( $R=0,88$ ) als bei großem Abstand (30 bis 40 m) zum LKW ( $R=0,80$ ). Es kommt außerdem zu einer Verringerung gültiger Messwerte (von 64 % auf 57 %). Es konnte gezeigt werden, dass auch bei erhöhtem Abstand noch korrekte Emissionsmessungen möglich sind, jedoch auf ein ausreichendes Messsignal geachtet werden muss. Daher sind ohne weiteres auch Messungen längerer LKW wie Sattelschlepper möglich. Je entfernter jedoch der Auspuff vom Plume-Chasing-Messpunkt ist und je geringer die Fahrgeschwindigkeit ist, um so schwieriger sind Messungen in der Abgasfahne. Dies ist auch bereits bei den Messungen im Stadtverkehr (Abschnitt 8.3.5) ersichtlich.

Durch einen speziellen Aufbau an der Seite des Messfahrzeuges (siehe Abschnitt 8.4) konnten mit dem Plume-Chasing-Verfahren auch Messungen mittels Nebenherfahren näher am Auspuff des zu untersuchenden EURO V LKWs durchgeführt werden. Dabei wurde ein deutlich stärkeres Messsignal (ca. Faktor 3) bestimmt, weshalb eine höhere Genauigkeit für das Plume-Chasing-Verfahren erwartet wird. Die Korrelation zwischen den Messverfahren verbessert sich leicht von  $R=0,88$  auf  $R=0,92$ . Bei der seitlichen Messung kam es zu einer leicht höheren Emissionsbestimmung durch das Plume-Chasing-Verfahren von 8 %. Die Genauigkeit der Plume-Chasing-Methode bei der seitlichen Messung verbessert sich nur gering, sodass geschlussfolgert werden kann, dass Messungen beim Hinterherfahren ausreichend sind. Außerdem zeigte sich in der Praxis, dass Messungen beim Nebenherfahren schwer durchzuführen sind, daher ist die Messung durch Hinterherfahren einfacher und ermöglicht Messungen über längere Zeiträume, was weitere Vorteile aufweist (siehe Abschnitt 9).

In dieser Studie wurde außerdem analysiert, welchen Einfluss die Methode zur Bestimmung der Hintergrundkonzentrationen (Konzentrationen außerhalb der Emissionsfahne) von  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}_2$  auf die Plume-Chasing-Ergebnisse hat

## 10. Schlussfolgerung

(Abschnitt 5.4). Hier stellte sich heraus, dass die verschiedenen Methoden nur geringen Einfluss haben. Die in dieser Studie verwendete Methode (M2) ist vergleichbar mit der bisherigen Bestimmung der Hintergrundkonzentrationen in vorangegangenen Studien und liefert eine gute Korrelation zwischen PEMS und Plume-Chasing.

Das Plume-Chasing-Verfahren mit dem NO<sub>x</sub>-ICAD-Messinstrument ist nachgewiesenermaßen ein geeignetes Mittel, um manipulierte oder defekte Abgasreinigungsanlagen mobil und ad hoc zu identifizieren. Auch lassen sich Datenerhebungen im großen Rahmen realisieren, da das Verfahren ein hohes Maß an Flexibilität und Mobilität bietet. Präzise Messungen sind besonders bei hoher Leistung des Fahrzeugs, beispielsweise bei Bergauffahrt, möglich. Aber selbst bei geringer Leistung, und daraus resultierenden geringen absoluten Emissionen, wie auch bei hohem Störfaktoraufkommen sind aussagekräftige Messungen möglich. Das verwendete NO<sub>x</sub>-ICAD-Messinstrument für das Plume-Chasing-Verfahren eröffnet neue Möglichkeiten, die Maßnahmen zur Luftreinhaltung im Straßenverkehr in Zukunft effizient zu unterstützen.

## 11. Ausblick

In dieser Studie konnte leider kein Vergleich mit einem niedrig emittierenden EURO VI LKW aufgrund Schwierigkeiten mit dem PEMS System durchgeführt werden. In weiteren Studien erfolgten jedoch Vergleichsmessungen mit EURO 6 PKW (Abbildung 60), die hier als Ausblick für einen Vergleich geringer Emissionen aufgeführt werden (Reber, 2018).



Abbildung 60: Aufbau für Vergleichsmessung an einem EURO 6 PKW.

Insbesondere wurde bei diesen PKW-Vergleichsmessungen überprüft in wie weit Plume-Chasing auch kurzzeitige Emissionsschwankungen im Sekundenbereich sowie niedrige EURO 6 Emissionswerte korrekt erfassen kann. Dazu wurden auf einer 3 km Teststrecke in Intervallen Beschleunigungen am Testfahrzeug durchgeführt und die Messwerte verglichen (Abbildung 61). Beide Messungen zeigen ähnliche Dynamik, wobei Plume-Chasing einzelnen, kurzzeitigen, Emissionspeaks nur begrenzt folgen kann, vor allem wenn die Messung nicht ausreichend in der Abgasfahne erfolgen. Korreliert man beide Daten (Mittelung über 10 Sekundenintervalle) ergibt sich ein Korrelationsfaktor von 0,96 und eine hohe Übereinstimmung auch bei geringen Emissionsverhältnissen (Emissionen kleiner 2 ppb/ppm = 20 ppb/%).

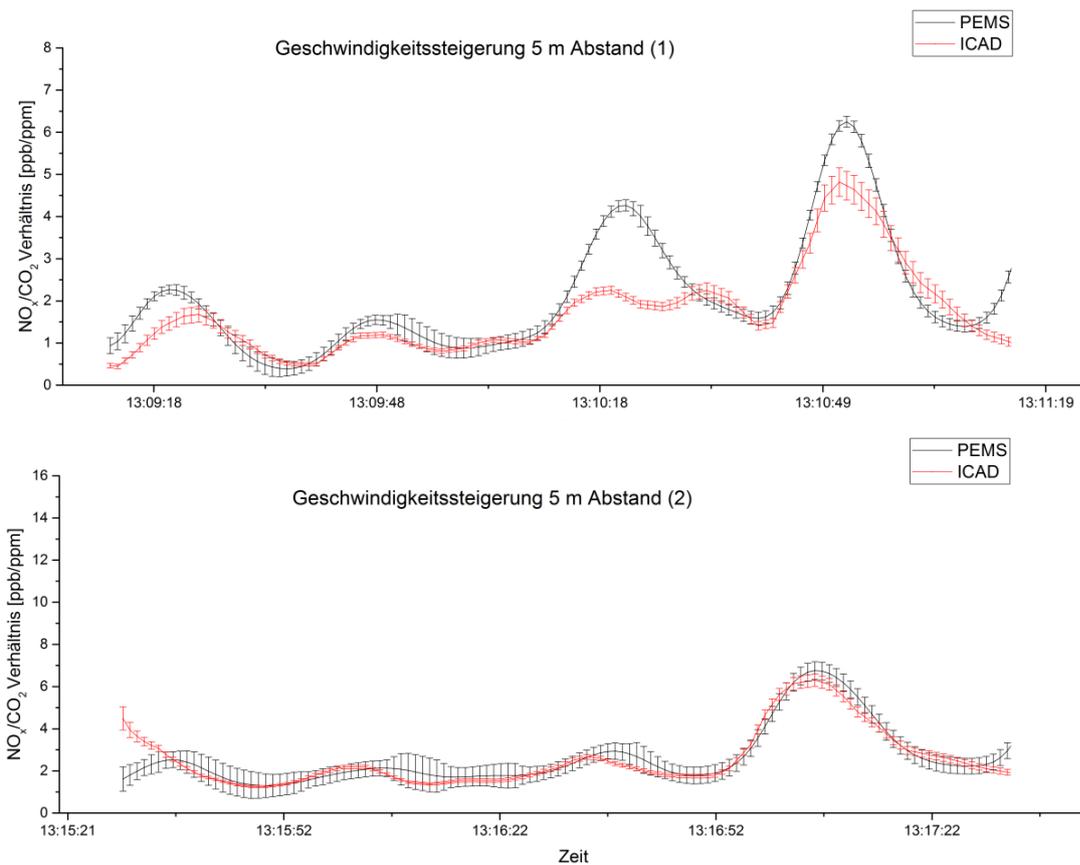


Abbildung 61: Zeitreihe Messdaten  $NO_x/CO_2$ -Verhältnis bei Vergleichsmessung an einem EURO 6 PKW (Schwarz - PEMS, Rot - Plume-Chasing) bei einem Fahrabstand von 5m. Unterschiedliche Skala in [ppb/ppm] berücksichtigen.

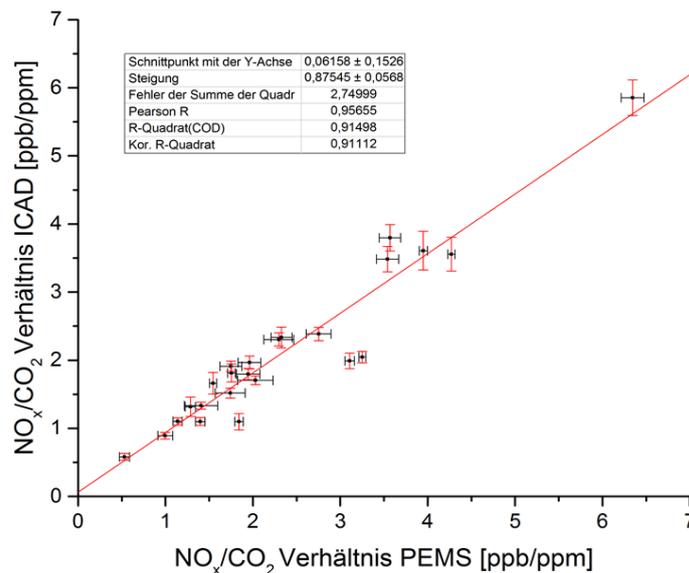


Abbildung 62: Korellation der Messwerte am EURO 6 PKW mit 10 Sekunden Mittelwerten (Fahrabstand 5m).

## 11. Ausblick

Es kann aus diesen Vergleichsmessungen geschlussfolgert werden, dass Plume-Chasing auch geringe Emissionswerte mit zufriedenstellender Übereinstimmung erfassen kann. Es sind keine systematisch zu hohen Emissionswerte vom Plume-Chasing gegenüber dem PEMS im geringen Emissionsbereich gefunden worden, wie sie bei dem EURO VI LKW vorlagen (Abschnitt 7.1). Dies bestätigt die Schlussfolgerung in diesem Bericht, dass bei den LKW-Vergleichsmessungen (vor allem EURO VI) eher ein Messfehler im PEMS vorlag (Abschnitt 6).

## 12. Literaturverzeichnis

Fenimore, C.P., 13. Symp. (International) on Comb., p. 373, 1971.

Glarborg. P., A.D. Jensen, J.E. Johnsson, Prog. in Energy and Combustion Sciences 29 , 89, 2003.

Harrison, R.M., Royal Society of Chemistry (Great Britain) (Eds.), 2007.  
Principles of environmental chemistry. RSC Pub, Cambridge, U.K.

Krufczik, C., Mobile NO<sub>x</sub>-Emissionsmessungen an Fahrzeugen mit einem ICAD-Messinstrument Bachelorarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, 2017.

Pöhler D. and Adler T. (2017). Bestimmung von realen Lkw NO<sub>x</sub> Emissionen (Real Driving Emissions) auf deutschen Autobahnen, public report, Institute of Environmental Physics, University of Heidelberg, 2017.

Reber J., Mobile NO<sub>x</sub>-Emissionsmessungen an Stadtverkehrsbussen mit einem ICAD-Messinstrument, Bachelorarbeit, Universität Heidelberg, 2018.

UBA, Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid- Exposition in Deutschland, Abschlussbericht, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt, 2018a.

UBA, Luftqualität 2017, Vorläufige Auswertung, Umweltbundesamt, 2018b.

Washenfelder, R. A., Langford, A. O., Fuchs, H., and Brown, S. S.; Measurement of glyoxal using an incoherent broadband cavity enhanced absorption spectrometer, Atmos. Chem. Phys., 8, 7779-7793, <https://doi.org/10.5194/acp-8-7779-2008>, 2008.

WHO, Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP Project, Technical Report, WHO Regional Office for Europe\*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2013.

Wolfrum, J., Chemie Ingenieur Technik, 44, 656, 1972.

Zeldovich, Y.B. , Acta Physicochim. USSR 21, 577, 1946.